

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño estructural de una alcantarilla tipo cajón prefabricada de  
concreto reforzado de 10'x10' mediante normativas AASHTO  
LRFD 2018

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Daniel Melgar  
Morán para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil  
Arquitectónica

Guatemala

2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería




Diseño estructural de una alcantarilla tipo cajón prefabricada de  
concreto reforzado de 10'x10' mediante normativas AASHTO  
LRFD 2018

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Daniel Melgar  
Morán para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil  
Arquitectónica

Guatemala

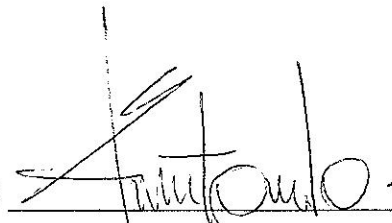
2025

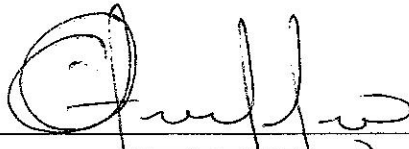
Vo.Bo.:

(f.)   
Ing. Hugo Enrique Pallais Beteta

Tribunal examinador:

(f.)   
Ing. Hugo Enrique Pallais Beteta

(f.)   
Ing. Danilo Antonio Rodríguez Cerón

(f.)   
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

Fecha de aprobación: Guatemala, 19 de junio de 2025

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	I
JUSTIFICACIÓN .....	II
OBJETIVOS .....	III
A. Objetivo general .....	III
B. Objetivos específicos .....	III
MARCO TEÓRICO.....	1
A. Aspectos sísmicos .....	1
B. Estructuras enterradas .....	6
C. Alcantarillas tipo cajón .....	6
D. Tipos de alcantarillas.....	7
1. Secciones circulares.....	7
2. Secciones tipo cajón.....	8
E. Geometrías (espesores mínimos) .....	9
F. Análisis estructural.....	9
G. Concreto reforzado.....	10
H. Ventajas y desventajas del concreto reforzado.....	13
I. Muros de contención .....	14
J. Factores de carga.....	16
K. Mecánica de suelos .....	17
1. Tipo de suelos .....	17
L. Peso propio.....	18
M. Cargas verticales de suelo (EV).....	18
N. Cargas horizontales de suelo (EH).....	20
O. Cargas vivas vehiculares .....	21
P. Cargas vivas vehiculares para rellenos de 2 pies o inferiores.....	23
Q. Sobrecarga de carga viva (vehículos en aproximación).....	24
R. SAP2000 en el diseño de alcantarillas .....	25

1. Características Generales de SAP2000.....	25
2. Modelado de la Alcantarilla en SAP2000.....	27
METODOLOGÍA.....	29
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	33
A. Datos iniciales.....	33
B. Cálculo de cargas muertas, cargas de suelo y cargas vivas.....	34
C. Cálculo de cargas por agua.....	40
D. Cálculo de cargas dinámicas.....	41
E. Combinaciones de carga en SAP2000.....	44
F. Diseño de refuerzos por flexión.....	53
G. Chequeos de acero mínimo y máximo.....	60
H. Resumen de áreas de acero de refuerzo.....	61
I. Revisión de cortante y chequeo de empuje axial.....	62
J. Detalles de refuerzo y longitudes de refuerzo.....	62
CONCLUSIONES.....	64
RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS.....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de protección sísmica.....	2
Tabla 2. Valores para el coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos.....	3
Tabla 3. Valores para el coeficiente de sitio para periodos de vibración largos.....	3
Tabla 4. Factores Kd con relación al nivel del sismo.....	4
Tabla 5. Listado de varillas y sus características.....	12
Tabla 6. Combinaciones y factores de carga.....	16
Tabla 7. Factores de reducción de resistencia.....	17
Tabla 8. Datos Iniciales del modelo.....	33
Tabla 9. Resumen de cargas muertas aplicadas al modelo.....	35
Tabla 10. Resumen de cargas verticales y horizontales del suelo.....	38
Tabla 11. Resumen de sobrecargas vivas.....	40
Tabla 12. Resumen de cargas dinámicas.....	43
Tabla 13. Resultado Análisis Estructural Momento en (Kip,ft).....	50
Tabla 14. Resultado Análisis Estructural Cortante en (Kip).....	50
Tabla 15. Resultado Análisis Estructural Carga Axial en (Kip).....	50
Tabla 16. Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Losa Superior Centro....	51
Tabla 17. Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Losa Superior Lateral....	51
Tabla 18. Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Muro Lateral Superior...51	51
Tabla 19. Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Muro Lateral Centro.....	52
Tabla 20. Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Losa Inferior Centro.....	52
Tabla 21. Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Losa Inferior Lateral.....	52
Tabla 22. Resumen de Momento Ultimo y Área de acero requerida.....	55
Tabla 23. Resumen de acero requerido por Momento último y por control de agrietamiento.....	59
Tabla 24. Resumen de acero mínimo requerido por flexión.....	60
Tabla 25. Resumen de deformación del refuerzo.....	60

Tabla 26. Valor máximo de razón de refuerzo.....	61
Tabla 27. Resumen de áreas de acero de refuerzo y su ubicación.....	61
Tabla 28. Verificación de cortante ultimo $V_u$ .....	62
Tabla 29. Longitudes del acero de refuerzo. ....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de zonificación sísmica de Guatemala.....	1
Figura 2. Gráfico del espectro de respuesta .....	5
Figura 3. Dimensiones alcantarillas tipo cajón de concreto reforzado.....	7
Figura 4. Ejemplo de alcantarilla de secciones circulares.....	8
Figura 5. Ejemplo de alcantarilla tipo cajón o de sección rectangular.....	9
Figura 6. Modelo bidimensional para análisis estructural.....	10
Figura 7. Testigos de concreto.....	11
Figura 8. Curvas de esfuerzo-deformación .....	11
Figura 9. Esfuerzo Ultimo y Esfuerzo de fluencia. ....	13
Figura 10. Varillas de acero rugoso .....	13
Figura 11. Distintos muros de contención.....	15
Figura 12. Sección de muro por gravedad.....	15
Figura 13. Instalación debajo de terraplén .....	19
Figura 14. Instalación en zanja.....	20
Figura 15. Variables para la presión activa de suelo .....	20
Figura 16. Tipos de vehículos y su nomenclatura .....	22
Figura 17. Características del camión de diseño .....	22
Figura 18. Trafico transitando en paralelo con el vano .....	23
Figura 19. Sobrecarga de carga viva .....	25
Figura 20. Interfaz de programa determinando geometrías .....	26
Figura 21. Interfaz de programa para determinar secciones y áreas .....	26
Figura 22. Dimensionamiento y características de grilla .....	28
Figura 23. Sección de la alcantarilla tipo cajón prefabricada a analizar .....	34
Figura 24. Cálculo de cargas muertas .....	35
Figura 25. Cálculo de presión de suelo .....	36
Figura 26. Cálculo de presión de suelo segunda parte .....	37
Figura 27. Cálculo de presión de suelo segunda parte .....	38

Figura 28. Cálculo de sobrecarga viva lateral parte superior e inferior .....	39
Figura 29. Cargas Hidrostáticas aplicadas al modelo.....	40
Figura 30. Cálculo de factor IM .....	41
Figura 31. Cálculo de cargas vivas para el camión de diseño.....	42
Figura 32. Cálculo de cargas vivas para configuración tándem.....	43
Figura 33. Carga Viva producida por TANDEM .....	44
Figura 34. Modelo de SAP2000.....	44
Figura 35. Modelo de SAP2000 aplicado con cargas de momento M22 .....	45
Figura 36. Modelo de SAP2000 aplicado con cargas de momento M11 .....	45
Figura 37. Modelo de SAP2000 aplicado con cargas de momento V13.....	46
Figura 38. Modelo de SAP2000 aplicado con cargas de momento V23.....	46
Figura 39. Load Cases utilizados en el modelo de SAP2000.....	47
Figura 40. Load Combinations utilizados en el modelo de SAP2000 .....	47
Figura 41. Detalle de combinaciones de carga en el modelo de SAP2000.....	48
Figura 42. Detalle de combinaciones de carga.....	48
Figura 43. Deformación de carga 1A_TANDEM .....	48
Figura 44. Diagrama resultante de Momento de carga 1A_TANDEM.....	49
Figura 45. Ubicaciones de análisis de carga en modelo SAP2000 .....	49
Figura 46. Cálculo de área de acero Muros Laterales.....	53
Figura 47. Cálculo de área de acero Losa Superior.....	54
Figura 48. Cálculo de área de acero Losa Inferior .....	54
Figura 49. Cálculo por control de agrietamiento Losa Superior .....	55
Figura 50. Corrección por control de agrietamiento Losa Superior.....	56
Figura 51. Calculo por control de agrietamiento Losa Inferior.....	57
Figura 52. Corrección por control de agrietamiento Losa Inferior .....	58
Figura 53. Calculo por control de agrietamiento Muros Laterales .....	59
Figura 54. Chequeos de acero mínimo para refuerzos por flexión .....	60
Figura 55. Detalle de acero de refuerzo de alcantarilla tipo cajón prefabricada de concreto reforzado.....	63

## RESUMEN

Las alcantarillas tipo cajón son un tipo de estructura utilizada para permitir el paso de agua de forma controlada debajo de carreteras, caminos y todo tipo de infraestructura, con un canal cuadrado o rectangular. La gestión del flujo de agua es su característica más importante de estas, pero también son de vital importancia para contener tanto deslaves de taludes en los alrededores como prevenir inundaciones en lugares aledaños a los canales de agua.

Con este trabajo se pretende realizar un diseño estructural teniendo en cuenta un supuesto de transporte según la normativa AASHTO LRFD que pasará por encima y el suelo que se encontrará en contacto con la estructura, el cual también será un supuesto. Con toda esta información, se podrá realizar una parametrización para el diseño estructural adecuado, que cumpla con las condiciones de sitio, terreno y demandas del tránsito vehicular.

Para el diseño y el análisis estructural de este sistema de alcantarillas tipo cajón, se tomarán en cuenta los siguientes códigos y manuales de referencia: *AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN*, *ACI 318-16* y *SAP2000* para cálculos estructurales y dimensionamiento de la estructura.

Con el fin de mostrar mayor detalle en los resultados de este proyecto se realizarán, informes y planos de los datos introducidos, resultados de análisis, detalle de armaduras y medidas de materiales.

Palabras clave: alcantarillas tipo cajón, diseño estructural, AASHTO LRFD

## **ABSTRACT**

This study presents the structural design of a 10'x10' precast reinforced concrete box culvert based on the guidelines of the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2018). The objective was to ensure structural safety and serviceability under various load combinations and environmental conditions.

The design process included the definition of relevant loads such as dead loads, soil pressures, hydrostatic forces, and vehicular live loads (HL-93), followed by structural modeling and analysis using SAP2000.

Critical internal forces (moments and shears) were obtained and used for the flexural and shear design of the culvert walls, top slab, and bottom slab. Reinforcement detailing was carried out based on strength and serviceability requirements, including minimum and maximum reinforcement limits, crack control checks, and axial force considerations. A design spreadsheet in Microsoft Excel was also developed to serve as a practical tool for similar projects.

The final design ensures compliance with the structural and durability requirements set forth by the AASHTO LRFD code and provides a replicable methodology for the design of precast concrete box culverts.

**Keywords:** box culverts, structural design, AASHTO LRFD

# INTRODUCCIÓN

El diseño de alcantarillas prefabricadas de concreto reforzado juega un papel fundamental en la construcción de infraestructura vial, al garantizar un drenaje eficiente y la seguridad estructural de carreteras y caminos. Estas estructuras, comúnmente utilizadas para canalizar el flujo de agua bajo vías de tránsito, deben ser capaces de resistir diversas cargas, como el peso del suelo, el tránsito vehicular y las presiones hidrostáticas, mientras mantienen su durabilidad a largo plazo.

Las especificaciones AASHTO LRFD Bridge Design han surgido como un estándar para el diseño y análisis de estas estructuras, ya que integran principios de diseño basado en factores de carga y resistencia (load and resistance factor design, LRFD). Este enfoque permite una evaluación más precisa de las condiciones de carga real y una optimización de los materiales empleados, lo que se traduce en estructuras más seguras y económicamente viables.

A pesar de su relevancia, en muchas regiones, los métodos tradicionales de diseño continúan siendo predominantes, lo que limita la implementación de técnicas modernas y normativas actualizadas. Este estudio se enfoca en aplicar las especificaciones AASHTO LRFD al diseño de alcantarillas prefabricadas de concreto reforzado, con el objetivo de evaluar su viabilidad.

En este contexto, se desarrolla una metodología que incluye el análisis teórico de las condiciones de carga y la validación mediante herramientas de modelado estructural. Los resultados no solo proporcionarán un diseño optimizado, sino que también sentarán las bases para estandarizar el uso de estas normativas en proyectos de infraestructura local, promoviendo prácticas más sostenibles y seguras.

# JUSTIFICACIÓN

En la ingeniería civil los procesos constructivos deben ser óptimos, económicos y efectivos para que a la hora de ser ejecutados sean prácticos y seguros, actualmente en Guatemala el sistema de drenajes no es el más óptimo y en varios casos ha generado muchos problemas sobre todo en el transcurso del presente año.

La construcción en la ciudad de Guatemala ha mostrado grandes debilidades al momento de querer continuar con la con la infraestructura vial ya que esta se ve interrumpida por accidentes geográficos ya sean ríos, nacimientos o cualquier tipo de cuerpo de agua. Por lo tanto, el uso de sistemas de alcantarillados como el alcantarillado tipo cajón puede ser una excelente solución.

En este trabajo de graduación se hablará sobre las alcantarillas de tipo cajón y como la función primordial es evitar inundaciones al proporcionar un conducto seguro para el flujo de agua durante eventos de lluvia intensa, crecidas de ríos o tormentas. Estas estructuras canalizan el agua de manera efectiva, asegurando que no se acumule en la superficie de la carretera o de otros tipos de infraestructura vial y urbanizaciones.

Gracias a su vital función y la gran problemática de inundaciones en todo el país las alcantarillas tipo cajón son una excelente solución para atacar de forma directa los desastres que puedan suceder. Es muy importante resaltar la gran versatilidad de aplicaciones que tiene este tipo de estructuras como por ejemplo su diseño y construcción implican consideraciones hidráulicas, estructurales y medioambientales y su instalación, mantenimiento y cumplimiento de normativas son esenciales para garantizar su funcionalidad y su contribución al bienestar de la sociedad.

Las alcantarillas tipo cajón pueden desempeñar un papel muy importante en la infraestructura y el desarrollo de Guatemala al permitir un manejo eficiente del agua y mejorar el tránsito vial. En este trabajo de graduación se mostrará su versatilidad de diseño lo cual las hace adecuadas para una amplia gama de aplicaciones en el país, donde las condiciones climáticas y topográficas pueden variar significativamente de una región a otra.

# OBJETIVOS

## A. Objetivo general

Diseñar estructuralmente una alcantarilla tipo cajón prefabricada de concreto reforzado de dimensiones 10'x10', aplicando los lineamientos establecidos en la normativa AASHTO LRFD 2018.

## B. Objetivos específicos

- Establecer los supuestos necesarios y analizar las condiciones de carga que actúan sobre la misma conforme a los lineamientos de la normativa AASHTO LRFD 2018.
- Modelar la estructura en el software SAP2000 y analizar las máximas solicitaciones de carga que afectan su comportamiento estructural, con el fin de evaluar su desempeño bajo los distintos estados límite establecidos por la normativa AASHTO LRFD 2018.
- Desarrollar una hoja de cálculo en Excel que sirva como guía práctica para el diseño estructural de alcantarillas tipo cajón prefabricadas de concreto reforzado conforme a los criterios de diseño de AASHTO LRFD 2018.
- Diseñar el refuerzo de acero necesario con base en los resultados obtenidos del análisis estructural, y elaborar los detalles constructivos correspondientes en AutoCAD, incluyendo la disposición del refuerzo y las dimensiones estructurales según los requisitos de AASHTO LRFD 2018.

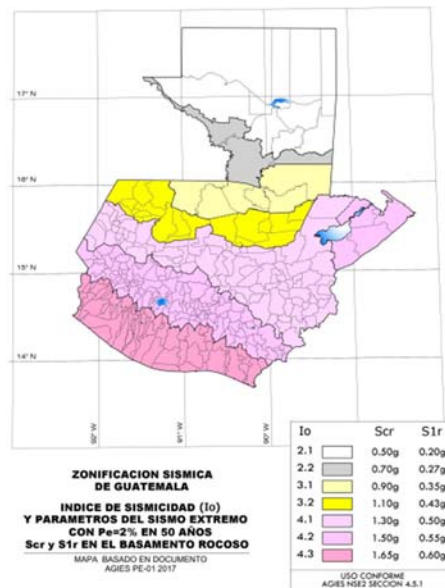
# MARCO TEÓRICO

## A. Aspectos sísmicos

La sismoresistencia es la capacidad de un edificio o estructura para resistir las fuerzas y deformaciones generadas por un terremoto sin sufrir daños significativos o colapsos. La sismoresistencia es un aspecto fundamental en la ingeniería civil y de la construcción en áreas sísmicas, ya que los terremotos pueden generar fuerzas extremadamente poderosas que ponen en peligro la vida de las personas y la integridad de las estructuras.

Para esta clase de aplicación se utilizan sistemas estructurales resistentes a terremotos como los muros a cortante, disipadores de energía, aisladores sísmicos y sistemas de refuerzo en acero. Estos sistemas permiten a la estructura absorber y disipar las fuerzas sísmicas de una manera más controlada. A continuación, se mostrará el mapa de zonificación sísmica en Guatemala el cual muestra por sectores el índice de sismicidad ( $I_0$ ), parámetros del sismo extremo, los índices  $Scr_1$  y  $S1r$  en el basamento rocoso.

**Figura 1.** Mapa de zonificación sísmica de Guatemala



Nota. Adaptada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018)

Como se puede observar en la Figura 1 Guatemala es un país altamente sísmico que requiere la consideración de aspectos sísmicos a la hora de diseñar infraestructura con los parámetros necesarios para proteger la obra de un posible sismo. Las

consideraciones sísmicas que se deben tomar en cuenta y los factores que se utilizan dependiendo de la ubicación del proyecto son los siguientes:

### 1. Índice de sismicidad ( $I_0$ )

Es el índice en el cual se encuentra la selección del espectro sísmico de diseño. En Guatemala el índice de sismicidad se divide por zonas. El AGIES NSE -2-2018 Anexo A contiene el listado por municipio de la amenaza sísmica el cual proporciona los valores de índice de sismicidad, ordenada espectral de periodo corto y ordenada espectral con periodo de sismo extremo considerado en el sitio de interés.

### 2. Nivel de protección sísmica:

El factor que depende del índice de sismicidad y de la clase de obra a analizar el cual se encuentra en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Valores de protección sísmica

Índice de Sismicidad <sup>[b]</sup>	Clase de obra <sup>[a]</sup>			
	Esencial	Importante	Ordinaria	Utilitaria
$I_0 = 4$	E	D	D	C
$I_0 = 3$	D	C	C	B
$I_0 = 2$	C	B	B	A
Probabilidad de exceder el sismo de diseño <sup>[c]</sup>	5% en 50 años <sup>[d]</sup>	5% en 50 años <sup>[d]</sup>	10% en 50 años	Sismo mínimo <sup>[e]</sup>

Nota. Adaptada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018)

### 3. Clasificación de sitio

Los sitios en Guatemala se dividen en distintas clasificaciones las cuales se basan en características del perfil del suelo por debajo de los cimientos. La asociación guatemalteca de ingeniería estructural y sísmica los divide por las siguientes categorías: A, B los cuales son sitios con rocas, C y D son suelos firmes y E es un suelo blando. Por último, se encuentra el F el cual indica un tipo de suelo de análisis especial.

### 4. Ajuste por clase de sitio

Al obtener los valores  $I_0$  y con la información sobre la clasificación de sitio se encuentran los valores del coeficiente de sitio para periodo de vibración corta ( $F_a$ ) y el coeficiente de sitio para periodos de vibración larga ( $F_v$ ) los cuales se encuentran en las siguientes tablas:

**Tabla 2.** Valores para el coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos

Clase de sitio	Índice de sismicidad				
	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1 4.2 4.3
AB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C <sup>[1]</sup>	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	1.7	1.3	1.1	1.0	0.9
F	Se requiere evaluación específica - ver Sección 4.4				

Nota. Adaptada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018)

**Tabla 3.** Valores para el coeficiente de sitio para periodos de vibración largos

Clase de sitio	Índice de sismicidad				
	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1 4.2 4.3
AB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D <sup>[1]</sup>	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
E	3.3	2.8	2.6	2.4	2.2
F	Se requiere evaluación específica - ver Sección 4.4				

Nota. Adaptada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018)

Para obtener la ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto ( $S_{cs}$ ) y la ordenada espectral para periodos de vibración de un segundo se utilizarán las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned} S_{cs} &= S_{cr} * F_a * N_a S_{1s} \\ &= S_{1r} * F_v * N_v \end{aligned}$$

Nota:

- $N_a$  y  $N_v$  son factores que aplican a la proximidad de amenazas especiales las cuales se tomaran con el valor de 1.

5. Probabilidad nominal de ocurrencia de los sismos de diseño

Se determina mediante el nivel de protección sísmica, en la siguiente tabla se puede observar el factor  $K_d$  que se toma como la probabilidad nominal de ocurrencia.

**Tabla 4.** Factores  $K_d$  con relación al nivel del sismo

Nivel de sismo	Factor $K_d$
Sismo ordinario — 10% probabilidad de ser excedido en 50 años	0.66
Sismo severo — 5% probabilidad de ser excedido en 50 años	0.80
Sismo extremo — 2% probabilidad de ser excedido en 50 años	1.00
Sismo mínimo — condición de excepción	0.55

Nota. Adaptada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018)

Los parámetros del espectro necesitan de una calibración la cual es realizada multiplicando el factor  $K_d$  previamente encontrado.

$$S_{cd} = S_{cs} * K_d$$

$$S_{1d} = S_{1s} * K_d$$

6. Aceleración máxima del suelo

Para encontrar una aceleración máxima del suelo estimada según los espectros del sismo de diseño se utilizará:

$$ASM_d = 0.40 * S_{cd}$$

7. Coeficiente de sismo

El coeficiente de sismo se encuentra en función de la aceleración máxima del suelo la cual actúa en el centroide de la masa de suelo utilizando la siguiente ecuación:

$$A_m = (1.45 - ASM_d) * ASM_d$$

El coeficiente sísmico horizontal se obtiene al multiplicar la aceleración del suelo por la una constante que dependerá del tipo de suelo, para suelos firmes se utilizaría la siguiente ecuación:

$$Kh = 0.5 * Am$$

Para suelos medios a medios compactos se utilizará esta ecuación:

$$Kh = 0.67 * Am$$

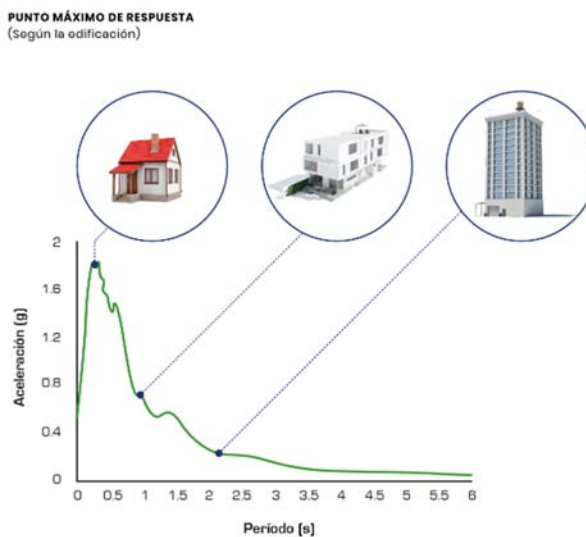
Por último el coeficiente sísmico vertical esa en función del sismo horizontal el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$Kv = 0.5 * kh$$

#### 8. Espectro de respuesta

El espectro de respuesta se trata de la respuesta máxima de oscilación de un grado de libertad ante un estímulo sísmico para distintos tipos de suelos, estas oscilaciones son representadas por su periodo natural de vibración que es con el cual presentan sus máximas amplitudes, por lo que el gráfico de espectro de respuesta se basa en los conceptos de amplitud y periodo como se observa en la figura 2.

**Figura 2.** Gráfico del espectro de respuesta



Nota. Adaptada de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018)

## 9. Teoría Mononobe-Okabe para el cálculo de empujes laterales de suelo

La teoría Mononobe-Okabe es utilizada para predecir las fuerzas y momentos inducidos en una estructura de retención como por ejemplo un muro de contención, el cual es sometido a una presión debido al suelo que se encuentre retenido en la parte posterior al muro. Esta teoría establece las relaciones entre la geometría del talud, las propiedades del suelo y las cargas aplicadas con el fin de determinar la estabilidad del muro en distintas condiciones a las cuales puede ser sometido.

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\varphi - \psi - \alpha)}{\cos \psi \cos^2 \alpha \cos(\psi + \alpha + \delta) \left( 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \psi - \beta)}{\cos(\delta + \psi + \alpha) \cos(-\beta + \alpha)}} \right)^2}$$

### B. Estructuras enterradas

Las estructuras enterradas sirven para una variedad de propósitos. Generalmente se utilizan para transportar agua. En otras ocasiones se utilizan para proporcionar un cruce separado por nivel para el tráfico peatonal y de bicicletas. Los tipos más comunes son alcantarillados y alcantarillas de tipo cajón. Según ASSHTO Las estructuras enterradas con dimensiones horizontales inferiores a 10 pies no se clasifican como puentes.

Por lo general, estas estructuras enterradas más pequeñas no requieren un diseño extenso y se seleccionan de tablas de diseño estándar. Todas las alcantarillas tipo cajón requieren de un diseño y planificación adecuados para poderse llevar a cabo. Además de los alcantarillados y alcantarillas tipo cajón, se utilizan arcos de concretos prefabricados, estructuras prefabricadas de tres lados y estructuras de acero corrugado de larga luz como estructuras enterradas. HUFF, T. (2024).

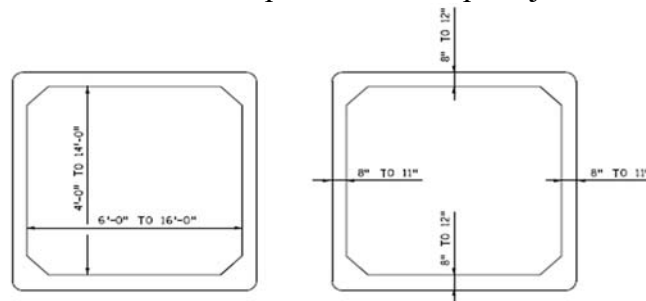
### C. Alcantarillas tipo cajón

Son estructuras subterráneas que se utilizan para la recolección y transporte de aguas pluviales y residuales hacia plantas de tratamiento o cuerpos de agua. También se conocen como sistemas de alcantarillado o redes de alcantarillado. Estas estructuras son una parte fundamental de la infraestructura de saneamiento en áreas urbanas y rurales.

Cumplen otras funciones como construcciones viales, como paso de automóviles, personas e incluso animales en una autopista o en una calle. Existen criterios a tomar en consideración que delimitan el diseño y ejecución de una alcantarilla como el caudal de diseño, la sección de la alcantarilla y el tipo de alcantarilla.

Los diseños estandarizados para alcantarillas tipo cajón prefabricadas están disponibles desde aberturas de 6 hasta 16 pies y alturas desde los 4 hasta los 14 pies. Las secciones de 6 pies son las mas utilizadas en el ámbito de prefabricadas y los diseños utilizan concreto de 5,000 o de hasta 6,000 psi dependiendo de las alturas y altos necesarios. Por último, si las alcantarillas tipo cajón se encuentran fuera de los tamaños estándar brindados con anterioridad se debe realizar un diseño. HUFF, T. (2024).

**Figura 3.** Dimensiones alcantarillas prefabricadas tipo cajón de concreto reforzado



**Figure 12.2.1.1**  
*Typical Precast Concrete Box Culvert Dimensions*

Nota. Adaptada de HUFF, T, (2024).

Cada uno de estos prefabricados cuenta con 3 o hasta 4 tipos distintas clases, cada clase cuenta con diferentes espesores de losa, áreas de refuerzo, tipo de concreto y altura de relleno. Las tablas de diseño estandarizadas están basadas en el uso de electro malla de refuerzo con una fuerza de acero a tensión de 65 ksi.

## D. Tipos de alcantarillas

### 1. Secciones circulares

Una alcantarilla de sección circular es un tipo de estructura de drenaje subterráneo que utiliza una tubería con una sección transversal circular. Las alcantarillas de sección circular son una de las formas más comunes de alcantarillas utilizadas en

sistemas de alcantarillado y drenaje en todo el mundo debido a su eficiencia y capacidad de transportar volúmenes de agua.

Cabe resaltar que este tipo de alcantarilla se utiliza más cuando es un flujo de menor magnitud ya que estas son prefabricadas, por lo que solo se debe instalar en el lugar deseado, sin embargo la desventaja de que a medida que se necesita más área de conducción se empieza a complicar porque la sección circular comienza a abarcar demasiado espacio, una solución es colocar más de una tubería para distribuir así las áreas transversales en la estructura, pero se desperdicia el espacio del centro.

**Figura 4.** Ejemplo de alcantarilla de secciones circulares



Nota. Adaptada de Colorado State University (2001).

## 2. Secciones tipo cajón

Una alcantarilla de sección tipo cajón, también conocida como alcantarilla de sección rectangular utiliza una tubería o canal con una sección transversal de forma rectangular. Se utilizan comúnmente en sistemas de alcantarillado y drenaje para transportar agua de lluvia y aguas residuales. Su característica principal es que permite un flujo de agua eficiente y es especialmente útil en áreas donde se necesita una mayor capacidad de carga en dirección lateral, aparte de ser adecuadas para puentes y carreteras.

**Figura 5.** Ejemplo de alcantarilla tipo cajón o de sección rectangular



Nota. Adaptada de Midas Software (2025).

### **E. Geometrías (espesores mínimos)**

El espesor mínimo del muro para un box culvert es de 8 pulgadas, el espesor mínimo de losas con largos de 6 a 8 pies es de 8 pulgadas. El espesor mínimo de la losa de techo es de 9 pulgadas y el espesor mínimo para la losa de contrapiso con largos mayores a 8 pies es de 10 pulgadas.

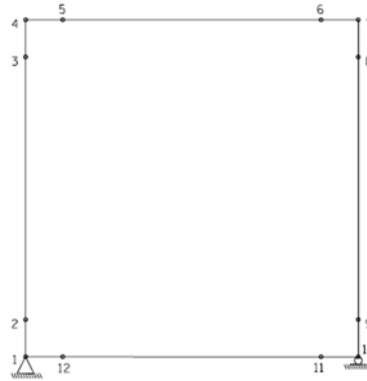
El espesor de la losa y los muros puede incrementarse si el cortante lo requiere o si el porcentaje máximo de acero es excedido. La distancia estándar de Box culverts entre el muro y la losa en la parte posterior tienen tanto 12 pulgadas tanto vertical como horizontal. HUFF, T. (2024).

### **F. Análisis estructural**

Existen varios métodos que pueden ser utilizados para modelar las alcantarillas tipo cajón. Según el Departamento de transporte de Minnesota “MnDOT” recomienda utilizar un plano bidimensional (2D) para análisis.

En el modelo se asume que existe un soporte fijo en un extremo y en el extremo contrario un soporte móvil o soporte de “rodillo”. Aparte se asume que la estructura se encuentra en equilibrio así que las reacciones sobre las cargas externas se toman como fuerzas iguales y opuestas.

**Figura 6.** Modelo bidimensional para análisis estructural



Nota. Adaptada de HUFF, T (2024).

### G. Concreto reforzado

El concreto reforzado es la combinación de concreto con acero en el cual el refuerzo de acero proporciona la resistencia a tensión que carece el concreto, aunque de igual forma el acero también tiene buenas características de resistencia a la compresión. (Harmsen, T. E ,2005).

El concreto es una mezcla de arena, grava, roca triturada, cemento y agua. En algunas ocasiones se puede agregar aditivos para modificar algunas características de la mezcla como la ductilidad, durabilidad o el tiempo de fraguado. Las características principales del concreto son su alta resistencia a la compresión y su baja resistencia a la tensión.

Como propiedades principales del concreto reforzado tenemos la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) se determina por medio de pruebas a la falla de cilindros de concreto de 12 pulgadas de altura por 6 pulgadas de diámetro, los cuales deben mantenerse sumergidos en agua durante 28 días para llegar a la resistencia de pruebas que debe cumplir el concreto. La mayoría de concretos implementados en la práctica poseen una resistencia entre 3,000 psi y 7,000 psi.

Para aplicaciones más comunes se utilizan concretos de 3,000 y 4,000 lb/in<sup>2</sup> mientras que en la construcción presforzada se utilizan concreto de 5,000 y 6,000 lb/in<sup>2</sup>. Para asegurar una resistencia a la compresión específica debe ser al menos igual al valor de diseño  $f'_c$ , el diseño de la mezcla de concreto debe intentar alcanzar un valor superior para mantener la calidad de la resistencia a compresión. (McCormac & Brown, 2017)

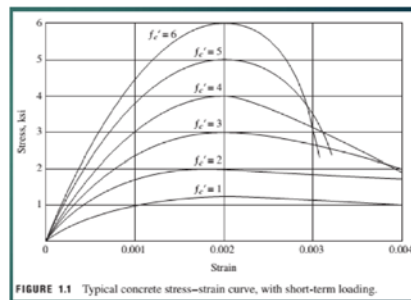
**Figura 7.** Testigos de concreto



Nota. Adaptada de Instituto de concreto Chile (2025).

Las curvas de esfuerzo-deformación unitaria que se muestran en la figura 6 muestran los resultados obtenidos en las pruebas de compresión que se realizan a los testigos, estas pruebas de compresión son para resistencias variables a los 28 días.

**Figura 8.** Curvas de esfuerzo-deformación



Nota. Adaptada de McCormac & Brown (2017)

Las curvas son aproximadamente rectas mientras la carga crece de cero a 1/3 a 1/2 de la resistencia última del concreto, como se puede observar en la figura 6, muestra el comportamiento no-lineal del concreto y este comportamiento genera algunos problemas de análisis estructural ya que su comportamiento bajo esfuerzos mayores. Todos los concretos sin importar sus resistencias ultimas bajo deformaciones unitarias de aproximadamente 0.002. El concreto no tiene una resistencia a la fluencia plástica definida, las curvas se comportan hasta puntos de ruptura bajo deformaciones unitarias entre 0.003 y 0.004.

Las ventajas del concreto reforzado son muchas gracias a su naturaleza y maleabilidad se pueden aplicar a todo tipo de formas y estructuras como por ejemplo edificios, puentes, pavimentos, presas, muros de retención, túneles, instalaciones de drenajes, tanques y muchos otros. (McCormac & Brown, 2017)

El acero de refuerzo que se utiliza en estructuras de concreto puede ser en forma de varillas o de mala soldada de alambre. Las varillas pueden ser tanto lisas como corrugadas las cuales tienen protuberancias en la superficie para lograr aumentar la adherencia entre el concreto y el acero.

Las varillas corrugadas son redondas y varían de tamaños desde el #3 hasta el #11, estos “#” coinciden con el diámetro de la varilla en octavos de pulgada, por ejemplo, la #3 es igual a la varilla de 3/8.

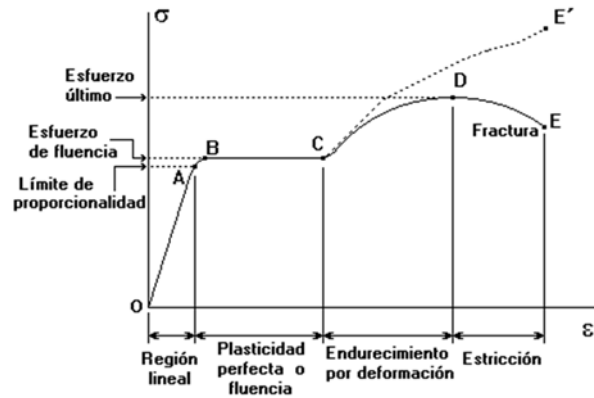
**Tabla 5.** Listado de varillas y sus características.

<b>TABLE A.2</b> Designations, Areas, Perimeters, and Weights of Standard Bars			
<b>Bar No.</b>	<b>U.S. Customary Units</b>		
	<b>Diameter (in.)</b>	<b>Cross-Sectional Area (in.<sup>2</sup>)</b>	<b>Unit Weight (lb/ft)</b>
3	0.375	0.11	0.376
4	0.500	0.20	0.668
5	0.625	0.31	1.043
6	0.750	0.44	1.502
7	0.875	0.60	2.044
8	1.000	0.79	2.670
9	1.128	1.00	3.400
10	1.270	1.27	4.303
11	1.410	1.56	5.313
14	1.693	2.25	7.650
18	2.257	4.00	13.600

Nota. Adaptada de McCormac & Brown (2017)

Por otra parte, el acero de refuerzo se clasifica también en termino de grados, estos aceros están disponibles en distintos grados como el grado 50 o el grado 60. Los grados significan que el acero tiene un punto de fluencia específico de 50,000 lb/in<sup>2</sup> y el grado 60 significa que tiene 60,000 lb/in<sup>2</sup>.

**Figura 9.** Esfuerzo ultimo y esfuerzo de fluencia.



Nota. Adaptada de McCormac & Brown (2017)

**Figura 10.** Varillas de acero rugoso



Nota. Adaptada de Construproductos (2021)

## H. Ventajas y desventajas del concreto reforzado

El concreto reforzado tiene una gran variedad de ventajas como por ejemplo una alta resistencia a la compresión, resistencia a la acción del fuego y del agua, alta rigidez, poco mantenimiento, larga vida útil sin que las capacidades de carga disminuyan, es más económico que otros tipos de material estructural y tiene una mano de obra de baja calificación para su fabricación.

Por otra parte, las desventajas más marcadas del concreto reforzado serían la baja resistencia a la tensión como se había mencionado con anterioridad, el uso de formaleta para mantener la posición hasta que endurezca, obra falsa, baja resistencia por unidad de peso, es una mezcla no homogénea ya que sus prioridades pueden variar ampliamente debido al proceso de fabricación y por último contracción y fluencia plástica.

## **I. Muros de contención**

Los muros de contención o retención se utilizan comúnmente en situaciones donde existe algún cambio brusco en la topografía como una pendiente en el terreno. Uno de los usos más comunes se da en carreteras y autopistas donde se requieren cortes o rellenos para poder ser construidas. (McCormac & Brown, 2017)

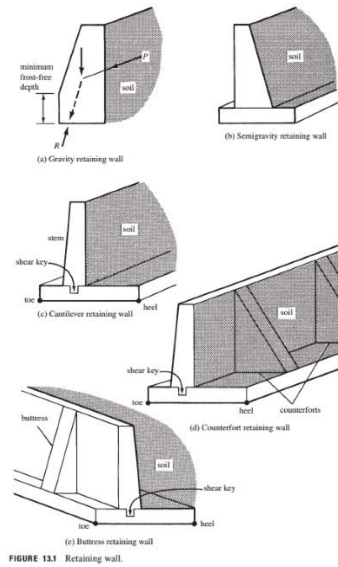
Existen varios tipos de muros de contención utilizados en Guatemala, uno de los más comunes y efectivos son los muros de gravedad que contienen la tierra trabajando únicamente con su peso propio, suelen tener una altura de entre 10 hasta 12 pies y generalmente son de concreto simple (sin refuerzo) pero también pueden ser fabricados con piedra o con mampostería.

Aparte de los muros de gravedad también están los muros de semi gravedad cuyo comportamiento se ubica entre un muro de gravedad y uno en voladizo, la estabilidad de este tipo de muro depende de su peso propio, pero también del suelo de relleno que se encuentre sobre este.

Los muros en voladizo son un cuerpo vertical que sostiene la tierra y se mantiene en posición con el uso de una zapata o losa base (cimiento). Debido a su función en voladizo el espesor del muro puede variar y aumentar de forma muy rápida dependiendo del incremento de la altura del muro, una de las ventajas que presenta es que se le puede dar más altura que a un muro de gravedad ya que la altura de estos oscila entre 10 a 25 pies.

La figura 10 muestra los distintos tipos de muros de contención que existen actualmente. A continuación, se muestran los nombres relacionados con las figuras: Figura (a) Muro de gravedad, Figura (b) muro de semi-gravedad, Figura (c) muro en voladizo, Figura (d) Muro con estribos y Figura (e) muro con contrafuertes.

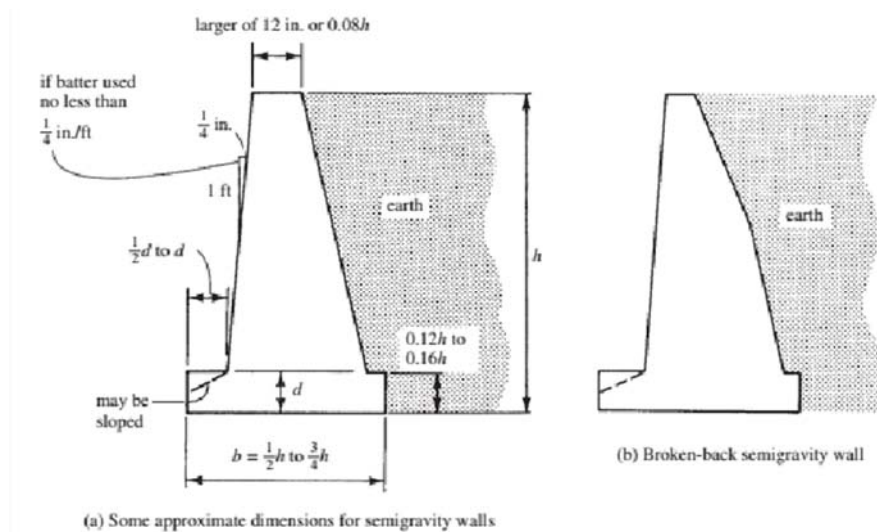
**Figura 11.** Distintos muros de contención



Nota. Adaptada de McCormac & Brown (2017)

Por último, para fines de diseño en muros de gravedad se puede utilizar dimensiones aproximadas que permiten un diseño aproximado. Si las dimensiones iniciales no cumplen los chequeos de deslizamiento y volteo se deberá cambiar las dimensiones iniciales hasta cumplir con ambos requisitos. En la figura 11 se puede observar las dimensiones aproximadas para realizar dicho diseño.

**Figura 12.** Sección de muro por gravedad



**FIGURE 13.8** Semigravity retaining walls.

Nota. Adaptada de McCormac & Brown (2017).

## J. Factores de carga

Los factores de carga se utilizan para aumentar las cargas estimadas aplicadas a las estructuras normalmente suelen ser mayores a 1. Las cargas se incrementan con el objetivo de tomar en cuenta las posibles incertidumbres que estén relacionadas durante el proceso de estimación de las magnitudes en consideración. (McCormac & Brown, 2017)

El motivo de lo hablado con anterioridad es que las cargas muertas se pueden estimar con mayor exactitud que el resto de las cargas ya que las magnitudes de las cargas que permanecen en una misma posición por un largo periodo de tiempo son menos variables que las cargas aplicadas a una estructura por un periodo breve de tiempo como suele suceder en un evento inesperado como un sismo o una carga de viento.

**Tabla 6.** Combinaciones y factores de carga

Table 3.4.1-1—Load Combinations and Load Factors

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use One of These at a Time				
										EQ	BL	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	$\gamma_p$	1.75	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Strength II	$\gamma_p$	1.35	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Strength III	$\gamma_p$	—	1.00	1.00	—	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Strength IV	$\gamma_p$	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	—	—	—	—	—	—
Strength V	$\gamma_p$	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Extreme Event I	1.00	$\gamma_{EQ}$	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—	—
Extreme Event II	1.00	0.50	1.00	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Service II	1.00	1.30	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	—	—	—	—	—	—	—
Service III	1.00	$\gamma_{LL}$	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—	—
Service IV	1.00	—	1.00	1.00	—	1.00	1.00/1.20	—	1.00	—	—	—	—	—
Fatigue I— LL, IM & CE only	—	1.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue II— LL, IM & CE only	—	0.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Nota. Adaptada de AASHTO LRFD (2018)

Las combinaciones y factores de carga también cuentan con factores de reducción de resistencia o factor resistente ( $\Phi$ ) el cual representa una reducción de la capacidad de un miembro para soportar una carga, este tipo de factor  $\Phi$  toma en cuenta probabilidades de resistencias menores supuestas a variaciones de materiales y dimensiones, imprecisiones de diseño y grados de ductilidad del acero, existen varios tipos de factores de reducción de resistencia como se muestran en la siguiente figura extraída del ACI 318-19:

**Tabla 7.** Factores de reducción de resistencia

Tipo de resistencia	Descripción	$\phi$ (phi)
<b>Flexión (concreto reforzado)</b>	Secciones controladas por tracción	<b>0.9</b>
<b>Corte (concreto reforzado)</b>	Incluye capacidad del concreto y del refuerzo	<b>0.9</b>
<b>Compresión axial (columnas)</b>	Elementos confinados con estribos	<b>0.75</b>
	Elementos no confinados adecuadamente	<b>0.7</b>
<b>Fuerza axial con flexión (P-M)</b>	Combinado, depende de la relación entre carga axial y momento	<b>0.75 – 0.90</b>
<b>Corte por punzonamiento (losas)</b>	En conexiones de losas o zapatas	<b>0.75</b>
<b>Tensión (acero de refuerzo)</b>	Refuerzo a tracción	<b>1</b>
<b>Adherencia/deslizamiento (bond)</b>	Anclaje de refuerzo o desarrollo	<b>0.8</b>
<b>Corte por fricción</b>	En juntas de concreto (por fricción)	<b>0.9</b>
<b>Refuerzo a cortante (acero)</b>	Refuerzo longitudinal o estribos	<b>1.00</b> (en acero)
<b>Capacidad de carga del suelo (geotecnia)</b>	Para fundaciones	<b>0.75 – 0.90</b> (varía por tipo de análisis)

Nota. Adaptada de AASHTO LRFD (2018).

## K. Mecánica de suelos

La mecánica de suelos es una rama de la ingeniería civil que se enfoca en el estudio de las propiedades y el comportamiento de los suelos y su relación con las estructuras y cimentaciones. Su objetivo principal es entender cómo los suelos interactúan con las cargas aplicadas y cómo afectan la estabilidad y el rendimiento de las estructuras.

Algunos de los conceptos básicos de la mecánica de suelos son por ejemplo la composición del suelo ya que los suelos están compuestos por partículas minerales, materia orgánica, agua y aire y cada una de estas partículas tiene una proporción y distribución distinta lo cual hace que no todos los suelos sean iguales. (Torralbo, 2017)

### 1. Tipo de suelos

Los suelos se clasifican en función de sus propiedades, como la granulometría que es el tamaño del grano, la plasticidad y la cohesión.

Los suelos cohesivos que se caracterizan por su capacidad de retener agua y su tendencia a adquirir cohesión cuando están saturados de agua. Estos suelos

están compuestos principalmente de partículas de arcilla y limo. Los suelos cohesivos son plásticos lo que significa que pueden ser moldeados o deformados sin romperse cuando están húmedos (Torralbo, 2017).

Aparte tienen la característica de contraerse y expandirse; pueden experimentar contracción cuando se secan y expansión cuando se saturan. Esta expansión y contracción puede causar daños a las estructuras que se asientan sobre estos suelos, lo que a menudo requiere medidas de mitigación, como compactación y drenaje adecuados.

Los suelos no cohesivos, también conocidos como suelos granulares, son aquellos que carecen de cohesión y no retienen agua de manera significativa. Estos están compuestos principalmente de partículas más grandes, como arena y grava, y presentan propiedades diferentes a las de los suelos cohesivos. Debido a su textura más permeable, los suelos no cohesivos permiten que el agua pase de manera eficiente. Esto significa que no retienen el agua; en lugar de eso, permiten que se filtre rápidamente, lo que los hace adecuados para sistemas de drenaje y filtración (Villalaz, 2007).

#### **L. Peso propio**

La losa superior debe ser autoportante. Esto quiere decir que debe soportar su peso propio, aunque para este análisis no se toma en consideración la compresión en el eje “x” del peso propio de la losa superior y de los muros. El peso de la losa superior, muros y albanegas es dirigido hacia la losa de contrapiso o losa inferior como una reacción contraria y equivalente a la presión uniforme que ejerce el suelo sobre la losa de contrapiso. Por último, el peso propio de la losa de contrapiso no se tomará en consideración para el modelo, ya que se asume que la resiste directamente el suelo.

#### **M. Cargas verticales de suelo (EV)**

La altura de relleno de diseño se mide desde la superficie superior de la losa superior hasta la parte superior de la carretera o relleno. La altura de relleno de diseño se indica con las variables H o DE dependiendo de la ecuación a utilizar.

Las cargas verticales de la tierra se refieren a las cargas del suelo y del pavimento por encima del paso de agua y en regiones adyacentes ligeramente fuera del tramo del paso de agua basado en el factor de interacción suelo-estructura. Se asume que

las paredes del paso de agua son sin fricción, por lo que no se considera componente vertical de la fuerza resultante horizontal de la tierra.

El factor de interacción suelo-estructura ( $F_e$ ) se utiliza para ajustar la carga vertical de la tierra llevada por el paso de agua. Se pretende aproximar los efectos de arqueamiento de parte del suelo de la sobrecarga a regiones adyacentes ligeramente fuera del tramo del paso de agua y tener en cuenta las condiciones de instalación.

Según AASHTO LRFD 2018 Sección 12.11.2.2-2 El factor  $F_e$  se indica en la siguiente ecuación:

$$F_e = 1 + 0.20 * \frac{H}{B_c}$$

Nota:

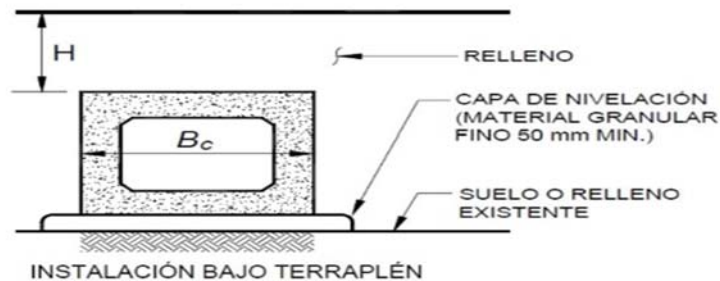
H= Altura del relleno (ft)

B<sub>c</sub>= Grosor externo de la alcantarilla tipo cajon (ft)

$F_e$  no deberá de exceder el valor de 1.15 para instalaciones con relleno compactado en los laterales de la sección del box culvert y no deberá de exceder el valor de 1.40 para instalaciones sin relleno compactado en los laterales de la sección.

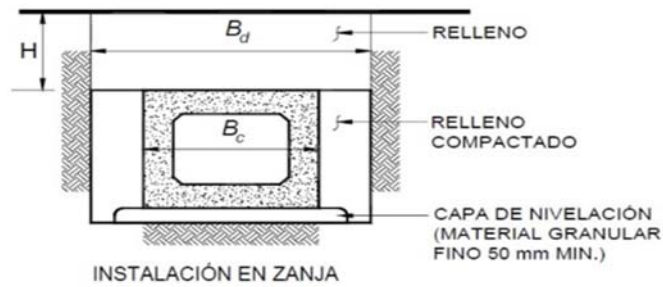
Los pasos de agua colocados en condiciones de zanja necesitan llevar menos carga vertical que aquellos construidos en condiciones de terraplén, porque el material consolidado en las paredes adyacentes de la zanja típicamente es más rígido que el material nuevo del terraplén. Se asume de forma conservadora que los pasos de agua se instalan en condiciones de terraplén.

**Figura 13.** Instalación debajo de terraplén



Nota. Adaptado de AASHTO LRFD (2018)

**Figura 14.** Instalación en zanja



Nota. Adaptada de AASHTO LRFD (2018)

## N. Cargas horizontales de suelo (EH)

Las cargas horizontales de suelo (EH) según sección 3.11.5 de AASHTO LRFD 2018 pueden ser asumidas como linealmente proporcionales a la profundidad del espacio de tierra excavado. Como resultado de la fuerza lateral del suelo debido a el peso del relleno como muestra la figura 14, se puede asumir que el relleno actúa a  $H/3$  de la altura por encima de la base del muro, donde  $H$  es la altura total de muro, medida desde la superficie del suelo pegado al muro hasta la parte superior del nivel de suelo.

**Figura 15.** Variables para la presión activa de suelo

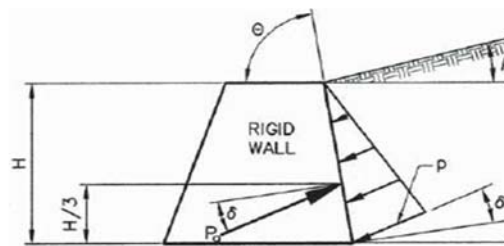


Figure 3.11.5.3-1—Notation for Coulomb Active Earth Pressure

Nota. Adaptada de AASHTO LRFD (2018)

Para las Cargas Horizontales de suelo se utiliza el método del fluido equivalente el cual dicta que para estimar el empuje lateral sobre un muro la presión de fluido equivalente es una simplificación de la carga lateral que ejerce el suelo sobre un muro de contención.

Este método deberá ser únicamente utilizado cuando cuenta con una vía de drenaje libre, también cabe resaltar que los valores de los pesos de los fluidos

equivalentes están dados para muros que pueden tolerar muy poco movimiento tanto como 1 pulgada cada 20 pies.

Según artículo 3.11.5.2-2 de AASHTO LRFD 2018 Gracias al método el fluido equivalente podemos dictar que tomando  $k_o * \gamma_s$  donde:

$$k_o = 1 - \text{sen}(\theta'f) = 1 - (\text{sen}(30)) = 0.5$$

La resultante de la carga horizontal de suelo se asume que actúa perpendicular a los muros de la estructura por lo que para efectos máximos se utiliza un factor de mayoramiento de 1.35 y un límite de carga de servicio de 1.

Para efectos mínimos de fuerza, se determina una condición de presión de suelo sumergido actuando sobre los muros de la estructura solo como  $\frac{1}{2}$  del peso del suelo actuando sobre la parte exterior de los muros. Se utilizará un límite de factor de carga de 0.9 y un factor de carga de servicio de 1 igualmente.

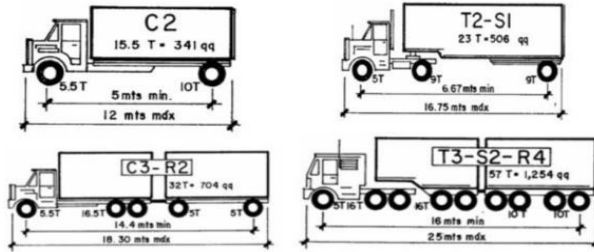
## **O. Cargas vivas vehiculares**

Las cargas vivas vehiculares forman una parte muy importante para el diseño estructural de las alcantarillas tipo cajón ya que estas cargas dependiendo del vehículo de diseño, carriles y distribución de las cargas que generan los esfuerzos que la estructura deberá soportar, ya que los vehículos en movimiento generan cargas dinámicas y cíclicas que pueden afectar la integridad de la estructura con el tiempo.

Comúnmente se describen en términos de cargas por eje, que indican la fuerza ejercida por un solo eje de un vehículo en movimiento. Estas cargas se utilizan para calcular las reacciones en los apoyos del puente o la estructura. (Huff, 2022)

Las cargas vivas vehiculares cíclicas pueden contribuir a la fatiga estructural, que puede afectar la vida útil de la estructura. Es importante realizar análisis de fatiga para determinar cómo estas cargas afectarán la integridad de la estructura a lo largo del tiempo. (Sivakumar, 2007)

**Figura 16.** Tipos de vehículos y su nomenclatura



Nota. Adaptada de Ministerio de comunicaciones infraestructura y vivienda de Guatemala (2010).

Para el diseño se utiliza el método de franja aproximada, con la franja de diseño de un pie de ancho orientada paralelamente al vano. Las cargas vivas de diseño aplicadas a las losas superiores incluyen el camión HL-93 y las cargas tándem para cualquier longitud de vano. Para vanos de 15 pies o superiores, también se aplican cargas de carril a las losas superiores.

La carga de diseño para el carril consiste en una carga de 0.64 kilogramos\*fuerza uniformemente distribuida sobre un área de 1 pie (paralela al vano del paso) por 10 pies de longitud perpendicular al vano del paso. El camión de diseño esta dividido en ejes los cuales distribuyen las cargas las cuales se muestran en la figura 18, según AASHTO LRFD 2018 artículos 3.6.1.3.1. y 3.6.1.4.1 el espaciamiento entre los dos ejes de 32 kip puede variar entre 14 hasta 30 pies para producir efectos de fuerzas mayores.

**Figura 17.** Características del camión de diseño

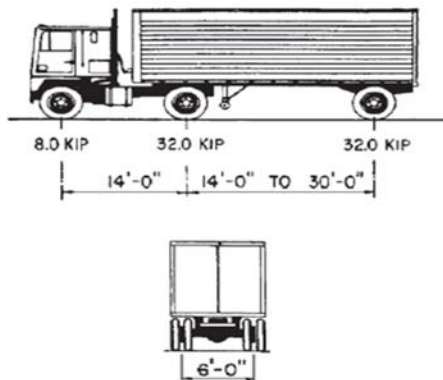


Figure 3.6.1.2.2-1—Characteristics of the Design Truck

Nota. Adaptada de AASHTO LRFD (2018).

Se asume que el área de contacto de la llanta de una rueda que consta de uno o dos neumáticos es un rectángulo, cuyo ancho es de 20 pulgadas y cuya longitud es de 10 pulgadas. Se supone que la presión de los neumáticos se distribuye uniformemente sobre el área de contacto rectangular en superficies continuas.

Según el artículo 3.6.2.2 de AASHTO LRFD 2018 La carga dinámica para pasos de agua y otras estructuras enterradas se reduce en función de la profundidad del relleno sobre el paso de agua. AASHTO LRFD requiere que se considere la carga dinámica para alturas de relleno de hasta 8 pies. La ecuación para calcular la asignación de carga dinámica es la siguiente:

$$IM = 33 * (1.0 - 0.125 * D_E) \geq 0\%$$

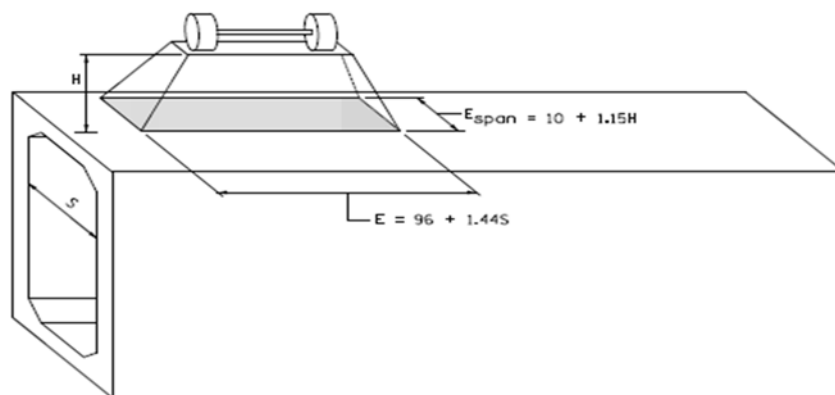
Nota:

$D_E =$  Profundidad mínima de cobertura de tierra sobre la estructura (ft)

#### P. Cargas vivas vehiculares para rellenos de 2 pies o inferiores

La mayoría de las alcantarillas tipo cajón se diseñan asumiendo que el tráfico viaja paralelo al vano. En ese escenario, cuando la profundidad de relleno medida desde la parte superior de la carretera o el relleno hasta la parte superior de la losa superior es inferior a 2 pies, se distribuyen las cargas del camión de diseño o las cargas tándem de diseño según AASHTO 4.6.2.10.2 (Caso 1: Tráfico Viaja Paralelo al Vano). Si el tráfico viaja perpendicular al vano, diseñe según AASHTO 4.6.2.1.

**Figura 18.** Trafico transitando en paralelo con el vano



**Nota.** Adaptada de AASHTO LRFD (2018).

Las cargas axiales del transporte se consideran uniformemente distribuidas sobre un área rectangular igual a  $E * E_{span}$ , como se puede observar en la Figura 6 con las siguientes ecuaciones:

$$E = 96 + 1.44 * S$$
$$E_{span} = L_T + LLDF * H$$

Nota:

E= Distribución equivalente del ancho perpendicular al vano (in)

S= Ancho del vano (ft)

$E_{span}$  = Distribucion equivalente del largo perpendicular al vano (in)

$L_T$  = Longitud del area de contacto de la llanta paralela al vano (in)

LLDF=1.15\* Factor de distribución de carga viva a través del relleno o altura de relleno

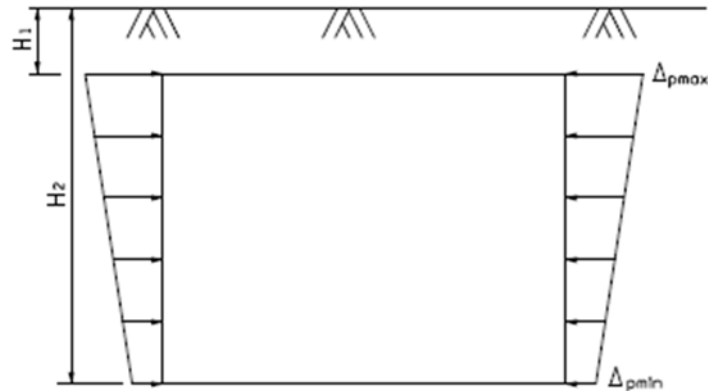
H= Altura de relleno de la parte superior de la losa a la parte superior del pavimento (in)

#### **Q. Sobrecarga de carga viva (vehículos en aproximación)**

AASHTO requiere que se aplique una sobrecarga de carga viva donde se espera que la carga vehicular actúe sobre la superficie del relleno dentro de una distancia igual a la mitad de la altura del muro detrás de la cara posterior del muro. Según el Departamento de transporte de Minnesota “MnDOT” se utiliza una forma modificada del Artículo 3.11.6.4 de AASHTO para calcular la carga del vehículo aproximándose.

Se asume una distribución de presión trapezoidal con la presión máxima en la parte superior de la losa y la presión mínima en la parte inferior de la losa. La sobrecarga de carga viva solo se aplica a una pared del paso de caja. Para simplificar el análisis, “MnDOT” aplica una reacción igual y opuesta a la otra pared.

**Figura 19.** Sobrecarga de carga viva



Nota. Adaptada de HUFF, T (2024).

Esta metodología se aproxima más estrechamente a una distribución de carga con un coeficiente de presión lateral del suelo en reposo. Se utilizará AASHTO, Ecuación 3.11.6.4-1 para determinar las presiones horizontales de la tierra ( $p_{max}$  y  $p_{min}$ ) asumiendo un coeficiente activo de presión lateral del suelo ( $k_a = 0.33$ ) con la siguiente ecuación:

$$\Delta p = k_a * \gamma_s * h_{eq}$$

Nota:

$\Delta p$  = Presión horizontal del suelo debido a sobrecarga de carga viva en (ksf)

$k_a$  = Coeficiente de presión lateral del suelo

$\gamma_s$  = Peso total del suelo

$h_{eq}$  = Altura equivalente del suelo para carga vehicular de tabla AASHTO 3.11.6.4 – 1

Para calcular  $p_{min}$ , determinar  $h_{eq}$  basado en la distancia desde la parte superior de la losa superior hasta la parte superior del pavimento o suelo de relleno ( $H_1$ ). Para calcular  $p_{max}$ , determinar  $h_{eq}$  basado en la distancia desde la parte inferior de la losa inferior hasta la parte superior del pavimento o relleno ( $H_2$ ). Utilizar interpolación lineal para alturas intermedias.

## **R. SAP2000 en el diseño de alcantarillas**

### **1. Características Generales de SAP2000**

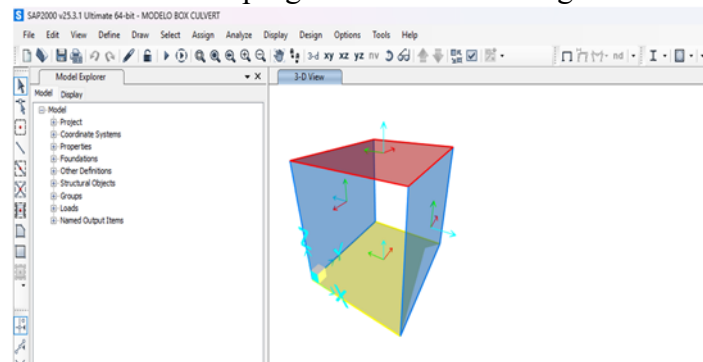
SAP2000 V.25 es un programa de análisis estructural que permite la modelización de estructuras tridimensionales complejas mediante elementos finitos. Sus principales características incluyen:

Interfaz Gráfica de Usuario: ofrece una interfaz intuitiva que facilita la creación de modelos estructurales, la asignación de cargas, el análisis de resultados y la generación de reportes.

Métodos de Análisis: El software utiliza diferentes métodos de análisis, tales como el análisis estático lineal, análisis no lineal y dinámico, que permiten simular diversos tipos de carga y comportamiento estructural.

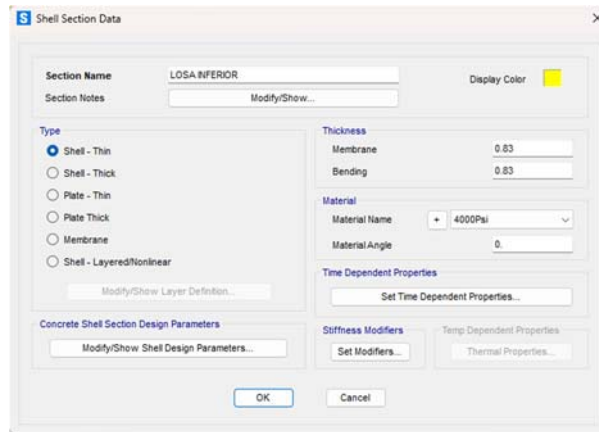
Diseño de Elementos: SAP2000 permite el diseño de distintos elementos estructurales como vigas, columnas, losas y cimentaciones, tanto para normas internacionales como para normas locales. (Computers and Structures, Inc. [CSI], 2019)

**Figura 20.** Interfaz de programa determinando geometrías



Nota. Elaboración propia

**Figura 21.** Interfaz de programa para determinar secciones y áreas



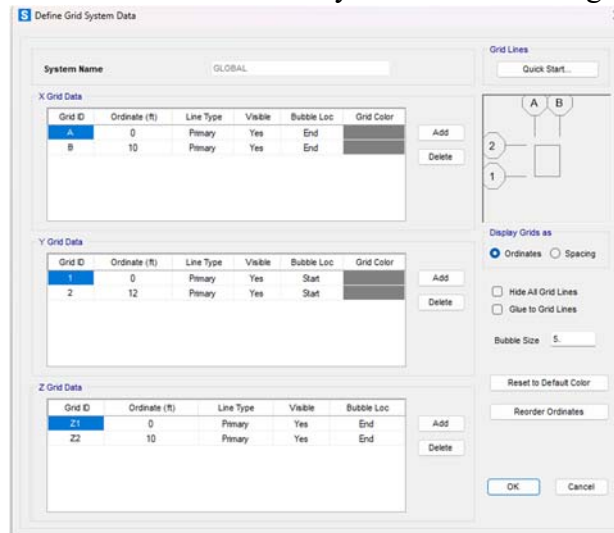
Nota. Elaboración propia

## 2. Modelado de la Alcantarilla en SAP2000

Para modelar una alcantarilla tipo cajón en SAP2000, se utiliza una combinación de elementos de placa y viga que representan las diferentes partes de la estructura, tales como las losas superior e inferior, los muros laterales y los refuerzos en las esquinas. El análisis de esta estructura puede realizarse bajo condiciones de carga estática o dinámica, dependiendo de los requisitos específicos del diseño.

Uno de los aspectos más relevantes del diseño estructural es la correcta aplicación de las cargas que actúan sobre la alcantarilla. Las cargas consideradas en el análisis son: Carga muerta (DC): Se refiere al peso propio de la estructura y los elementos permanentes. Carga viva (LL): Incluye el peso de los vehículos y el impacto vehicular que pasa sobre la alcantarilla. Presión hidrostática: Carga generada por el agua contenida en la alcantarilla. Empuje del suelo (EV): Fuerzas generadas por el relleno de tierra o el terreno circundante. Carga de impacto (IM): Relacionada con los efectos dinámicos de las cargas vivas. Con estas cargas, SAP2000 realiza el análisis estructural y genera los diagramas de momento y corte, los cuales son fundamentales para el diseño del refuerzo de acero. (McGuire, Gallagher, & Ziemian, 2000)

**Figura 22.** Dimensionamiento y características de grilla



Nota. Elaboración propia

# METODOLOGÍA

La presente investigación se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo y aplicado, ya que se basa en el análisis y diseño estructural de una alcantarilla tipo cajón prefabricada de concreto reforzado de dimensiones 10'x10', conforme a la normativa AASHTO LRFD 2018. El desarrollo metodológico se estructura en las siguientes etapas:

## **Fase 1: Revisión normativa y establecimiento de supuestos de diseño**

En esta primera etapa, se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la normativa AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2018), con énfasis en los capítulos y artículos que regulan el diseño estructural de alcantarillas tipo cajón prefabricadas de concreto reforzado. Esta revisión tiene como objetivo identificar los lineamientos técnicos y los criterios de diseño necesarios para garantizar que la estructura cumpla con los estándares de seguridad, funcionalidad y durabilidad requeridos para obras de infraestructura vial.

Durante esta fase se abordan aspectos clave relacionados con la clasificación de cargas que actúan sobre la alcantarilla, incluyendo las cargas muertas, representadas por el peso propio del concreto y del terreno de relleno; las cargas vivas, determinadas por el tránsito vehicular proyectado; las presiones hidrostáticas; la carga de impacto vehicular conforme a las disposiciones de la normativa.

A partir de la normativa se establecen los supuestos de diseño necesarios para el desarrollo del modelo estructural. Estos incluyen la profundidad de instalación de la alcantarilla, las condiciones de borde o empotramiento de los elementos estructurales. Asimismo, se determinan los factores de carga y de resistencia aplicables bajo el enfoque del diseño por estados límite (LRFD), los cuales serán empleados tanto en la evaluación de los estados límite de servicio como en los estados límite últimos. Esto permite establecer un diseño estructural balanceado que considere tanto la resistencia como la funcionalidad y durabilidad de la alcantarilla a lo largo de su vida útil.

Finalmente, se procede a la selección de materiales, definiendo las propiedades mecánicas del concreto y del acero de refuerzo a utilizar. Entre los parámetros considerados se encuentran la resistencia especificada del concreto ( $f'_c$ ), el límite de fluencia del acero ( $f_y$ ), el módulo de elasticidad, el peso volumétrico de los materiales y otros valores necesarios para el análisis estructural.

El producto final de esta fase es un documento base de criterios de diseño que sintetiza todos los parámetros normativos, geométricos y materiales adoptados. Este documento sirve como punto de partida para el desarrollo del modelo estructural en las fases posteriores del proyecto.

## **Fase 2: Modelado estructural de la alcantarilla tipo cajón en SAP2000**

Una vez definidos los supuestos de diseño y los parámetros normativos en la fase anterior, se procede a la construcción del modelo estructural de la alcantarilla tipo cajón prefabricada utilizando el software SAP2000.

Esta fase tiene como objetivo generar un modelo representativo que permita simular con precisión el comportamiento estructural del sistema ante las condiciones de carga definidas conforme a la normativa AASHTO LRFD 2018.

El proceso comienza con la definición de la geometría completa de la alcantarilla, incluyendo la losa superior, los muros laterales y la losa inferior. Esta representación tridimensional debe reflejar con exactitud la configuración estructural y sus dimensiones reales. A continuación, se asignarán las propiedades mecánicas de los materiales, incorporando los valores correspondientes a la resistencia especificada del concreto ( $f'c$ ), el módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ ), el peso específico del concreto, así como las propiedades del acero de refuerzo, incluyendo su resistencia a la fluencia ( $f_y$ ) y su módulo de elasticidad.

Posteriormente, se definirá un sistema de elementos finitos utilizando elementos tipo shell, los cuales permiten representar eficazmente los componentes planos de concreto y capturar con precisión los esfuerzos internos tales como momentos flectores, fuerzas cortantes y esfuerzos axiales

Una vez completado el modelo, se procederá a la aplicación de las combinaciones de carga contempladas en la normativa. Estas incluirán las cargas muertas asociadas al peso propio de la estructura y del relleno superior, las cargas vivas correspondientes a los vehículos de diseño bajo el esquema HL-93, la presión lateral del suelo derivada de las condiciones geotécnicas del emplazamiento y la presión hidrostática.

Con el modelo completo y las cargas aplicadas, se ejecutará el análisis estructural bajo los distintos estados límite, tanto últimos como de servicio. Como resultado de esta simulación, se obtendrán diagramas de momentos flectores, fuerzas cortantes y esfuerzos axiales en cada uno de los elementos del modelo. Estos resultados serán exportados y organizados adecuadamente, sirviendo como base para la fase siguiente, en la cual se analizarán las secciones críticas y se determinará la distribución de refuerzo necesaria para satisfacer los criterios de diseño estructura.

### **Fase 3: Análisis de Estados Límite y Evaluación del Desempeño Estructural**

En esta etapa, se procederá al análisis detallado de las solicitaciones internas obtenidas a partir del modelo estructural generado en SAP2000. El objetivo es interpretar y evaluar los esfuerzos máximos que actúan sobre la alcantarilla tipo cajón prefabricada bajo las diferentes combinaciones de carga definidas por la normativa AASHTO LRFD 2018, tanto en estado límite último (ELU) como en estado límite de servicio (ELS).

Extracción y organización de resultados: Se recopilarán los valores máximos de momento flector ( $M_u$ ), fuerza cortante ( $V_u$ ) y esfuerzo axial ( $P_u$ ) para cada componente estructural: losa superior, losa inferior y muros laterales. Estos resultados se documentarán en tablas.

Estado Límite Último (ELU): Se verificará que las solicitaciones máximas no excedan la resistencia nominal multiplicada por el factor de reducción ( $\phi$ ) de cada elemento, asegurando que la estructura tenga suficiente capacidad para resistir fallas por flexión, corte o compresión.

Estado Límite de Servicio (ELS): Se evaluará el comportamiento de la estructura ante cargas de servicio, verificando que las deformaciones, fisuración y tensiones se mantengan dentro de los límites permitidos para garantizar la funcionalidad y durabilidad de la alcantarilla.

Criterios de seguridad y desempeño: Se aplicarán los factores de carga y resistencia establecidos por AASHTO LRFD 2018 para cada combinación de carga. Se asegurará que el diseño cumpla con los niveles de seguridad estructural esperados durante su vida útil.

Preparación para el diseño del refuerzo: Finalmente, los resultados obtenidos en esta fase serán la base para el cálculo del área de acero necesaria en cada zona crítica. La información recopilada permitirá avanzar hacia el diseño detallado de la estructura, optimizando el uso de materiales y asegurando el cumplimiento normativo.

### **Fase 4: Desarrollo de Hoja de Cálculo para el Diseño Estructural en Mathcad**

Durante esta etapa se desarrollará una hoja de cálculo estructurada en el software Mathcad, con el objetivo de contar con una herramienta práctica y precisa que permita realizar el diseño estructural completo de alcantarillas tipo cajón prefabricadas de concreto reforzado, conforme a los lineamientos establecidos por la normativa AASHTO LRFD 2018.

La hoja de cálculo se diseñará para recibir como datos de entrada los esfuerzos obtenidos del análisis estructural realizado en SAP2000, tales como momento flector, fuerza cortante y cargas axiales. Estos valores servirán como base para calcular las demandas de diseño y verificar el cumplimiento de los distintos estados límite exigidos por la normativa.

A partir de estos datos, se procederá al dimensionamiento de los elementos estructurales que componen la alcantarilla. Se calcularán variables como la altura útil, el espesor total de los

elementos, el ancho efectivo de diseño y las resistencias nominales y de diseño para flexión, corte y compresión, aplicando las expresiones indicadas en la normativa. Esta etapa también incluirá el diseño del refuerzo de acero, determinando el área necesaria para resistir los esfuerzos aplicados. Se aplicarán criterios normativos para establecer la cantidad, tipo y espaciamiento de las varillas, de manera que se garantice la capacidad estructural, la durabilidad y la facilidad constructiva.

Además, se programarán chequeos automáticos que validarán el cumplimiento de requisitos normativos, tales como cobertura mínima de concreto, espaciamiento entre varillas, refuerzo mínimo requerido, entre otros. Estos chequeos permitirán identificar de forma inmediata si un diseño cumple o no con los criterios establecidos.

### **Fase 5: Diseño del Refuerzo y Generación de Detalles Constructivos**

Una vez definidos los esfuerzos internos a partir del análisis estructural y establecidos los requerimientos normativos mediante los cálculos realizados en la hoja de Mathcad, se procederá al diseño del refuerzo de acero para cada componente estructural de la alcantarilla tipo cajón prefabricada.

Este diseño se fundamentará en las solicitaciones máximas de momento flector, esfuerzo cortante y carga axial, evaluadas según los distintos estados límite de resistencia, servicio, fatiga y durabilidad establecidos por la normativa AASHTO LRFD 2018.

El proceso incluirá la selección del tipo y número de varillas de acero que proporcionen el área de refuerzo necesaria para resistir las solicitaciones, verificando que se cumplan los requisitos mínimos y máximos establecidos en cuanto a espaciamiento, recubrimiento y desarrollo del refuerzo, recubrimiento mínimo y el diámetro de las varillas.

A continuación, se elaborarán los detalles constructivos correspondientes utilizando el software AutoCAD. Estos planos incluirán la disposición del refuerzo longitudinal y transversal en cada uno de los elementos (losa superior, muros laterales, losa inferior, las dimensiones de los elementos estructurales. Asimismo, se indicarán especificaciones técnicas complementarias que orienten la fabricación y montaje de las piezas prefabricadas.

### **Fase 6: Validación del Diseño Estructural y Ajustes Finales**

Finalmente, se procederá a la validación del diseño estructural mediante la revisión de los cálculos y la comparación de los resultados con ejemplos de diseño previos proporcionados en la normativa y en la literatura técnica. En caso necesario, se realizarán ajustes en los diseños de refuerzo o geometría para optimizar la estructura y asegurar su desempeño a largo plazo.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis y discusión de los resultados están fundamentados en la teoría que se describió en el capítulo anterior de este documento. Para darle validez teórica al análisis y resultados conseguidos, se tomó como referencia el cálculo estructural de la alcantarilla tipo cajón prefabricada de concreto reforzado, realizado en el software SAP2000 y complementado con las fórmulas y directrices establecidas en la normativa AASHTO LRFD 2018.

En primer lugar, se modeló la estructura en SAP2000, simulando las solicitaciones de carga bajo diferentes escenarios. Los resultados obtenidos, como los diagramas de momentos, fuerzas cortantes y esfuerzos axiales, fueron evaluados y luego utilizados en Mathcad para el cálculo del refuerzo de acero necesario. En esta etapa, se determinaron las áreas de acero requeridas en cada sección crítica de la alcantarilla.

### A. Datos iniciales

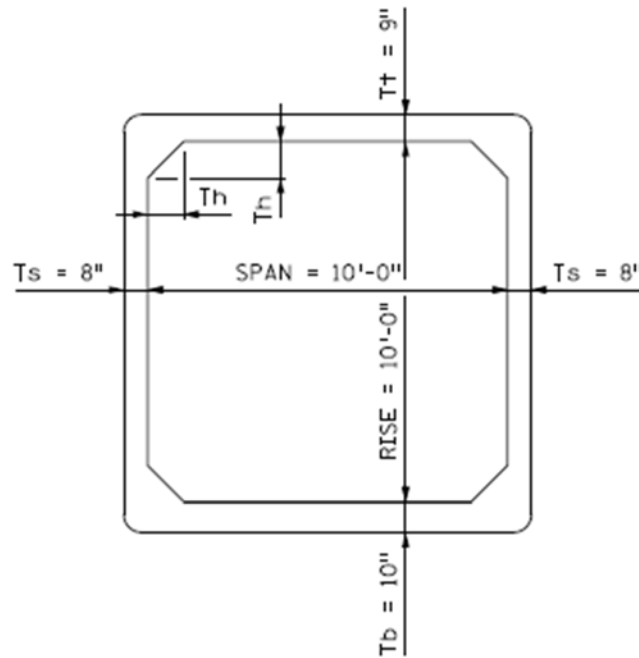
En esta primera etapa se establecieron los supuestos a utilizar para el análisis, con base a las medidas estándar de alcantarillas tipo cajón prefabricadas de concreto reforzado según LRFD BRIDGE DESIGN se definieron las dimensiones de la alcantarilla, pesos unitarios de los materiales, las propiedades del concreto reforzado y las propiedades del acero de refuerzo, por falta de un estudio de suelos se asumirán 0.12 kip/ft<sup>3</sup> como un suelo saturado de arenas y arcillas. Estos valores fueron fundamentales para garantizar que los cálculos fueran consistentes con las normativas AASHTO LRFD 2018.

**Tabla 8.** Datos Iniciales del modelo

Datos Iniciales	Unidades	
Peso Unitario del concreto reforzado	0.15	kip/ft <sup>3</sup>
Densidad del suelo saturado	0.12	kip/ft <sup>3</sup>
Densidad del agua	0.0624	kip/ft <sup>3</sup>
Altura del relleno superior	6	ft
Resistencia a la compresion del concreto reforzado	5	ksi
Ancho inteiror	10	ft
Altura interior	10	ft
Ancho de losa superior	0.75	ft
Ancho de losa inferior	0.83	ft
Ancho de muros	0.67	ft
Ancho de cartela	12	in
Modulo de elasticidad del acero	29000	ksi
Limite de fluencia del acero	60	ksi

Nota. Elaboración propia

**Figura 23.** Sección de la alcantarilla tipo cajón prefabricada a analizar



Nota. Elaboración propia

### **B. Cálculo de cargas muertas, cargas de suelo y cargas vivas**

Se calcularon las cargas muertas que incluyen el peso propio de la estructura de concreto reforzado y el peso del relleno. Estas cargas se tomaron como base para establecer las combinaciones de carga que afectan la alcantarilla. Además, se incluyó la presión de suelo vertical y horizontal como factores críticos en el diseño.

**Figura 24.** Cálculo de cargas muertas

**B) Cargas muertas**

El peso propio en la parte superior del box

$$DC_{top} := Tt \cdot \gamma_c \cdot w = 0.113 \frac{kip}{ft}$$

El peso propio total en la parte superior del box

$$DC_{top} := Tt \cdot \gamma_c \cdot w \cdot (SPAN + Ts) = 1.2 \text{ kip}$$

El peso propio en el muro del box

$$DC_{side} := Ts \cdot w \cdot \gamma_c \cdot \left( RISE + \frac{Tt}{2} + \frac{Tb}{2} \right) = 1.084 \text{ kip}$$

El peso propio de las 4 cartelas

$$DC_{haunch} := Th \cdot w \cdot Th \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma_c = 0.075 \text{ kip}$$

El peso propio aplicado a la losa de la parte inferior es igual a la suma de todas las cargas muertas

$$DC_{bottom} := (DC_{top} + 4 DC_{haunch} + 2 DC_{side}) \cdot \left( \frac{1}{SPAN + Ts} \right) = 0.344 \frac{kip}{ft}$$

Nota. Elaboración propia

**Tabla 9.** Resumen de cargas muertas aplicadas al modelo

Cargas Muertas	Unidades	
Peso propio de la parte superior	0.113	kip/ft
Peso propio total de la parte superior	1.2	kip
Peso propio de los muros	1.084	kip
Peso propio de las cartelas	0.075	kip
Peso propio aplicado a la losa inferior	0.344	kip/ft

Nota. Elaboracion propia

**Figura 25. Cálculo de presión de suelo**

**B) Cargas por presión de suelo**

El peso del relleno sobre la parte superior del box culvert genera una presión vertical de tierra (EV). La altura del relleno se mide desde la superficie superior de la losa superior hasta la parte superior del pavimento o del material de relleno. Según la Tabla 12.5.1, el peso unitario del relleno es de 0.120 kcf (kips por pie cúbico).

Segun AASHTO LRFD 2018

Table 12.5.1—Unit Weights

Material	Unit Weight (pcf)	
Aluminum Alloys	0.175	
Bituminous Wearing Surfaces	0.140	
Cast Iron	0.450	
Cinder Filling	0.060	
Compacted Sand, Silt, or Clay	0.120	
Concrete	Lightweight	0.110 to 0.135
	Normal Weight with $f'_c \leq 5.0$ ksi	0.145
	Normal Weight with $5.0 < f'_c \leq 15.0$ ksi	$0.140 + 0.001 f'_c$
Loose Sand, Silt, or Gravel	0.100	
Soft Clay	0.100	
Rolled Gravel, Macadam, or Ballast	0.140	
Steel	0.490	
Stone Masonry	0.170	
Wood	Hard	0.060
	Soft	0.050
Water	Fresh	0.0624
	Salt	0.0640
Item	Weight per Unit Length (kdf)	
Truss Rafters, Ties, and Fastening per Track	0.200	

$F_e$  shall not exceed 1.15 for installations with compacted fill along the sides of the box section, or 1.40 for installations with uncompacted fill along the sides of the box section.

For wide trench installations where the trench width exceeds the horizontal dimension of the culvert across the trench by more than 1.0 ft,  $F_e$  shall not exceed the value specified for an embankment installation.

El factor de interacción para condiciones de terraplén depende de la altura del relleno (H) y del ancho exterior de la caja (Bc).

$$F_e := 1 + 0.20 \cdot \left( \frac{H}{2 \cdot T_s + SPAN} \right) = 1.106$$

Nota. Elaboración propia

Figura 26. Cálculo de presión de suelo segunda parte

La presión vertical del suelo en la parte superior del box

$$EV := Fe \cdot \gamma_s \cdot H \cdot w = 0.796 \frac{kip}{ft}$$

La presión lateral de tierra (EH) que actúa sobre las paredes del box culvert se determina utilizando el método del fluido equivalente, una técnica comúnmente usada en ingeniería geotécnica y estructural para simplificar el análisis de empuje de tierras.

Se idealiza el empuje lateral del suelo como si fuera un fluido con un peso unitario constante, ejerciendo presión contra las paredes de la estructura en forma hidrostática (linealmente creciente con la profundidad).

Cuando el suelo no se ha desplazado ni compactado significativamente, se dice que está en "reposo", y se utilizan valores estándar del peso unitario equivalente del fluido:

$$\gamma_{max} := 0.060 \frac{kip}{ft^3} \quad \gamma_{min} := 0.030 \frac{kip}{ft^3}$$

En la parte superior del box la presión lateral del suelo es:

$$EH_{max} := \gamma_{max} \cdot H \cdot w = 0.36 \frac{kip}{ft}$$

$$EH_{min} := \gamma_{min} \cdot H \cdot w = 0.18 \frac{kip}{ft}$$

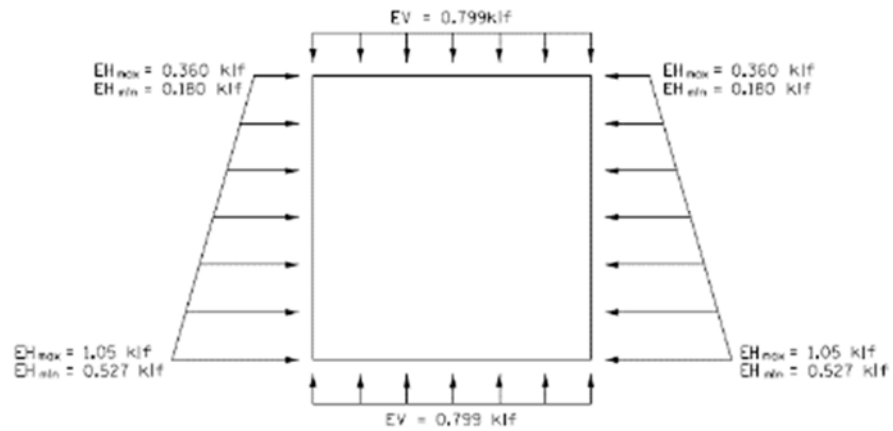
En la parte inferior del box la presión lateral del suelo es:

$$EHI_{max} := \gamma_{max} \cdot (H + Tt + RISE + Tb) \cdot w = 1.055 \frac{kip}{ft}$$

$$EHI_{min} := \gamma_{min} \cdot (H + Tt + RISE + Tb) \cdot w = 0.527 \frac{kip}{ft}$$

Nota. Elaboración propia

**Figura 27.** Cálculo de presión de suelo segunda parte



Nota. Elaboración propia

**Tabla 10.** Resumen de cargas verticales y horizontales del suelo

Cargas Verticales y horizontales de suelo	Unidades	
Presion vertical del suelo en la parte superior	0.796	kip/ft
Ehmax parte superior	0.36	kip/ft
Ehmin parte superior	0.18	kip/ft
Ehmax parte inferior	1.055	kip/ft
Ehmin parte inferior	0.527	kip/ft

Nota. Elaboración propia

Figura 28. Cálculo de sobrecarga viva lateral parte superior e inferior

$\phi_f := 30^\circ$  Angulo de fricción interna del relleno

$$k_a := \frac{1 - \sin(\phi_f)}{1 + \sin(\phi_f)} = 0.333 \quad \text{Coeficiente de presión activa del suelo de relleno}$$

La altura utilizada para el cálculo de la sobrecarga por carga viva en la parte superior del box culvert es la distancia desde la superficie superior de la losa superior hasta la parte superior del pavimento o del relleno.

$$H_{topculvert} := H = 6 \text{ ft}$$

Interpolando la tabla 3.11.6.4-1

$$h_{eq1} := 4 \text{ ft} - \left( \frac{H - 5 \text{ ft}}{RISE - 5 \text{ ft}} \right) (4 \text{ ft} - 3 \text{ ft}) = 3.8 \text{ ft}$$

La correspondiente sobrecarga lateral por carga viva en la parte superior del box culvert se expresa como:

$$LS_{top} := k_a \cdot \gamma_s \cdot h_{eq1} \cdot w = 0.152 \frac{\text{kip}}{\text{ft}}$$

La altura utilizada para el cálculo de la sobrecarga por carga viva en la parte inferior del box culvert es la distancia desde la superficie inferior de la losa inferior hasta la parte superior del pavimento o del relleno.

$$H_2 := H + Tt + RISE + Tb = 17.58 \text{ ft}$$

Interpolando la tabla 3.11.6.4-1

$$h_{eq2} := 3 \text{ ft} - \left( \frac{H_2 - RISE}{20 \text{ ft} - RISE} \right) (3 \text{ ft} - 2 \text{ ft}) = 2.242 \text{ ft}$$

La correspondiente sobrecarga lateral por carga viva en la parte inferior del box culvert se expresa como:

$$LS_{bottom} := k_a \cdot \gamma_s \cdot h_{eq2} \cdot w = 0.09 \frac{\text{kip}}{\text{ft}}$$

Table 3.11.6.4-1—Equivalent Height of Soil for Vehicular Loading on Abutments Perpendicular to Traffic

Abutment Height (ft)	$h_{eq}$ (ft)
5.0	4.0
10.0	3.0
$\geq 20.0$	2.0

Table 3.11.6.4-2—Equivalent Height of Soil for Vehicular Loading on Retaining Walls Parallel to Traffic

Retaining Wall Height (ft)	$h_{eq}$ (ft) Distance from wall backface to edge of traffic	
	0.0 ft	1.0 ft or Further
5.0	5.0	2.0
10.0	3.5	2.0
$\geq 20.0$	2.0	2.0

The load factor for both vertical and horizontal components of live load surcharge shall be taken as specified in Table 3.4.1-1 for live load surcharge.

Nota. Elaboración propia

**Tabla 11.** Resumen de sobrecargas vivas

Sobrecarga viva	Unidades	
Sobrecarga Viva Lateral en la parte superior	0.152	kip/ft
Sobrecarga Viva Lateral en la parte Inferior	0.09	kip/ft

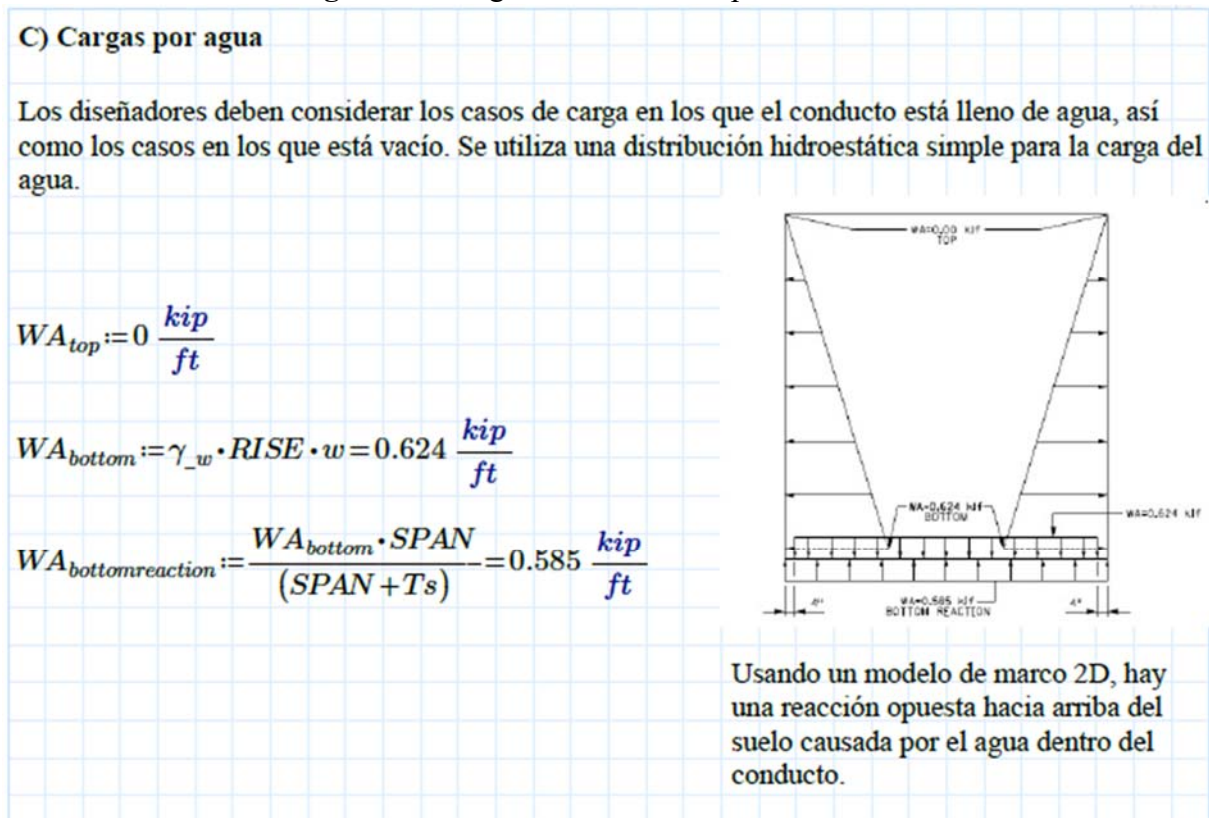
Nota. Elaboración propia

### C. Cálculo de cargas por agua

Se consideraron las cargas hidrostáticas generadas por el agua, las cuales fueron distribuidas según los principios de distribución hidrostática. Cabe señalar que no se analizó el flujo del agua en este diseño, por lo que solo se tomaron en cuenta las cargas estáticas generadas por la presión del agua sobre las paredes y losas de la alcantarilla.

Los diseñadores deben considerar los casos de carga en los que el conducto está lleno de agua, así como los casos en los que está vacío. Se utiliza una distribución hidrostática simple para la carga del agua.

**Figura 29.** Cargas Hidrostáticas aplicadas al modelo



Nota. Elaboración propia

## D. Cálculo de cargas dinámicas

Para simular las cargas dinámicas sobre la estructura, se utilizaron los modelos de carga HL-93 y el tándem. El tándem fue seleccionado específicamente para la simulación en el software SAP2000 debido a que el área del flujo en la alcantarilla era mayor que la capacidad estándar de los modelos AASHTO. Esta elección fue crucial para representar adecuadamente las cargas dinámicas vehiculares.

Utilizando las distancias entre las líneas de ruedas y los ejes, se pueden determinar las intensidades de carga viva en la parte superior del cajón. Para las cargas de camión y tándem, primero se determina el área de influencia o huella de la carga viva. Luego, se utiliza la suma de los pesos de las ruedas para determinar la intensidad de la carga viva.

Para determinar la carga viva, se utilizan factores de presencia múltiple (MPF, por sus siglas en inglés). Se utiliza un solo carril cargado con un MPF de 1.20 para los estados límite de resistencia y de servicio.

Figura 30. Cálculo de factor IM

**C) Cargas Dinámicas**

○ For top slabs of box culverts of all spans and for all other cases, including slab-type bridges where the span does not exceed 15.0 ft, only the axle loads of the design truck or design tandem of Articles 3.6.1.2.2 and 3.6.1.2.3, respectively, shall be applied.

**3.6.2.2—Barred Components**  
The dynamic load allowance for culverts and other buried structures covered by Section 12, in percent, shall be taken as:  
 $IM = 33(1.0 - 0.125D_s) \pm 0\%$  (3.6.2.2-1)  
where:  
 $D_s$  = the minimum depth of earth cover above the structure (ft)

**3.6.1.2—Design Vehicular Live Load**  
**3.6.1.2.1—General**  
Vehicular live loading on the roadway of bridges or incidental structures, designated HL-93, shall consist of a combination of the:  
• Design truck or design tandem, and  
• Design lane load.

**3.6.1.2.2—Design Truck**  
The weights and spacings of axles and wheels for the design truck shall be as specified in Figure 3.6.1.2.2-1. A dynamic load allowance shall be considered as specified in Article 3.6.2.  
Except as specified in Articles 3.6.1.3.1 and 3.6.1.4.1, the spacing between the two 32.0-kip axles shall be varied between 14.0 ft and 30.0 ft to produce extreme force effects.

**Table 3.6.1.1.2-1—Multiple Presence Factors,  $m$**

Number of Loaded Lanes	Multiple Presence Factors, $m$
1	1.20
2	1.00
3	0.85
>3	0.65

Utilizando las distancias entre las líneas de ruedas y los ejes, se pueden determinar las intensidades de carga viva en la parte superior del cajón. Para las cargas de camión y tándem, primero se determina el área de influencia o huella de la carga viva. Luego, se utiliza la suma de los pesos de las ruedas para determinar la intensidad de la carga viva. Para determinar la carga viva, se utilizan factores de presencia múltiple (MPF, por sus siglas en inglés). Se utiliza un solo carril cargado con un MPF de 1.20 para los estados límite de resistencia y de servicio.

$IM := 33 \left( 1 - 0.125 \cdot \frac{H}{ft} \right) = 8.25$

$\overline{IM} := 8.25\% \quad IM = 0.083$

Segun AASHTO LRFD 3.6.1.2.5 asumir que el area de contacto de cada llanta es de 20pulg de ancho por 10pulg de largo

Nota. Elaboración propia

### Figura 31. Cálculo de cargas vivas para el camión de diseño

Características del camión de diseño:

$P_w := 16 \text{ kip}$	Carga de rueda estándar
$MPF := 1.20$	Multiple presece factor tabla 3.6.1.1.2-1
$Axle_{spacing} := 6 \text{ ft}$	Espaciamiento de ejes
$L_{tire} := 0.83 \text{ ft}$	Largo de rueda estandar
$W_{tire} := 1.67 \text{ ft}$	Acho de rueda estandar
$LLDF := 1.15$	Live Load Distribution Factor

#### Uso de $P_w$ en la Tabla

- Para un camión de diseño HL-93, la carga de rueda estándar ( $P_w$ ) es de 16 kips (71.2 kN), porque cada eje trasero de 32 kips se divide en dos ruedas.
- Para una carga de carril, la carga de rueda ( $P_w$ ) es de 8 kips (35.6 kN).

Una configuración de eje de camión HL-93 individual produce una intensidad de carga viva de:

$$W := Axle_{spacing} + W_{tire} + LLDF \cdot H = 14.57 \text{ ft}$$

$$L := L_{tire} + LLDF \cdot H = 7.73 \text{ ft}$$

$$W_{LLIM} := \frac{2 \cdot P_w \cdot MPF \cdot (1 + IM)}{W \cdot L}$$

$$W_{LLIM} = 0.369 \frac{\text{kip}}{\text{ft}^2}$$

Table 3.6.1.2.6a-1—Live Load Distribution Factor (LLDF) for Buried Structures

Structure Type	LLDF Transverse or Parallel to Span
Concrete Pipe with fill depth 2.0 ft or greater	1.15 for diameter 2.0 ft or less
	1.75 for diameters 8.0 ft or greater
	Linearly interpolate for LLDF between these limits
All other culverts and buried structures	1.15

Nota. Elaboración propia

**Figura 32.** Cálculo de cargas vivas para configuración tándem

Mientras que una configuración de eje de un tandem produce una intensidad de carga viva de:

$$Axle_{spacingtandem} := 4 \text{ ft} \quad P_{wtandem} := 12.5 \text{ kip}$$

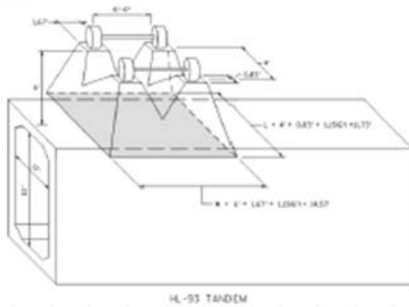
$$W_{tandem} := Axle_{spacing} + W_{tire} + LLDF \cdot H = 14.57 \text{ ft}$$

$$L_{tandem} := Axle_{spacingtandem} + L_{tire} + LLDF \cdot H = 11.73 \text{ ft}$$

$$W_{LLIM} := \frac{4 \cdot P_{wtandem} \cdot MPF \cdot (1 + IM) \cdot 1 \text{ ft}}{W_{tandem} \cdot L_{tandem}}$$

$$W_{LLIM} = 0.38 \frac{1}{m} \cdot m \cdot \frac{kip}{ft}$$

3.6.1.2.3—Design Tandem  
The design tandem shall consist of a pair of 25.0-kip axles spaced 4.0 ft apart. The transverse spacing of wheels shall be taken as 6.0 ft. A dynamic load allowance shall be considered as specified in Article 3.6.2.



Se comparan las intensidades de carga viva de las configuraciones de eje simple y eje tándem. Dado que la configuración de eje tándem produce una intensidad de carga viva ligeramente mayor que la de la configuración de eje simple, se utiliza la configuración de eje tándem para el diseño tanto en los estados límite de resistencia como de servicio.

$$Areatandem := W_{tandem} \cdot L_{tandem} = 170.906 \text{ ft}^2$$

Nota. Elaboración propia

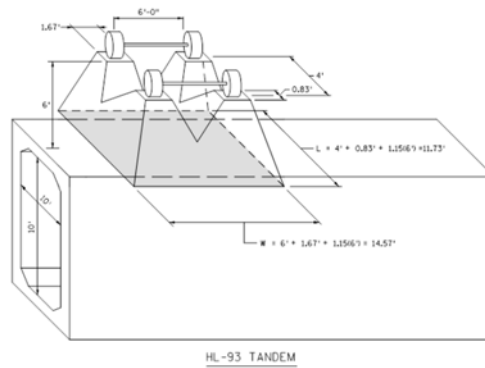
**Tabla 12. Resumen de cargas dinámicas**

Cargas Dinámicas	Unidades	
MPF	1.2	Adimensional
LLDF (Live Load Distribution Factor)	1.15	Adimensional
WLLIM de HL-93	0.369	kip/ft <sup>2</sup>
WLLIM de TANDEM	0.38	kip/ft <sup>2</sup>

Nota. Elaboración propia

Se comparan las intensidades de carga viva de las configuraciones de eje simple y eje tándem. Dado que la configuración de eje tándem produce una intensidad de carga viva ligeramente mayor que la de la configuración de eje simple, se utiliza la configuración de eje tándem para el diseño tanto en los estados límite de resistencia como de servicio.

**Figura 33.** Carga Viva producida por TANDEM

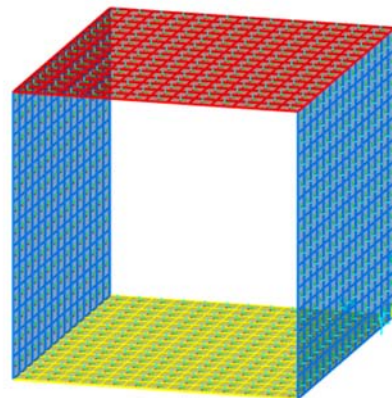


**Nota.** Adaptada de AASHTO LRFD (2018).

### E. Combinaciones de carga en SAP2000

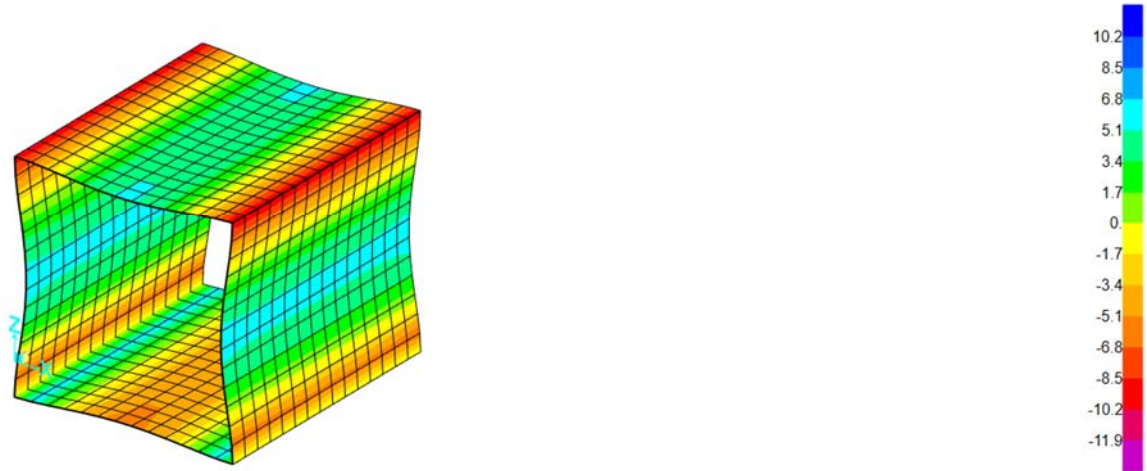
Con los valores de las cargas definidas, se ingresaron en el software SAP2000 para realizar el análisis estructural. Utilizando los estados límites y los estados de servicio 1, 2 y 3, se calcularon las combinaciones de carga, lo que permitió obtener los diagramas de momento, corte y carga axial que representan las sollicitaciones que afectan la estructura bajo diferentes condiciones.

**Figura 34.** Modelo de SAP2000



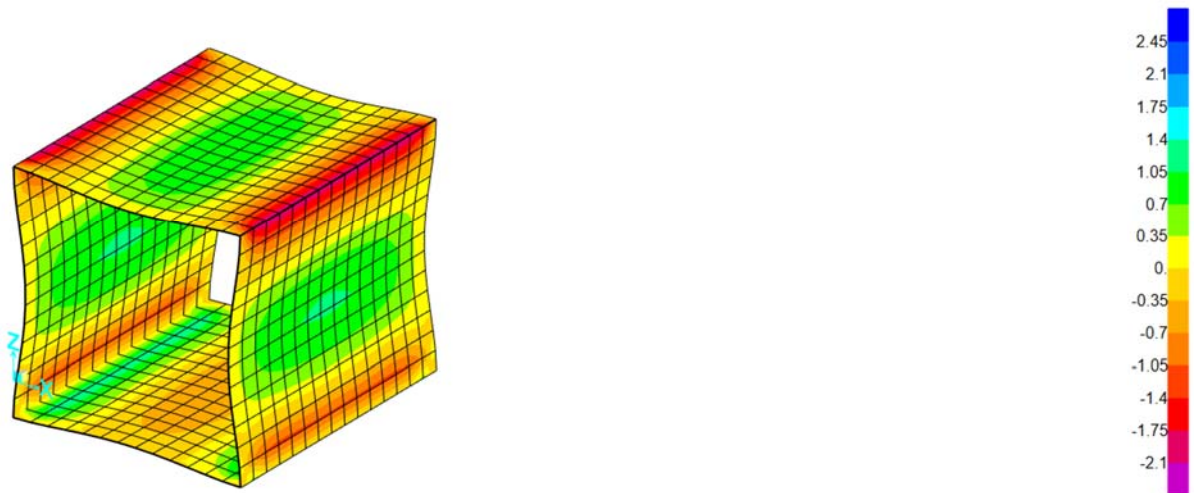
Nota. Elaboración propia

**Figura 35.** Modelo de SAP2000 aplicado con cargas de momento M22



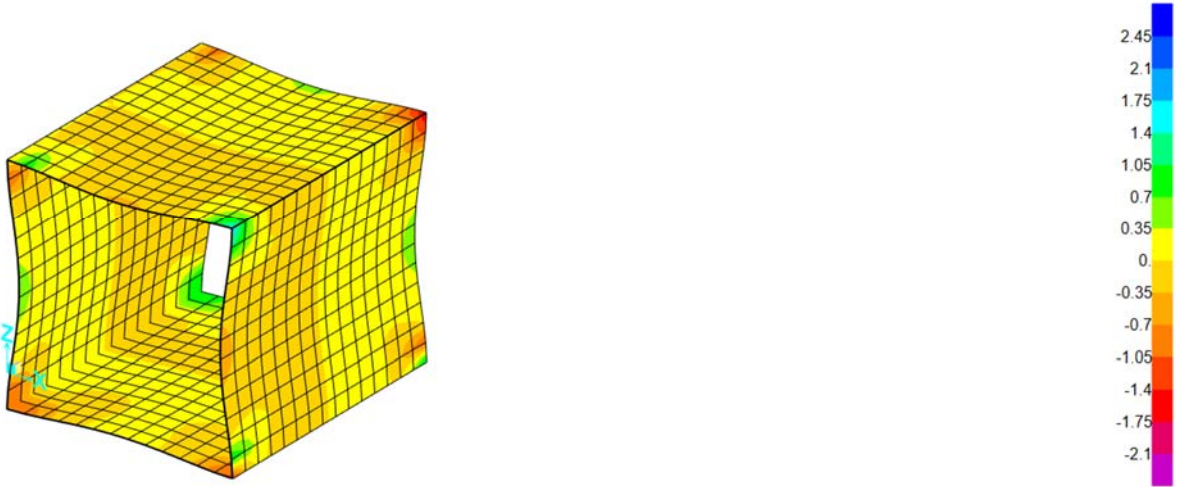
Nota. Elaboración propia

**Figura 36.** Modelo de SAP2000 aplicado con cargas de momento M11



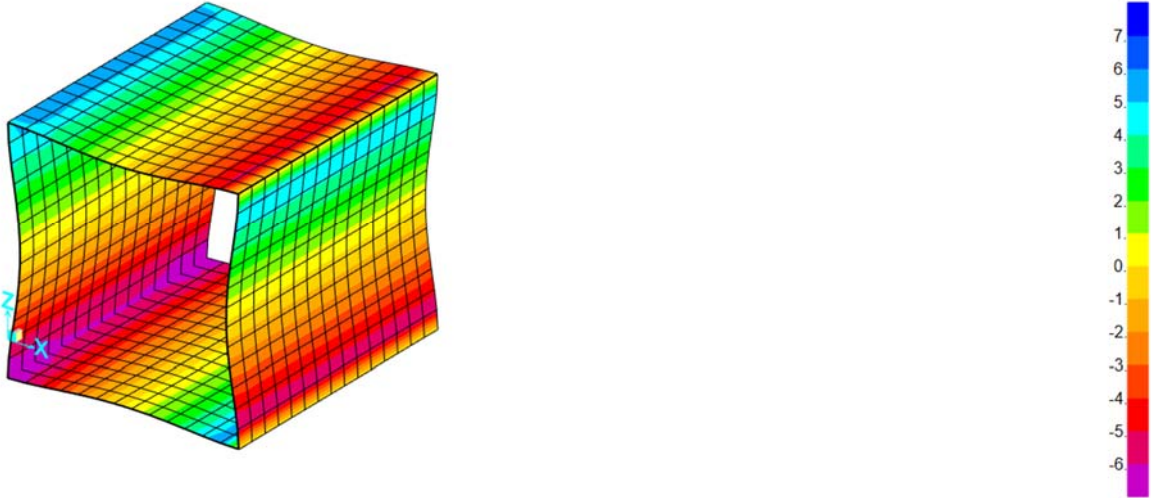
Nota. Elaboración propia

**Figura 37.** Modelo de SAP2000 aplicado con cargas de momento V13



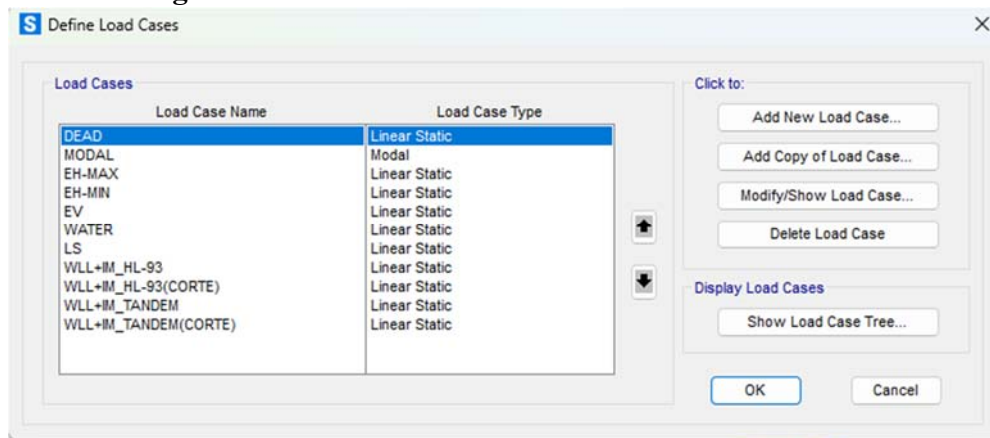
Nota. Elaboración propia

**Figura 38.** Modelo de SAP2000 aplicado con cargas de momento V23



Nota. Elaboración propia

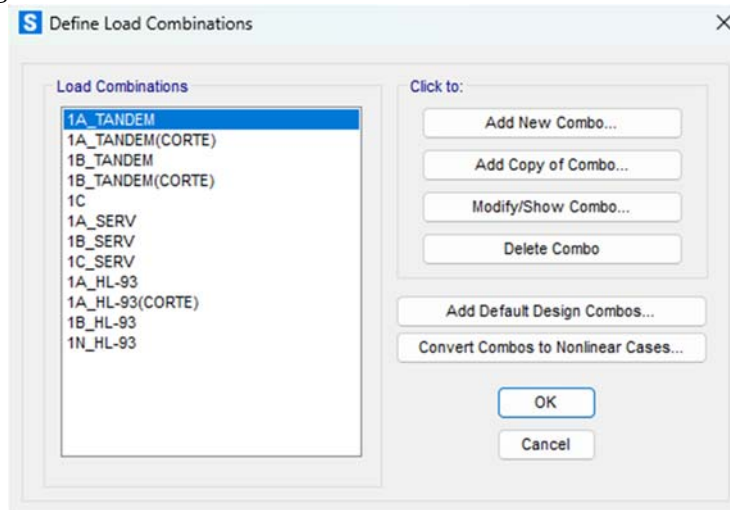
**Figura 39.** Load Cases utilizados en el modelo de SAP2000



Nota. Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 23 se agregaron al modelo todos los load cases generados a partir del mathacad mostrado en las secciones anteriores.

**Figura 40.** Load Combinations utilizados en el modelo de SAP2000



Nota. Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 24 se muestran todas las combinaciones de carga aplicadas al modelo cada una de ellas con sus mayoraciones. Las 1A, 1B, 1C representan las combinaciones de carga Ultimas mientras que las 1ASERV, 1BSERV, 1CSERV representan las combinaciones de carga de servicio.

**Figura 41.** Detalle de combinaciones de carga en el modelo de SAP2000

Load Case Name	Load Case Type	Mode	Scale Factor
DEAD	Linear Static		1.25
DEAD	Linear Static		1.25
EV	Linear Static		1.365
WLL+IM_TANDEM	Linear Static		1.75
EH-MAX	Linear Static		1.4175
LS	Linear Static		1.75

Nota. Elaboración propia

Estos factores de mayorero para las cargas se basan en los factores de mayorero de AASHTO LRFD 2018, como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 42.** Detalle de combinaciones de carga

**Strength Limit State:**

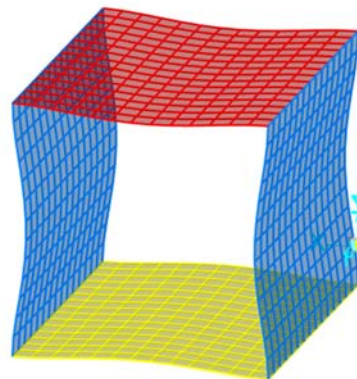
- Ia. Maximum vertical load and maximum horizontal load:  
 $1.25DC + (1.30)(1.05)EV + 1.75(LL+IM) + (1.35)(1.05)EH_{max} + 1.75LS$
- Ib. Maximum vertical load and minimum horizontal load:  
 $1.25DC + (1.30)(1.05)EV + 1.75(LL+IM) + 1.00WA + (0.9/1.05)EH_{min}$
- Ic. Minimum vertical load and maximum horizontal load:  
 $0.90DC + (0.90/1.05)EV + (1.35)(1.05)EH_{max} + 1.75LS$

**Service Limit State:**

- Ia. Maximum vertical load and maximum horizontal load:  
 $1.00DC + 1.00EV + 1.00(LL+IM) + 1.00EH_{max} + 1.00LS$
- Ib. Maximum vertical load and minimum horizontal load:  
 $1.00DC + 1.00EV + 1.0(LL+IM) + 1.00WA + 1.00EH_{min}$
- Ic. Minimum vertical load and maximum horizontal load:  
 $1.00DC + 1.00EV + 1.00EH_{max} + 1.00LS$

**Nota. Adaptada de AASHTO LRFD (2018).**

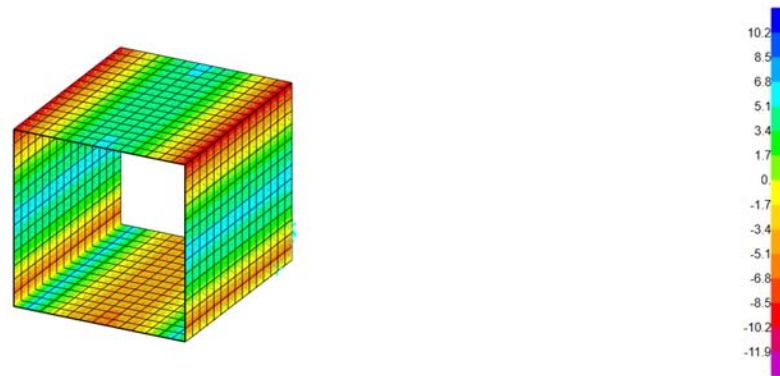
**Figura 43.** Deformación de la estructura luego de aplicar la combinación de carga 1A\_TANDEM



Nota. Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 43 la alcantarilla tipo cajón prefabricada de concreto reforzado sufre deformaciones en todos sus elementos debido a las cargas aplicadas. Se realizo este análisis para todas las combinaciones de carga mencionadas con anterioridad.

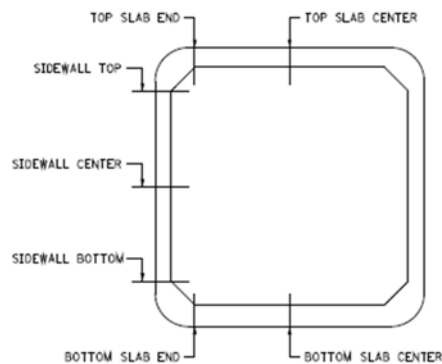
**Figura 44.** Diagrama resultante de Momento luego de aplicar la combinación de carga 1A\_TANDEM



Nota. Elaboración propia

Como se muestra en la figura 44 se realiza un análisis al diagrama resultante de cada una de las combinaciones de carga en las siguientes ubicaciones mostradas en la figura 29.

**Figura 45.** Ubicaciones de análisis de carga en modelo SAP2000



Nota. Adaptada de AASHTO LRFD (2018).

Al analizar las cargas ubicadas en cada una de las partes de la alcantarilla tipo cajón prefabricada de concreto reforzado mediante todas las combinaciones de carga llegamos a la siguiente tabla de resultados.

**Tabla 13. Resultado Análisis Estructural Momento en (Kip,ft)**

<b>Resultados Analisis estructural Momento (Kip,Ft)</b>						
	Estado Limite Ultimo			Estado limite de servicio		
	1a	1b	1c	1a	1b	1c
Muro Lateral Parte Superior	-9.5	-4.32	-6.62	-6.42	-3.099	-6.36
Muro Lateral Parte Central	5.35	-6.4	6.59	3.4	-4.71	3.44
Muro Lateral Parte Baja	-5.83	-2.4	-3.87	-4.17	-1.75	-4.03
Losa Superior Parte Central	5.05	12.23	1.25	4.75	9.05	4.075
Losa Superior Parte Lateral	-9.78	-2.78	-7.72	-6.2	-1.77	-6.53
Losa Inferior Parte Central	-4.8	-11.83	-1.03	-4	-8.65	-3.98
Losa Inferior Parte Lateral	6.18	-3.34	6.54	4.04	-2.29	3.85

Nota. Elaboración propia

**Tabla 14. Resultado Análisis Estructural Cortante en (Kip)**

<b>Resultados Analisis estructural Cortante (Kip)</b>						
	Estado Limite Ultimo			Estado limite de servicio		
	1a	1b	1c	1a	1b	1c
Muro Lateral Parte Superior	5.16	2.84	4.56	3.6	1.03	3.64
Muro Lateral Parte Central	-0.61	0.57	0.55	0.36	0.48	0.35
Muro Lateral Parte Baja	6.83	2.54	5.65	4.29	2.16	4.34
Losa Superior Parte Central	0.471	0.47	0.29	0.348	0.48	0.348
Losa Superior Parte Lateral	5.41	5.06	4.26	3.82	3.06	3.83
Losa Inferior Parte Central	0.45	0.332	0.33	0.338	0.23	0.33
Losa Inferior Parte Lateral	5.83	5.28	4.43	4.15	2.72	4.21

Nota. Elaboración propia

**Tabla 15. Resultado Análisis Estructural Carga Axial en (Kip)**

<b>Resultados Analisis estructural Carga Axial (Kip)</b>						
	Estado Limite Ultimo			Estado limite de servicio		
	1a	1b	1c	1a	1b	1c
Muro Lateral Parte Superior	9.015	9.015	9.015	5.16	5.16	5.16
Muro Lateral Parte Central	7.085	7.085	7.085	5.02	5.02	5.02
Muro Lateral Parte Baja	14.91	14.91	14.91	7.94	7.94	7.94
Losa Superior Parte Central	5.69	1.95	5.59	3.86	1.572	3.86
Losa Superior Parte Lateral	5.85	1.9	6.37	4.77	5.19	4.06
Losa Inferior Parte Central	7.63	1.72	7.71	5.24	0.97	5.243
Losa Inferior Parte Lateral	6.97	2.68	6.81	7.68	0.97	4.85

Nota. Elaboración propia

**Tabla 16.** Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Losa Superior Centro

TABLE: Fuerzas Aplicadas						
Area	Carga	M11	M22	V13	V23	
		Kip-ft/ft	Kip-ft/ft	Kip/ft	Kip/ft	
Losa Superior Centro	1A_TANDEM	0.9546	5.0558	-0.016	-1.646E-12	
Losa Superior Centro	1A_TANDEM	0.9546	5.0558	-0.016	1.626E-12	
Losa Superior Centro	1A_TANDEM	0.9686	5.0554	-0.016	-5.558E-14	
Losa Superior Centro	1A_TANDEM	0.9686	5.0554	-0.016	2.3E-14	
Losa Superior Centro	1A_SERV	0.7574	4.0755	-0.013	-1.23E-12	
Losa Superior Centro	1A_SERV	0.7574	4.0755	-0.013	1.237E-12	
Losa Superior Centro	1A_SERV	0.7695	4.0747	-0.013	8.202E-14	
Losa Superior Centro	1A_SERV	0.7695	4.0747	-0.013	6.474E-14	

Nota. Elaboración propia

**Tabla 17.** Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Losa Superior Lateral

TABLE: Fuerzas Aplicadas						
Area	Carga	M11	M22	V13	V23	
		Kip-ft/ft	Kip-ft/ft	Kip/ft	Kip/ft	
Losa Superior Lateral	1A_SERV	-0.7893	-3.9043	-0.00674	4.14	
Losa Superior Lateral	1A_SERV	-0.7935	-3.9083	-0.00674	4.138	
Losa Superior Lateral	1A_TANDEM	-1.1522	-5.7257	-0.008438	5.596	
Losa Superior Lateral	1A_TANDEM	-1.1572	-5.7314	-0.008438	5.593	
Losa Superior Lateral	1A_SERV	-1.4186	-7.0938	-0.0007051	4.14	
Losa Superior Lateral	1A_SERV	-1.418	-7.0963	-0.0007051	4.138	
Losa Superior Lateral	1A_TANDEM	-2.0068	-10.0346	-0.001415	5.596	
Losa Superior Lateral	1A_TANDEM	-2.0062	-10.0381	-0.001415	5.593	

Nota. Elaboración propia

**Tabla 18.** Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Muro Lateral Superior

TABLE: Fuerzas Aplicadas						
Area	Carga	M11	M22	V13	V23	
		Kip-ft/ft	Kip-ft/ft	Kip/ft	Kip/ft	
Muro lateral Superior	1A_TANDEM	0.0431	0.4168	-0.027	3.775	
Muro lateral Superior	1A_TANDEM	0.0662	0.4148	-0.027	3.767	
Muro lateral Superior	1A_SERV	-0.0124	0.0279	-0.017	2.581	
Muro lateral Superior	1A_SERV	0.0018	0.027	-0.017	2.576	
Muro lateral Superior	1A_SERV	-0.3924	-1.956	-0.013	2.576	
Muro lateral Superior	1A_SERV	-0.4035	-1.9593	-0.013	2.581	
Muro lateral Superior	1A_TANDEM	-0.5073	-2.4868	-0.021	3.767	
Muro lateral Superior	1A_TANDEM	-0.525	-2.491	-0.021	3.775	

Nota. Elaboración propia

**Tabla 19.** Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Muro Lateral Centro

TABLE: Fuerzas Aplicadas						
Area	Carga	M11	M22	V13	V23	
		Kip-ft/ft	Kip-ft/ft	Kip/ft	Kip/ft	
Muro Lateral Centro	1A_TANDEM	0.9591	4.7719	-0.042	-1.792	
Muro Lateral Centro	1A_TANDEM	0.9253	4.7678	-0.042	-1.796	
Muro Lateral Centro	1A_TANDEM	0.6948	3.3876	-0.037	-1.792	
Muro Lateral Centro	1A_TANDEM	0.6651	3.3798	-0.037	-1.796	
Muro Lateral Centro	1A_SERV	0.625	3.048	-0.027	-1.214	
Muro Lateral Centro	1A_SERV	0.6036	3.0442	-0.027	-1.218	
Muro Lateral Centro	1A_SERV	0.445	2.11	-0.024	-1.214	
Muro Lateral Centro	1A_SERV	0.4261	2.1035	-0.024	-1.218	

Nota. Elaboración propia

**Tabla 20.** Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Losa Inferior Centro

TABLE: Fuerzas Aplicadas						
Area	Carga	M11	M22	V13	V23	
		Kip-ft/ft	Kip-ft/ft	Kip/ft	Kip/ft	
Losa inferior Centro	1A_SERV	-0.4879	-3.9919	0.015	-5.514E-13	
Losa inferior Centro	1A_SERV	-0.4879	-3.9919	0.015	-4.188E-13	
Losa inferior Centro	1A_SERV	-0.4596	-4.0261	0.015	1.415E-12	
Losa inferior Centro	1A_SERV	-0.4596	-4.0261	0.015	2.485E-13	
Losa inferior Centro	1A_TANDEM	-0.5724	-4.8196	0.013	-7.734E-13	
Losa inferior Centro	1A_TANDEM	-0.5724	-4.8196	0.013	-5.873E-13	
Losa inferior Centro	1A_TANDEM	-0.5412	-4.8641	0.013	1.835E-12	
Losa inferior Centro	1A_TANDEM	-0.5412	-4.8641	0.013	2.639E-13	

Nota. Elaboración propia

**Tabla 21.** Resultado Análisis Estructural SAP2000 V25 Losa Inferior Lateral

TABLE: Fuerzas Aplicadas						
Area	Carga	M11	M22	V13	V23	
		Kip-ft/ft	Kip-ft/ft	Kip/ft	Kip/ft	
Losa Inferior Lateral	1A_TANDEM	1.3505	6.2101	0.032	-4.842	
Losa Inferior Lateral	1A_TANDEM	1.3284	6.183	0.032	-4.803	
Losa Inferior Lateral	1A_SERV	0.9222	4.1739	0.025	-3.596	
Losa Inferior Lateral	1A_SERV	0.904	4.1546	0.025	-3.567	
Losa Inferior Lateral	1A_TANDEM	0.6676	2.4511	0.034	-4.803	
Losa Inferior Lateral	1A_TANDEM	0.6916	2.4481	0.034	-4.842	
Losa Inferior Lateral	1A_SERV	0.4175	1.381	0.028	-3.567	
Losa Inferior Lateral	1A_SERV	0.438	1.378	0.028	-3.596	

Nota. Elaboración propia

## F. Diseño de refuerzos por flexión

A partir de los momentos últimos obtenidos en SAP2000, se procedió con el diseño de refuerzos de acero por flexión. Esto se realizó para la parte intermedia de la losa superior, en las orillas de la losa superior, así como en las partes intermedias y laterales de los muros laterales y las losas inferiores como se mostró en la figura 29. Se verificaron los controles por agrietamiento para garantizar la estabilidad y durabilidad de la estructura bajo las solicitaciones de flexión.

**Figura 46.** Cálculo de área de acero Muros Laterales

### Muros Laterales

Suponiendo una altura efectiva 'd' basada en un diámetro promedio del alambre de 1 pulgada ( $d_w = 1.00$  in) y un recubrimiento de 2 pulgadas.

$d_w := 1$  in Diámetro de refuerzo       $rec := 2$  in Recubrimiento

$$d := Ts - rec - \frac{d_w}{2} = 5.54 \text{ in} \qquad M_u := 9.50 \text{ kip} \cdot \text{ft}$$

$$b := 12 \text{ in} \quad h := 20 \text{ in} \quad f'_c := 5 \text{ ksi} \quad f_y := 65 \text{ ksi} \quad M_u = 114 \text{ kip} \cdot \text{in} \quad \phi := 1$$

$$cover := 2 \text{ in} \quad db := 1 \text{ in} \quad A_s := 1 \text{ in}^2$$

$$a := \frac{(A_s \cdot f_y)}{(0.85 \cdot f'_c \cdot b)} \quad M_u = \phi \cdot A_s \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

$$A_{smuros} := \text{Find}(A_s) = 0.358 \text{ in}^2$$

Nota. Elaboración propia

**Figura 47.** Cálculo de área de acero Losa Superior

**Losa Superior**

Suponiendo una altura efectiva 'd' basada en un diámetro promedio del alambre de 1 pulgada ( $d_w = 1.00$  in) y un recubrimiento de 2 pulgadas.

$$d_w := 1 \text{ in} \quad \text{Diámetro de refuerzo} \quad rec := 2 \text{ in} \quad \text{Recubrimiento}$$

$$d := Tt - rec - \frac{d_w}{2} = 6.5 \text{ in} \quad M_u := 12.23 \text{ kip} \cdot \text{ft}$$

$$b := 12 \text{ in} \quad f'_c := 5 \text{ ksi} \quad f_y := 65 \text{ ksi} \quad M_u = 146.76 \text{ kip} \cdot \text{in} \quad \phi := 1$$

$$cover := 2 \text{ in} \quad A_s := 1 \text{ in}^2$$

$$a := \frac{(A_s \cdot f_y)}{(0.85 \cdot f'_c \cdot b)} \quad M_u = \phi \cdot A_s \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

$$A_{stopslab} := \text{Find}(A_s) = 0.385 \text{ in}^2$$

Nota. Elaboración propia

**Figura 48.** Cálculo de área de acero Losa Inferior

**Losa Inferior** Suponiendo una altura efectiva 'd' basada en un diámetro promedio del alambre de 1 pulgada ( $d_w = 1.00$  in) y un recubrimiento de 2 pulgadas.

$$d_w := 1 \text{ in} \quad \text{Diámetro de refuerzo} \quad rec := 2 \text{ in} \quad \text{Recubrimiento}$$

$$d := Tb - rec - \frac{d_w}{2} = 7.46 \text{ in} \quad M_u := 11.83 \text{ kip} \cdot \text{ft}$$

$$b := 12 \text{ in} \quad f'_c := 5 \text{ ksi} \quad f_y := 65 \text{ ksi} \quad M_u = 141.96 \text{ kip} \cdot \text{in} \quad \phi := 1$$

$$A_s := 1 \text{ in}^2$$

$$a := \frac{(A_s \cdot f_y)}{(0.85 \cdot f'_c \cdot b)} \quad M_u = \phi \cdot A_s \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

$$A_{bottomslab} := \text{Find}(A_s) = 0.32 \text{ in}^2$$

Nota. Elaboración propia

**Tabla 22. Resumen de Momento Ultimo y Área de acero requerida**

Solicitaciones de carga	Momento Ultimo Mu		Area de acero requerida	
Muros laterales	9.5	kip*ft	0.358	in2
Losa Superior	12.23	kip*ft	0.385	in2
Losa Inferior	11.83	kip*ft	0.32	in2

Nota. Elaboración propia

Luego de obtener las áreas de acero requeridas por el momento ultimo Mu se realizó un control de agrietamiento en el cual se tuvo que dar un espaciamiento de 4 pulgadas para poder realizar el análisis en el cual tanto la losa superior como la losa inferior no cumplieron con el control por agrietamiento por lo tanto se tuvo que aumentar el área de acero para poder cumplir con la normativa.

**Figura 49. Cálculo por control de agrietamiento Losa Superior**

*Control de agrietamiento*

**Losa Superior**

$\gamma_{er} := 0.75$  Factor de exposición     $s := 4 \text{ in}$  espaciamiento supuesto

$d_c := rec + \frac{1}{2} \cdot d_w = 2.5 \text{ in}$

El espaciamiento  $s$  debe satisfacer la siguiente ecuacion

$$s \leq \frac{700 \cdot \gamma_{er}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} \leq 0.6 f_y \quad \beta_s := 1 + \frac{d_c}{0.7 \cdot (Tt - d_c)} = 1.549$$

$f_w := \frac{700 \text{ ksi} \cdot \text{in} \cdot \gamma_{er}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} = 37.648 \text{ ksi}$      $0.6 \cdot f_y = 36 \text{ ksi}$

$M_s := 9.05 \text{ kip} \cdot \text{ft}$  Momento     $N_s := 1.572 \text{ kip}$  Axial Thrust

$d := 6.5 \text{ in}$

$$e := \frac{M_s}{N_s} + d - \frac{Tt}{2} = 71.084 \text{ in}$$

$$j := 0.74 + 0.1 \cdot \left(\frac{e}{d}\right) = 1.834$$

$\bar{j} := 0.9$      $i := \frac{1}{1 - \frac{j \cdot d}{e}} = 1.09$

$$f_s := \frac{M_s + N_s \cdot \left(d - \frac{Tt}{2}\right)}{A_{stotlab} \cdot j \cdot i \cdot d} = 45.517 \text{ ksi}$$

if ( $f_{ss} \geq f_s$ , "Cumple", "No cumple") = "No cumple"

$$A_{scrack} := \frac{f_s}{f_{ss}} \cdot A_{stotlab} = 0.466 \text{ in}^2$$

Nota. Elaboración propia

**Figura 50. Corrección por control de agrietamiento Losa Superior  
Losa Superior (Corrección tras chequeo de agrietamiento)**

$$\gamma_{er} := 0.75 \quad \text{Factor de exposición} \quad s := 4 \text{ in} \quad \text{espaciamiento supuesto}$$

$$d_c := rec + \frac{1}{2} \cdot d_w = 2.5 \text{ in} \quad A_{stopslab} := A_{scrack} = 0.466 \text{ in}^2$$

El espaciamiento,  $s$  debe satisfacer la siguiente ecuacion

$$s \leq \frac{700 \cdot \gamma_{er}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} \leq 0.6 f_y \quad \beta_s := 1 + \frac{d_c}{0.7 \cdot (Tt - d_c)} = 1.549$$

$$f_{ss} := \frac{700 \text{ ksi} \cdot \text{in} \cdot \gamma_{er}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} = 37.648 \text{ ksi} \quad 0.6 \cdot f_y = 36 \text{ ksi}$$

$$M_s := 9.05 \text{ kip} \cdot \text{ft} \quad \text{Momento} \quad N_s := 1.572 \text{ kip} \quad \text{Axial Thrust}$$

$$d := 6.5 \text{ in}$$

$$e := \frac{M_s}{N_s} + d - \frac{Tt}{2} = 71.084 \text{ in}$$

$$j := 0.74 + 0.1 \cdot \left( \frac{e}{d} \right) = 1.834$$

$$j := 0.9 \quad i := \frac{1}{1 - \frac{j \cdot d}{e}} = 1.09$$

$$f_s := \frac{M_s + N_s \cdot \left( d - \frac{Tt}{2} \right)}{A_{stopslab} \cdot j \cdot i \cdot d} = 37.648 \text{ ksi}$$

if ( $f_{ss} \geq f_s$ , "Cumple", "No cumple") = "Cumple"

Nota. Elaboración propia

Figura 51. Calculo por control de agrietamiento Losa Inferior

**Losa inferior**

$\gamma_{er} := 0.75$  Factor de exposición     $s := 4 \text{ in}$  espaciamiento supuesto

$d_c := rec + \frac{1}{2} \cdot d_w = 2.5 \text{ in}$

El espaciamiento, s debe satisfacer la siguiente ecuacion

$$s \leq \frac{700 \cdot \gamma_{er}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} \leq 0.6 f_y \quad \beta_s := 1 + \frac{d_c}{0.7 \cdot (Tb - d_c)} = 1.479$$

$$f_s := \frac{700 \text{ ksi} \cdot \text{in} \cdot \gamma_{er}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} = 39.448 \text{ ksi} \quad 0.6 \cdot f_y = 36 \text{ ksi}$$

$M_s := 8.65 \text{ kip} \cdot \text{ft}$  Momento     $N_s := 0.97 \text{ kip}$  Axial Thrust

$d := 6.5 \text{ in}$

$$e := \frac{M_s}{N_s} + d - \frac{Tb}{2} = 108.53 \text{ in}$$

$$j := 0.74 + 0.1 \cdot \left(\frac{e}{d}\right) = 2.41$$

$$i := 0.9 \quad \beta := \frac{1}{1 - \frac{j \cdot d}{e}} = 1.057$$

$$f_s := \frac{M_s + N_s \cdot \left(d - \frac{Tb}{2}\right)}{A_{sbottomlab} \cdot j \cdot i \cdot d} = 53.187 \text{ ksi}$$

if ( $f_{ss} \geq f_s$ , "Cumple", "No cumple") = "No cumple"

$$A_{sbottomlab} := \frac{f_s}{f_{ss}} \cdot A_{sbottomlab} = 0.432 \text{ in}^2$$

Nota. Elaboración propia

Figura 52. Corrección por control de agrietamiento Losa Inferior

**Losa inferior (Corrección tras chequeo de agrietamiento)**

$\gamma_{cr} := 0.75$  Factor de exposición     $s := 4 \text{ in}$  espaciamiento supuesto

$d_c := rec + \frac{1}{2} \cdot d_w = 2.5 \text{ in}$      $A_{sbottomslab} := A_{s\text{crackbottoms}} = 0.432 \text{ in}^2$

El espaciamiento  $s$  debe satisfacer la siguiente ecuación

$s \leq \frac{700 \cdot \gamma_{cr}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} \leq 0.6 f_y$      $\beta_s := 1 + \frac{d_c}{0.7 \cdot (Tb - d_c)} = 1.479$

$f_{ss} := \frac{700 \text{ ksi} \cdot \text{in} \cdot \gamma_{cr}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} = 39.448 \text{ ksi}$      $0.6 \cdot f_y = 36 \text{ ksi}$

$M_s := 8.65 \text{ kip} \cdot \text{ft}$  Momento     $N_s := 0.97 \text{ kip}$  Axial Thrust

$d := 6.5 \text{ in}$

$e := \frac{M_s}{N_s} + d - \frac{Tb}{2} = 108.53 \text{ in}$

$j := 0.74 + 0.1 \cdot \left(\frac{e}{d}\right) = 2.41$

$j := 0.9$      $i := \frac{1}{1 - \frac{j \cdot d}{e}} = 1.057$

$f_s := \frac{M_s + N_s \cdot \left(d - \frac{Tb}{2}\right)}{A_{sbottomslab} \cdot j \cdot i \cdot d} = 39.448 \text{ ksi}$

if ( $f_{ss} \geq f_s$ , "Cumple", "No cumple") = "Cumple"

Nota. Elaboración propia

**Figura 53.** Calculo por control de agrietamiento Muros Laterales

**Muros laterales**

$\gamma_{er} := 0.75$  Factor de exposición     $s := 4 \text{ in}$  espaciamiento supuesto

$d_c := rec + \frac{1}{2} \cdot d_w = 2.5 \text{ in}$

El espaciamiento,  $s$  debe satisfacer la siguiente ecuación

$$s \leq \frac{700 \cdot \gamma_{er}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} \leq 0.6 f_y \quad \beta_s := 1 + \frac{d_c}{0.7 \cdot (T_s - d_c)} = 1.645$$

$f_s := \frac{700 \text{ ksi} \cdot \text{in} \cdot \gamma_{er}}{\beta_s \cdot (s + 2 \cdot d_c)} = 35.468 \text{ ksi}$      $0.6 \cdot f_y = 36 \text{ ksi}$

$M_s := 23.22 \text{ kip} \cdot \text{in}$  Momento     $N_s := 5.73 \text{ kip}$  Axial Thrust

$d := 6.5 \text{ in}$

$e := \frac{M_s}{N_s} + d - \frac{T_s}{2} = 6.532 \text{ in}$

$j := 0.74 + 0.1 \cdot \left(\frac{e}{d}\right) = 0.84$

$j := 0.9$      $i := \frac{1}{1 - \frac{j \cdot d}{e}} = 9.573$

$f_s := \frac{M_s + N_s \cdot \left(d - \frac{T_s}{2}\right)}{A_{smuros} \cdot j \cdot i \cdot d} = 1.868 \text{ ksi}$      $A_{smuros} = 0.358 \text{ in}^2$

if ( $f_{ss} \geq f_s$ , "Cumple", "No cumple") = "Cumple"

Nota. Elaboración propia

**Tabla 23.** Resumen de acero requerido por Momento último y por control de agrietamiento.

Elemento	Acero requerido por Momento Ultimo Mu		Acero requerido por control de agrietamiento	
Muros laterales	0.358	in2	0.466	in2
Losa Superior	0.385	in2	0.432	in2
Losa Inferior	0.32	in2	0.32	in2

Nota. Elaboración propia

## G. Chequeos de acero mínimo y máximo

En esta etapa, se realizaron los chequeos para asegurar que el diseño cumpliera con los requisitos de acero mínimo necesario para refuerzos por flexión, además de verificar que los límites máximos de refuerzo fueran respetados. Estos chequeos fueron fundamentales para garantizar que el diseño fuera seguro y eficiente en términos de uso de materiales.

**Figura 54.** Chequeos de acero mínimo para refuerzos por flexión

<i>Chequeos de acero mínimo para refuerzos por flexión</i>	
<u>Muro</u>	
$A_{\text{mínimomuro}} := 0.002 \cdot b \cdot T_s = 0.193 \text{ in}^2$	
<u>Losa Superior</u>	Para alcantarillas tipo cajón de concreto prefabricado, el requerimiento mínimo de refuerzo establecido por el MnDOT es de $0.06 \text{ in}^2/\text{pie}$ , independientemente del tamaño de la alcantarilla.
$A_{\text{mínimotopslab}} := 0.002 \cdot b \cdot T_t = 0.216 \text{ in}^2$	
<u>Losa Inferior</u>	
$A_{\text{mínimobottomslab}} := 0.002 \cdot b \cdot T_b = 0.239 \text{ in}^2$	

Nota. Elaboración propia

**Tabla 24.** Resumen de acero mínimo requerido por flexión

Elemento	Acero mínimo para refuerzos por flexión	
Muros laterales	0.193	in <sup>2</sup>
Losa Superior	0.216	in <sup>2</sup>
Losa Inferior	0.239	in <sup>2</sup>

Nota. Elaboración propia

La deformación en el refuerzo se verifica para asegurar que la sección esté controlada por tracción. Para que pueda utilizarse un factor de resistencia de 1.0 en flexión, la deformación del refuerzo debe ser al menos 0.005.

**Tabla 25.** Resumen de deformación del refuerzo

Elemento	Deformación del esfuerzo (c/d) < 0.375	
Muros laterales	0.088	< 0.375
Losa Superior	0.114	< 0.375
Losa Inferior	0.106	< 0.375

Nota. Elaboración propia

Por último, los miembros de la Asociación de Tuberías de Concreto de Minnesota (MCPA) también prefieren un valor máximo de razón de refuerzo de 0.6pb para limitar la congestión del acero durante la fabricación.

**Tabla 26.** Valor máximo de razón de refuerzo

Elemento	Valor maximo de razon de refuerzo $<0.60*pb$	
Muros laterales	0.006	<0.018
Losa Superior	0.006	<0.018
Losa Inferior	0.005	<0.018

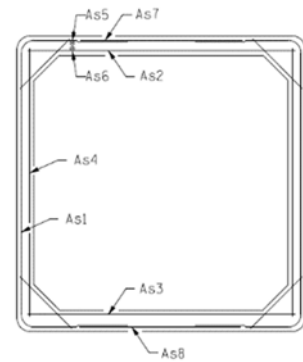
Nota. Elaboración propia

## H. Resumen de áreas de acero de refuerzo

Una vez completado el diseño por flexión, se resumieron las áreas de acero de refuerzo necesarias para cada sección de la estructura. Este resumen permitió tener una visión general de la distribución y cantidad de refuerzo en la alcantarilla, y facilitará la ejecución de la obra de construcción.

**Tabla 27.** Resumen de áreas de acero de refuerzo y su ubicación

Refuerzo	Area de acero	dim
As1	0.358	in2
As2	0.466	in2
As3	0.432	in2
As4	0.193	in2
As5	0.06	in2
As6	0.006	in2
As7	0.216	in2
As8	0.239	in2



Nota. Elaboración propia

## I. Revisión de cortante y chequeo de empuje axial

Se realizó una revisión detallada de la resistencia a cortante en los tres elementos principales de la alcantarilla: losas superiores, losas inferiores y muros laterales. Además, se verificó el empuje axial, evaluando la capacidad de la estructura para resistir las fuerzas axiales generadas por las cargas aplicadas.

**Tabla 28.** Verificación de cortante ultimo Vu

Elemento	Cortante Ultimo, Vu		Phi*Vn/ Phi*Vc	
Muros laterales	6.83	kip	8.956	kip
Losa Superior	5.41	kip	14.881	kip
Losa Inferior	11.83	kip	17.17	kip

Nota. Elaboración propia

La verificación del empuje axial en una alcantarilla tipo cajón se refiere a asegurar que la capacidad axial de los muros laterales pueda resistir adecuadamente las fuerzas axiales aplicadas, conforme al Artículo 5.7.4 de AASHTO LRFD el cual si cumple. (Ver Anexo)

## J. Detalles de refuerzo y longitudes de refuerzo

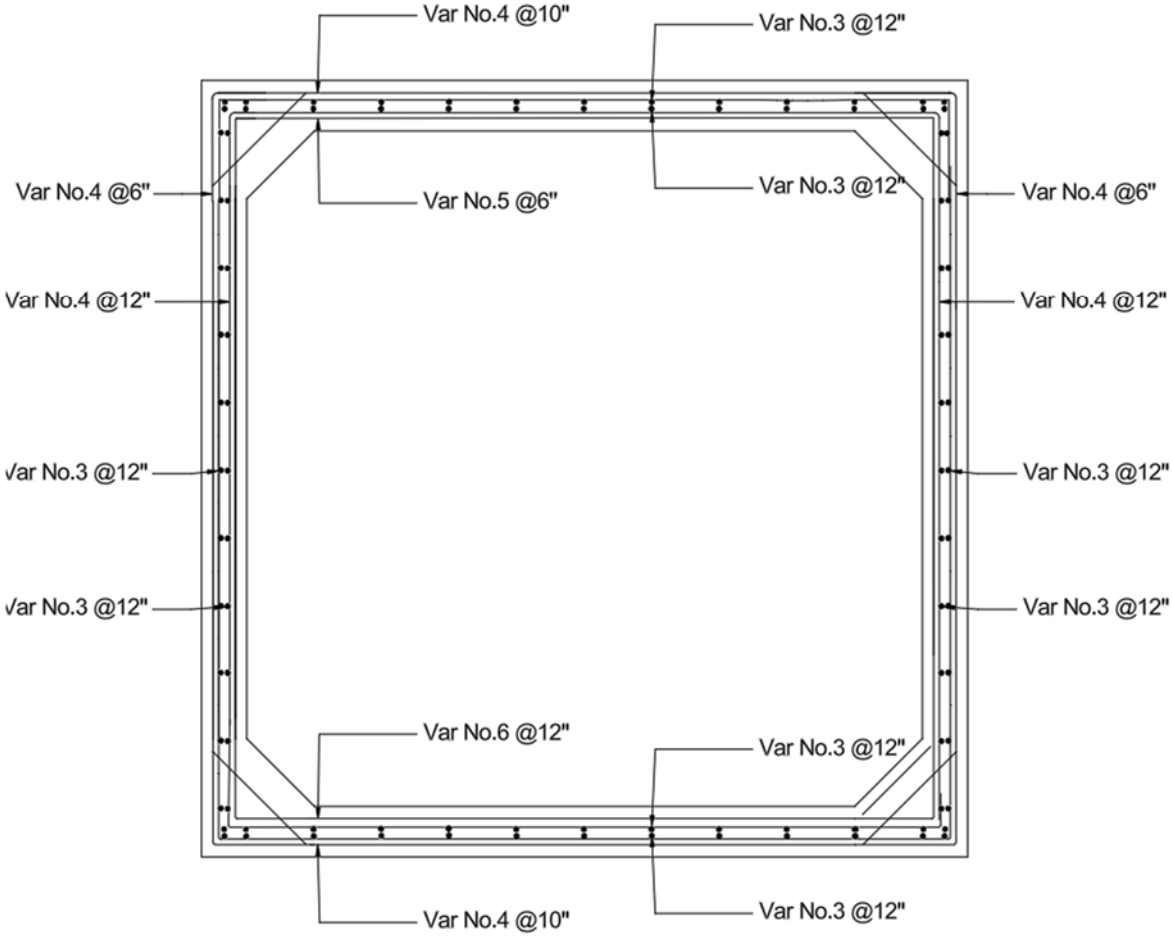
Finalmente, se generaron los detalles constructivos para el refuerzo de acero, especificando las longitudes de las varillas y las distribuciones de las mismas. Estos detalles fueron necesarios para crear los planos de construcción en AutoCAD, los cuales servirán para la fabricación y montaje de la alcantarilla tipo cajón prefabricada.

**Tabla 29.** Longitudes del acero de refuerzo.

Longitudes de refuerzo	Longitud
As1	16'-9"
As2	10'-6"
As3	10'-6"
As4	10'-6"
As7	8'-2"
As8	8'-2"

Nota. Elaboración propia

**Figura 55.** Detalle de acero de refuerzo de alcantarilla tipo cajón prefabricada de concreto reforzado



Nota. Elaboración propia

## CONCLUSIONES

- Se establecieron los supuestos de diseño necesarios conforme a la normativa AASHTO LRFD 2018, identificando con claridad las condiciones de carga que inciden en la estructura, tales como cargas muertas, vivas, presiones hidrostáticas, empujes laterales de suelo y cargas dinámicas vehiculares. Esto permitió plantear un escenario de diseño realista para generar resultados aplicables en la vida real.
- Mediante la modelación estructural en SAP2000, se representó con fidelidad el comportamiento de la alcantarilla bajo diferentes combinaciones de carga, utilizando tanto estados límite últimos como estados límite de servicio. El uso del modelo de carga vehicular HL-93 y la aplicación del Tándem resultaron adecuados para simular las solicitaciones exigidas por la normativa.
- A través de la hoja de cálculo desarrollada en Mathcad se logró sistematizar el proceso de cálculo del refuerzo por flexión, verificación de agrietamiento, resistencia a cortante y empuje axial. Esta herramienta no solo permitió validar los resultados con SAP2000, sino que también facilitó su aplicación futura para estructuras similares.
- Se elaboraron detalles constructivos completos en AutoCAD con base en los resultados de cálculo, incluyendo la distribución y longitud del refuerzo. Esto brinda una solución integral y práctica para su implementación en campo.

## RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis hidráulico complementario para evaluar el comportamiento de la estructura ante diferentes condiciones de flujo, lo cual permitiría incorporar criterios de socavación, presión interna por flujo ocluso y efectos de sobrepresión.
- Incorporar estudios geotécnicos específicos del sitio donde será instalada la alcantarilla, para ajustar parámetros como empujes laterales del suelo y asentamientos diferenciales.
- Validar experimentalmente el comportamiento del refuerzo propuesto en prototipos a escala, especialmente en zonas de alta sollicitación. Esta práctica es recomendable en investigaciones futuras o cuando se introducen nuevos materiales o configuraciones.
- Realizar un análisis de costos asociado al diseño estructural propuesto, que incluya fabricación, transporte e instalación de los módulos prefabricados. Esta evaluación permitiría tomar decisiones técnicas más eficientes desde el punto de vista económico, especialmente en proyectos de infraestructura pública.
- Fomentar la investigación aplicada en el diseño y el comportamiento de estructuras hidráulicas prefabricadas, integrando simulaciones numéricas y validaciones experimentales como parte de proyectos de tesis o posgrado.
- Para entidades profesionales, elaborar guías técnicas nacionales adaptadas a la realidad guatemalteca sobre diseño y ejecución de alcantarillas prefabricadas, tomando como base AASHTO LRFD y experiencias locales.
- Promover el uso de prefabricados estructuralmente optimizados en proyectos de infraestructura vial rural y urbana, para mejorar los tiempos de ejecución y la durabilidad de las obras.

## REFERENCIAS

- AASHTO. (2018). *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*. AASHTO.
- Álvarez, M. J. Á., Parrales, E. L. P., Marcillo, L. A. P., Sánchez, L. A. G., García, C. E. P., Merino, G. L. M., Morales, F. H. G., & García, W. M. (2018). *Hidráulica aplicada para ingenieros civiles*. 3Ciencias.
- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2018). *Norma Sísmica para Edificios NSE 2-2018*. Guatemala: AGIES.
- Computers and Structures, Inc. (CSI). (2019). *SAP2000: Integrated structural analysis and design software* (Version 22). Computers and Structures, Inc.
- CYPE Software. (2023, 26 junio). *StruBIM Box Culverts*. CYPE.
- Harmsen, T. E. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado*. Fondo Editorial.
- Huff, T. (2022). *LRFD Bridge Design: Fundamentals and Applications*.
- HUFF, T. (2024). *LRFD Bridge Design: Fundamentals and Applications*. CRC Press.
- Institute, A. C. (2011). *ACI Standard Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-11)* reported by ACI Committee 318.
- Institute, A. C. (2014). *ACI Standard Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-14)* reported by ACI Committee 318.
- Institute, A. C. (2016). *ACI Standard Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-16)* reported by ACI Committee 318.
- McCormack, J. C., & Brown, R. H. (2017). *Diseño de concreto reforzado*. Alpha Editorial.
- McGuire, W., Gallagher, R. H., & Ziemian, R. D. (2000). *Structural analysis* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Sivakumar, B. (2007). *Legal truck loads and AASHTO legal loads for posting*. Transportation Research Board.
- Torralbo, J. C. G. (2017). *Mecánica de suelos*.
- Villalaz, C. C. (2007). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Editorial Limusa.
- Wisconsin Department of Transportation. (2024). *WisDOT Bridge Manual*. WisDOT.