

Diseño parametrizado de alcantarillas cuadradas



Abstract

The Project of parametrization of the design of square culverts consists of the utilization of one, two, and three cells, with filling of zero to ten meters, and different lights and heights for the superior and interior slabs and walls.

The main objective of this Project is to count on constructive plans which consign the position and quantity of reinforcement, hydraulic capacity, and amount of materials needed.

The objectives will be carried out through and with the aid of a parametric outline with the correspondent table, resulting from the compilation of all the realized designs.

For this, the geotechnical field was consulted to know the type of values of soil to use; moreover, the related subjects of structural engineering were investigated from where procedures for designing structural elements were obtained.

Furthermore, hydraulic concepts were used to qualify the volume of flow that the in question structures can transfer. In the same matter, aspects of the construction of culverts were evaluated in order to create a useful and easy to make design.

Developing the project, 'unexpected' results about the modules of the reaction of the soil, the lines of influence for different types of loads, the behavior of the interaction between the culvert and the structure, and relevant factors regarding the slab biting were encountered. The realized investigation was reflected on nine plans which account for around 700 designs of sewers.

All of these designs are based on common materials such as steel and concrete; hence, the culverts might be built with the regular consumables of construction. The purpose of this investigation is to simplify the work in the office and field when a design for a cu must be carried out.

Keywords: culverts, geotechnics, structures, ballast's coefficient, lines of influence, and design.

Resumen

El proyecto de parametrización del diseño de alcantarillas cuadradas consiste en la utilización de combinaciones de una, dos y tres celdas, con rellenos de cero a diez metros, además de diferentes luces y alturas para las losas superiores e interiores y paredes.

El objetivo principal del proyecto es contar con planos constructivos, en los cuales se consigne la posición y cantidad de refuerzo, capacidad hidráulica y cantidad de materiales.

Todo esto mediante la ayuda de un esquema paramétrico, junto con la tabla correspondiente, que provenga de la recopilación de todos los diseños realizados.

Para ello, se indagó en el campo geotécnico, para así saber qué valores de suelos utilizar; además, se investigó acerca de temas relacionados a la ingeniería estructural, de donde se obtuvieron los procedimientos para el diseño de los elementos de la estructura.

También, se utilizaron conceptos hidráulicos para cuantificar el caudal que puede trasegar las estructuras en cuestión. Asimismo, se evaluaron aspectos de construcción de las alcantarillas, para crear un diseño útil y fácil de realizar.

En el desarrollo del proyecto, se encontraron resultados "inesperados" sobre módulos de reacción del suelo, líneas de influencia para distintos tipos de cargas, comportamiento de la interacción entre la alcantarilla y la estructura, factores importantes sobre el cortante en las losas. El trabajo realizado se materializó en nueve planos, los cuales resumen alrededor de 700 diseños de alcantarillas.

Todos estos diseños se basan en materiales comunes como el acero y el concreto, de forma que las alcantarillas puedan ser edificadas con los insumos normales de construcción. Con este trabajo se pretende simplificar la labor de gabinete y campo, a la hora que se deba diseñar una alcantarilla.

Palabras clave: alcantarilla, geotecnia, estructuras, hidráulica, coeficiente de balasto, líneas de influencia, diseño.

Diseño parametrizado de alcantarillas cuadradas

MIGUEL PERALTA SALAS

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción.

Junio 2010

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN**

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción	5
Metodología	7
Resultados	30
Análisis de resultados	44
Conclusiones y recomendaciones	53
Apéndices	55
Anexos	85
Referencias	93

Prefacio

El tema desarrollado en el presente proyecto, corresponde al diseño estructural de alcantarillas cuadradas; así como de investigación acerca del comportamiento de estas estructuras, de manera que se analizó su comportamiento, desde el punto de vista geotécnico, estructural e hidráulico.

El proyecto presenta su justificación en la necesidad del Instituto Costarricense de Electricidad por contar con diseños paramétricos de alcantarillas, acordes con las especificaciones y exigencias de las cargas actuales, integrando en ellos filosofías y tecnologías contemporáneas. Por esto, los planos generados reemplazan los existentes de manera satisfactoria, pues son el resultado de una investigación realizada de acuerdo con los objetivos y necesidades planteados por dicha entidad.

Se presenta como objetivo primordial el diseño de las alcantarillas de concreto reforzado, integrando en ellas las nuevas solicitaciones de carga, nuevas geometrías y profundidades de relleno, a fin de aumentar las condiciones posibles de combinaciones por alcanzar.

En otro orden de cosas, el autor hace un reconocimiento en primera instancia a Dios, por la oportunidad de darle la vida para

poder llegar a este punto de su carrera, en la cual se culminó un largo camino de estudio con el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción. De la misma manera, el sustentante extiende un gran agradecimiento a sus padres, quienes lo apoyaron tanto moral como económicamente en la realización de sus estudios; igual reconocimiento hace al ICE, y, en especial, al Ing. Javier Villalobos Cordero, coordinador del área de ingeniería estructural y arquitectura de la UEN PySA, por la oportunidad brindada para realizar el presente trabajo.

También, se debe extender una gratitud a los ingenieros Adrian Chaverri Coto y Gustavo Rojas Montoya, ambos profesores de la escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por su ayuda incondicional tanto en la realización de este proyecto como en los años de vida estudiantil.

Resumen ejecutivo.

El trabajo realizado radicó en una serie de labores puntuales y limitadas, todas dirigidas a obtener el diseño y la parametrización de configuraciones de alcantarillas cuadradas.

Una alcantarilla es una estructura de paso, utilizada para canalizar un líquido de un lugar a otro: el objetivo del proyecto fue generar planos típicos para alcantarillas de 1, 2 y 3 celdas.

Los estudios que se hicieron para lograr los objetivos, incluida la parametrización, fueron medios para lograr este fin.

Para la realización del proyecto, se debió acudir a la ingeniería geotécnica, pues era necesario investigar sobre los tipos de suelos donde se colocarían las alcantarillas.

El Área de Ingeniería Geotécnica del ICE propuso utilizar tres tipos de suelo típicos, donde se pueden colocar las alcantarillas. Esta selección fue amparada en la experiencia de esta Área en este tipo de estructuras; por tanto, los suelos propuestos fueron: grava, arena y arcilla.

Se dispuso de bibliografía para encontrar las propiedades mecánicas de dichos suelos, como el peso específico, el ángulo de fricción y módulo de reacción o coeficiente de balasto. Cuando se obtuvieron estos valores de referencias bibliográficas tales como, el "*Braja Das*" o el "*Bowles*", se destiló la Tabla núm. 2 de la sección de resultados, de donde se obtienen los valores de grava media, arena limosa suelta y arcilla blanda.

Una vez escogidos los tipos de suelo, se planteó el modelo por utilizar mediante el software "SAP2000", para el cual se tenía una alternativa: una, con base en resortes, donde la constante de elongación de dicho resorte se obtiene a partir del módulo de reacción del suelo; la otra, utilizando apoyos convencionales en la parte inferior de la

estructura, como por ejemplo apoyos simples y articulaciones. Con los modelos anteriores, se estableció un estudio de acciones obtenidas para cada modelo, tomando en cuenta varios tipos de suelos para el modelo con resortes, además de un modelo con apoyos. De esta forma, se pudieron ver las diferencias en las acciones alcanzadas, tanto para un modelo con resortes, que contemplara diferentes suelos, cuanto para otro sin resortes. Los resultados arrojaron cambios hasta del 45% de diferencia en la carga axial, para estructuras modeladas con resortes contra otras modeladas con apoyos. En los momentos se encontraron cambios de hasta 40% en las acciones, al igual que en el cortante; además, se pudo observar que el cambio en las acciones para los diferentes suelos rondaba entre 3% a 5%, lo que implica que el tipo de suelo no es influyente en el comportamiento de la estructura. Así, se concluyó que el tipo de suelo no es importante para el modelo, pero su ausencia, (o sea, usar un modelo de apoyos y no de resortes) sí es significativa, a la hora de obtener las acciones de diseño.

Por esto, se escogió utilizar un modelo de resortes para todos los diseños, empleando un solo tipo de suelo (grava media), el cual es representativo de todos los suelos, en donde se podría llegar a construir esta estructura.

Una vez encontrado el suelo final por utilizar y el modelo por seguir, se prosiguió con las cargas que se aplicarán a la estructura, en la cual se inició con las cargas permanentes. Aquellas consisten en las cargas impuestas por los materiales de la estructura. Luego, se contemplaron las cargas temporales o vivas, que corresponden a los camiones de diseño por utilizar, que, para el caso del proyecto en cuestión, fueron cuatro: el vehículo de diseño HS-25, la vagoneta Roquera con un peso total de 39 t,

un transporte especial de 50 t y otro igual pero de 60 t.

Debido a un estudio de líneas de influencia, se determinó que el uso de la Vagoneta Roquera creaba los mayores momentos sobre la losa, de manera que se utilizó este vehículo para el diseño de las alcantarillas.

Una vez obtenido el vehículo de diseño, se debió observar cómo se distribuía el peso de la llanta del camión sobre la profundidad de relleno. (Esto aplicable para las alcantarillas que tuvieran relleno por encima de su losa superior.) En consecuencia, según el AASHTO, la carga de la llanta del camión se considera puntual de 0 a 0.6 m de profundidad, de 0.6 m a 2.5 m de profundidad, se distribuye dicha carga, en forma gradual, es decir, con una pendiente uniforme. De 2.5 m en adelante, ya no se contempla la carga viva, pues se supone, se ha distribuido completamente en el relleno; por ende, la estructura ya “no se da cuenta” de que por encima de ella está pasando un vehículo de diseño. Sin embargo, para los rangos de 0-0.6m, y de 0.6-2.5m, sí se necesitó realizar un estudio de cómo afectaba la carga viva a la estructura; por ello, se desarrolló un estudio de líneas de influencias puntuales y distribuidas (respectivamente), para los dos rangos de profundidad.

Con estas líneas de influencia se pretendía encontrar en qué lugar de las losas superior e inferior, y paredes, se producían las acciones máximas para el diseño. Para realizar esto, se tuvo que idear un sistema de posiciones de llanta, que consistió en proponer ciertos lugares “clave” sobre la longitud de la luz de la alcantarilla, con el fin de valorar en este punto las acciones “Pu”, “Vu”, “Mu”. Una vez obtenidas las acciones en ese punto, se trasladaba la llanta más cargada del camión a otro punto específico, propuesto anteriormente. Así, al final de la luz, se podía reconocer la posición de llanta en la cual se obtuvieron las mayores acciones.

Al final de este estudio, se pudo obtener las posiciones en donde se encontraban las acciones máximas para todas las longitudes de claro de losas, tanto para 1, 2 y 3 celdas.

Al concluir con la carga temporal, se continuó con la carga de relleno, aplicable solo a las alcantarillas que se encuentren

enterradas: la columna de material por encima de ellas, crea una carga aplicable a la losa superior de la estructura, la cual depende solamente del peso específico de suelo circundante.

La carga de empuje se emplea sobre las paredes de la estructura, en dirección horizontal, de manera que crea flexión sobre las paredes, lo que hace que ellas sufran del fenómeno de la “flexo-compresión”. Esta carga depende de la profundidad a la cual se vaya a utilizar la alcantarilla, al igual que del peso específico del suelo y del ángulo de fricción de este, según la teoría de “Rankine”, utilizada para esta sección.

El efecto de la carga hidrostática producida por un nivel freático existente en el sitio de la obra, no se contempla en el análisis de fuerzas de la estructura, pues se propone un sistema de construcción en el cual se confinen tanto las paredes como la losa inferior con grava. En la parte inferior de las paredes, se debe colocar un tubo de desagüe, el cual va a canalizar las aguas provenientes del nivel freático; así, no se crearán presiones de poro alrededor de las alcantarillas.

Con todas las cargas mencionadas anteriormente, se realizó el modelo final de análisis, del cual se obtuvo la base de datos de acciones, útil para realizar el diseño de las alcantarillas. Es importante recalcar que las combinaciones geométricas utilizadas (una combinación geométrica es la combinación de la medida de la luz de una losa contra la altura de las paredes; por ejemplo, una combinación de alcantarilla es, justamente, una alcantarilla de 1,5 m de luz con 0,8 m de altura), son obtenidas de planos de alcantarillado del MOPT, de los cuales se obtuvieron, de igual manera, las dimensiones de luces y alturas. Por ello, la base de datos fue realizada para estas combinaciones geométricas, de manera que no se puede obtener un diseño para una combinación, que no se encuentre entre las establecidas.

Con la base de datos concluida, se realizó el diseño estructural de los elementos, comprobando que cada uno de estos cumpliera su resistencia a la flexión, compresión, flexo-compresión y cortante.

Se debe mencionar, por aparte, el cortante, pues fue este el punto de revisión que más problemas dio a la hora del diseño: sus magnitudes podían llegar a ser tan grandes (alrededor de 120 t en algunos

casos), que el espesor de la losa debía ser gigante (aproximadamente 1 metro de espesor de losa) para poder soportar dicha acción. No obstante, aunque se lograra absorber el cortante, el espesor de la losa era tan desmedido que hacía que el diseño no fuera funcional.

Considerando esto último, se decidió utilizar ganchos de acero para aumentar la capacidad al cortante. Este acero solo se colocó en los lugares donde el diagrama de cortante indicaba que ahí existía el esfuerzo máximo, por lo que los ganchos solo se ubicaron en lugares estratégicos y no sobre toda la longitud de la losa superior o inferior.

Al terminar el diseño estructural, se dio parte para encontrar la capacidad hidráulica de la sección propuesta, de manera que, para la combinación de alcantarilla, se tenía un caudal asociado que ésta podía trasegar. A fin de obtener este resultado, fue necesario el estudio de distintos tipos de flujo, tomando como aceptado para los diseños realizados un tipo de flujo “*sub-crítico*”, en el cual el caudal se moviliza de forma laminar y sin turbulencia por dentro de la alcantarilla.

Con el afán de lograr este tipo de flujo, se debe mantener una pendiente de diseño menor a la pendiente crítica, al igual que un tirante crítico menor que el establecido.

Precisamente por este tema, se indagó en el estudio de los canales de flujo abiertos, para poder comprender el funcionamiento hidráulico de las alcantarillas, y con éste, la capacidad hidráulica que pueda trasegar.

La geometría de las alcantarillas va desde los 0.4 m de luz hasta 3,65 m, en la losa superior y la losa inferior, y desde 0,6 m hasta las 4,5 m, en lo que son paredes. El material por utilizar en el diseño es concreto premezclado, con una resistencia a la compresión pura de 280 kg/cm^2 , a los 28 días de colado: este valor fue tomado por escogencia a la hora del diseño, ya que de usar un valor menor, los espesores de las losas podrían sufrir las consecuencias. Este concreto debe cumplir con las especificaciones según las normas ASTM, las cuales norman la calidad de dicho material. El concreto es reforzado con varillas de acero grado G-60, las cuales tienen un esfuerzo de fluencia de 4200 kg/cm^2 . (Se

utilizó esta designación de acero por sollicitaciones de diseño.)

Finalmente, se realizaron los diseños de todas las combinaciones geométricas de alcantarilla, los cuales se reunieron en una serie de planos para 1, 2 y 3 celdas, en los que se compiló alrededor de 700 diseños distintos.

De esta manera, los planos y diseños realizados, serán de gran utilidad para el ICE, en los lugares donde necesite utilizar este tipo de estructuras.

Introducción

El proyecto realizado para la obtención del grado de licenciatura en Ingeniería en Construcción, fue realizado en el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), específicamente en el área de ingeniería estructural y arquitectura, de la UEN PySA: esta dependencia es la encargada de realizar todos los diseños estructurales y arquitectónicos de obras civiles referentes a la generación de energía.

El proyecto ejecutado se llama, "*Diseño parametrizado de alcantarillas cuadradas*", el cual consiste en el diseño de planos de distintos tipos de alcantarillas rectangulares, llamadas también "*alcantarillas de cuadro*", que pueden tener varias alturas, luces y rellenos, por lo que existen cientos de combinaciones posibles de alcantarillado para utilizar. El interés de la empresa por el proyecto radica en que estas estructuras son utilizadas por el ICE, en los proyectos de generación, en los momentos en que se está penetrando en algún terreno sobre el cual se necesite un paso necesario para vehículos, dado el desarrollo normal del proyecto, además de poder trasegar los equipos especiales que se necesitaran, dependiendo de la envergadura de la obra. De esta manera, el ICE pretende contar con planos que contengan diseños preestablecidos para diferentes claros, profundidad y capacidad hidráulica, de forma que, a la hora de necesitar una estructura así descrita, se pueda obtener inmediatamente el valor del diseño específico.

La razón por la cual se requiere hacer el proyecto en cuestión es porque son necesarios para el ICE, pues ellos tienen unos planos semejantes, pertenecientes al Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), con los diseños mencionados de alcantarillas; sin embargo, su elaboración se acerca a los años sesenta del siglo recién pasado, por lo que se considera que los diseños ahí planteados son obsoletos y antiguos, e incongruentes con las nuevas cargas de los vehículos empleados por el ICE. Además, los planos del MOPT contienen especificaciones de materiales y filosofías de diseño desactualizadas respecto de las tecnologías actuales. Por esta razón, se

pretende realizar los nuevos diseños, ya que el ICE necesita generar unos planos actualizados con las legislaciones vigentes.

Para la elaboración de dichos diseños, se debió iniciar con una gran investigación en las tres ramas de ingeniería civil asociadas a las alcantarillas, las cuales son geotecnia, estructuras e hidráulica.

La geotecnia posee relevancia en el proyecto pues es, en el suelo, donde se colocan las alcantarillas, y, dependiendo del prototipo por utilizar, ésta se podría encontrar con relleno, lo que le impone una carga adicional por peso propio del material superior; además, tanto las paredes como la losa inferior de las alcantarillas se encuentran confinadas por la masa de suelo, la que le impone, a su vez, carga de empuje a la estructura. (Es por esta razón que se investigaron aspectos geotécnicos.) Para la obtención de las cargas de diseño relacionadas a los suelos, se emplearon teorías de empuje "Rankine", tablas para la obtención de los parámetros de diseño de autores como Bowles, Braja Das y Jiménez Salas.

Por otro lado, el análisis estructural requirió de un estudio detallado del concepto de líneas de influencia, las cuales permitieron determinar los puntos más críticos donde se encontraron las acciones máximas.

El aspecto estructural se diseñó para resistir flexión, cortante, fuerza axial y acero por temperatura. El objetivo es poder obtener el diseño estructural extraído de una tabla, sin la necesidad de realizar dicho diseño cada vez que se ocupa una alcantarilla de este tipo.

Respecto de la parte estructural, se utilizaron las indicaciones establecidas por el ACI-318, para el diseño de concreto reforzado por el método LRFD, anotaciones del libro, "*Estructuras de Concreto*", de Arthur Nielson; además, se hizo acopio de otros autores como Edward Nawy, en su compilación llamada "*Concreto Reforzado*".

En el análisis hidráulico, se calculó cuánto sería el caudal máximo admisible para las secciones propuestas, de manera

que el flujo siempre se comportara de manera sub-crítica; de lo contrario, si se tuviera un flujo súper-crítico, va a existir turbulencia en la parte interna de la estructura, además de que la velocidad se aumenta, por lo que se puede crear bolsas de aire, remolinos y demás inconvenientes hidráulicos, que no son deseados en el comportamiento de las alcantarillas. La teoría empleada en este proceso es la referente al tirante crítico a la salida de la alcantarilla, tipo "2", según Richard French en su libro, "Hidráulica de canales abiertos". Al existir un tirante crítico, nos lleva a los conceptos de pendiente crítica, juntamente con los conceptos de área y perímetro mojado y demás características de índole hidráulico, los cuales fueron obtenidos por autor Ven te Chow.

Al realizar un enfoque práctico de toda la bibliografía consultada, amén de los trabajos de investigación, se logró realizar los diseños esperados, para los cuales se tuvo que pasar por una serie de objetivos específicos para cada área. Al unir toda la investigación, se obtuvo un diseño final de alcantarillas, capaz de cumplir con los requerimientos más exigentes, según la normativa en vigor y las especificaciones del ICE, creando así estructuras capaces de satisfacer las necesidades de los proyectos tan ambiciosos que dicha empresa requiere.

Metodología

En el trabajo realizado, el objetivo primordial fue la realización de los diseños de las alcantarillas, adaptados a las condiciones actuales de carga y servicio, devengadas tanto por los vehículos utilizados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), como por los asignados según la normativa en vigor.

De esta manera, estas estructuras de "paso", o también llamadas cruces de carreteras, son ideales para poder crear un lugar seguro por donde pasen los vehículos, que pueden transportar tanto insumos materiales como capital humano, razón por la cual se obtiene un uso verdaderamente importante de las estructuras por diseñar.

Así, el ICE utiliza estas alcantarillas como paso de vehículos para poder llegar a los lugares de difícil acceso, pues en estos parajes se da la elaboración de sus proyectos para la producción de energía, y, en general, en cualquier sitio donde sea útil una estructura de este calibre.

Es trascendente recalcar que una alcantarilla es una estructura que canaliza las aguas de tipo servidas o fluviales, desde el sitio de emanación hasta el sitio en donde se necesita verter dicho líquido (French.R). En nuestro caso particular, las alcantarillas sirven para realizar pasos sobre ríos o quebradas, por donde el ICE necesite pasar grandes maquinarias para poder llegar a los lugares de construcción de los distintos tipos de proyectos, que desarrolla esta empresa.

Debe resaltarse que, para la elaboración del presente proyecto, se utilizaron las mismas dimensiones aportadas por los planos originales, los cuales fueron elaborados por el MOPT, alrededor de la década de los sesenta: cuentan con un conjunto de tres planos, uno por cada tipo de alcantarilla, y de ellos se puede obtener el espesor de las losas, las dimensiones de alcantarilla, además de el acero de refuerzos que se utilizaría para la elaboración de las mismas alcantarillas; sin embargo, no explica para qué tipos de cargas temporales están hechos los diseños, ni tampoco aporta la longitud de la columna de tierra provocada por el

relleno, entre otras cosas. Por esto, para los diseños nuevos, se tomaron las mismas luces, alturas y rellenos de los planos iniciales, adicionándole longitudes de rellenos específicas para cada combinación geométrica de alcantarillado.

Precisamente por ello, existe un número determinado de combinaciones de alcantarillas, cuyos resultados obtenidos son para estas combinaciones existentes. (El proyecto no contempla otros valores de parámetros de diseño, fuera del rango establecido desde el principio; o sea, no se puede obtener un diseño de alcantarillado, que no sea para las dimensiones ya establecidas.)

Un aspecto muy importante a la hora del diseño de las alcantarillas ya mencionadas, es el insumo con el cual se diseñaron, ya que es frecuente encontrarlas en distintos materiales, especialmente en acero y concreto; no obstante, para fines exclusivos de este proyecto, el material con el cual se irán a construir estas estructuras de paso, es concreto premezclado, con una resistencia a la compresión pura de 280 kg/cm², a los 28 días de colado. (Este valor fue tomado por escogencia a la hora del diseño, pues, de usar un valor menor, los espesores de las losas podrían sufrir las consecuencias.) Este concreto debe cumplir con las especificaciones según las normas ASTM, las cuales norman la calidad de dicho material. El concreto es reforzado con varillas de acero grado G-60, que tienen un esfuerzo de fluencia de 4200 kg/cm². (Se utiliza esta designación de acero por solicitudes de diseño.)

La geometría de las alcantarillas varía obedeciendo al lugar de instalación, y a la utilización para las que se requieren, las más comunes son las trapezoidales, las circulares, las rectangulares y las mixtas (como las de tipo herradura); empero, este proyecto solo contempla una geometría específica para las alcantarillas.

Dimensiones de alcantarillas

Las alcantarillas por diseñar son de geometría rectangular, también conocidas como “alcantarillas de cuadro”, que cuentan con distintos tipos de celdas, luces, alturas y rellenos, según la configuración que se ha de utilizar. Sus dimensiones van a ser siempre estándares, y el proyecto realizado no contempla ninguna otra dimensión de alcantarilla que no sean las especificadas en este documento. (Ver, Geometría de alcantarillas.)

El esquema general de las alcantarillas que se utilizaron es el siguiente:

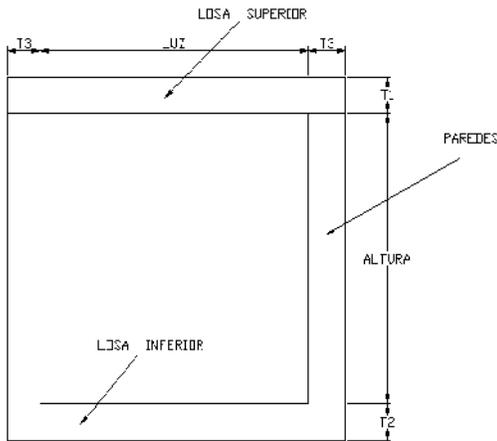


Figura 1: nomenclatura de elementos de las alcantarillas.

Una vez que se tiene claro las dimensiones de las alcantarillas por diseñar, se debió realizar un análisis profundo acerca de todos los factores que intervinieron en el diseño, los cuales se subdividen en varios grupos, de acuerdo con la especialidad ingenieril a la cual pertenezcan. De tal manera, los estudios para obtener el diseño final dependen de la ingeniería geotécnica, estructural, hidráulica, ingeniería de tránsito e hidrología. Una vez con esta información, se procede a confeccionar los diseños correspondientes para cada combinación geométrica existente. Sin embargo, es importante resaltar que los estudios de tránsito e hidrológico fueron aportados por el ICE, pues ellos suministraron los

vehículos por utilizar, además de la frecuencia con que estos podrían pasar por el sitio; asimismo, los rangos de caudales de los lugares donde se podrían construir estas estructuras en algún determinado momento. De este modo, se analizará cada uno de los tres restantes campos ingenieriles por aparte.

Análisis geotécnico

Para la realización del estudio geotécnico, se debe tener en claro el concepto de geotecnia: ampliamente, es la rama de la ingeniería civil o geológica que se dedica a estudiar las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la tierra (suelos y rocas), (ref 1).

En el caso particular del proyecto en cuestión, la geotecnia juega un papel estratégico, puesto que el material confina a la alcantarilla y le ejerce presiones sobre sus paredes y su losa superior (en el caso de que exista algún relleno). Así, el tipo de material afecta de alguna manera el comportamiento estructural de la alcantarilla. Para este proyecto en particular, el material por utilizar es solamente tipo “suelo”, y no se contemplan “rocas”, según premisas de diseño establecidas por el Área de ingeniería Geotécnica del ICE, ya que la probabilidad de colocar una alcantarilla sobre rocas es muy leve, acorde con la experiencia de los ingenieros allí establecidos.

A continuación, se presenta los parámetros que fueron requeridos para el análisis geotécnico del proyecto.

Parámetros para análisis

Los parámetros por los cuales se tuvo que decidir a la hora de realizar el análisis, fue la escogencia de los tipos de suelo. Para cada uno de estos se necesitó los valores de la densidad específica, ángulo de fricción y coeficiente de balasto. En seguida, se hace un recuento de los criterios utilizados en la elaboración de los

diseños de las alcantarillas, y de cómo los parámetros anteriores fueron analizados para su interpretación en el proyecto.

Tipos de suelo:

Un factor de suma importancia en el diseño, es el suelo, el cual siempre confina las paredes de la estructura, además de que también juega un papel relevante sobre la losa superior de la alcantarilla, ya que es sobre esta que se le coloca el relleno a la estructura. Por ello, el suelo debe soportar tanto la estructura como las sobrepresiones en las paredes y losas. De esta manera, es evidente que cada suelo va a suministrar sobrepresiones diferentes, dependiendo de la densidad del mismo suelo, lo que nos lleva a la escogencia de los tipos de suelos por utilizar. Esta selección se hacía inapropiada pues no se puede escoger un tipo de material específico, dado que las alcantarillas deben ser útiles en cualquier lugar del país, aunque nuestro territorio nacional tenga tanta diversidad de suelos.

Con este problema planteado, se recurrió a la experiencia en estos tipos de estructuras del Centro de Diseño de la UEN PySA en el Área de Ingeniería Geotécnica, que proporcionó datos que revelaban que, en la mayoría de los casos en que se han tenido que hacer estructuras de esta índole, ha sido en suelos de tipo sedimentario: finalmente, se agruparon en arcillas, arenas y gravas.

Con esta información, se dispuso buscar propiedades que caracterizaran de forma segura los materiales, las cuales se clasifican a continuación:

Peso específico:

El peso específico es importante porque nos indica la relación materia-volumen del insumo que se va a utilizar en el diseño. La función de este parámetro en el proyecto es la de dar el peso de la columna de material que se encuentra por encima de la losa superior; por tanto, cuanto más profundo sea el nivel de desplante de la alcantarilla, más peso es el que se le va a imponer a la parte superior de la estructura. Esto, por ende, causa cambios en el análisis de las fuerzas de la misma estructura; además, el peso específico es también utilizado para la obtención del empuje lateral, el cual se aplica a las paredes de la estructura. (Estas razones le otorgan importancia al

peso específico del material empleado en el proyecto.)

En consecuencia, el peso específico se define como el peso del suelo por volumen unitario: el volumen se toma como fijo, y el peso es el que varía con respecto al agua y a los vacíos inherentes al material. (Tomado de ref 2.)

En el caso particular del proyecto, se investigó el peso específico de las arcillas, gravas y arenas que fueron descritas por el área de Geotecnia, cuyos valores fueron derivados de las siguientes tablas:

Tipo de suelo	Relación de vacíos e	Contenido de agua natural en condición saturada (%)	Peso específico seco, γ	
			(lb/ft ³)	(kN/m ³)
Arena uniforme suelta	0.8	30	92	14.5
Arena uniforme densa	0.45	16	115	18
Arena limosa suelta de grano anguloso	0.65	25	102	16
Arena limosa densa de grano anguloso	0.4	15	120	19
Arcilla dura	0.6	21	108	17
Arcilla suave	0.9-1.4	30-50	73-92	11.5-14.5
Loes	0.9	25	86	13.5
Arcilla orgánica suave	2.5-3.2	90-120	33-51	6-8
Morrena glacial	0.3	10	134	21

Tabla 1: Valores del peso específico para diferentes tipos de suelo. (Bowles.)

Al ver los datos de la tabla anterior, se toman los valores del peso específico para las arenas y arcillas. En relación con los valores de las gravas, se utilizó los siguientes:

Tipos de grava a utilizar	
Grava fina:	2000 kg/cm ² *
Grava media:	2200 kg/cm ² *
Grava gruesa:	2400 kg/cm ² *

Tabla 2:Tipos de grava por utilizar. *(Tomado de Ref 3.)

Angulo de fricción:

El ángulo de fricción depende de la uniformidad de las partículas del suelo, del tamaño y forma de los granos, además de que se le considera constante aunque no lo es. (Villalaz.)

Para obtener el ángulo de fricción de los tres tipos de materiales que se usaron, se recurrió a estudios realizados

anteriormente, y a tablas publicadas en la bibliografía consultada. Se obtuvieron valores típicos de ángulos de fricción para arcilla, arena y grava, los cuales se presentan a continuación:

Representative values for angle of internal friction ϕ

Soil	Type of test*		
	Unconsolidated-undrained, U	Consolidated-undrained, CU	Consolidated-drained, CD
Gravel			
Medium size	40-53°		40-55°
Sandy	35-50°		35-50°
Sand			
Loose dry	26-34°		
Loose saturated	28-34°		
Dense dry	35-46°		43-50°
Dense saturated	1-2° less than dense dry		43-50°
Silt or silty sand			
Loose	20-22°		27-30°
Dense	25-30°		30-35°
Clay	0° if saturated	3-20°	20-42°

Tabla 3: Valores del ángulo de fricción para diferentes tipos de suelo. (Bowles.)

Los valores que se decidió utilizar se presentan en la sección de resultados en los cuadros 1 y 2.

Empuje del suelo:

Con el ángulo de fricción, se debe obtener el empuje que el suelo le impone a las paredes de la alcantarilla, cuyas magnitudes son apreciables al hacer el análisis de fuerzas sobre la estructura. Para la obtención de estas fuerzas se utilizó la teoría de "Rankine", que consiste en aportar una carga lateral, dependiendo del coeficiente de reposo del suelo, además de la altura y del peso específico del mismo suelo.

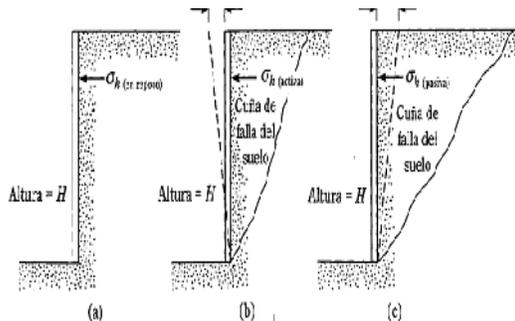


Figura 2: empuje lateral de tierras sobre un muro de retención. (B.Das.)

Este tipo de presiones laterales se ligan a varias condiciones como el tipo de muros que se van a evaluar, o paredes como lo es en el caso de las alcantarillas, en cuanto a los valores de resistencia al corte, al peso específico del suelo, al agua que se encuentre circundante a la estructura, entre otras. (Tomado de ref 4.)

Los empujes en el terreno se dividen respecto de la condición de soporte lateral que se tenga; además, de si existen desplazamientos horizontales o no. De esta forma, existen tres tipos de empujes laterales: el empuje activo, el pasivo y el de reposo.

Para el caso particular de las alcantarillas, se toma el empuje en reposo, ya que las paredes son las estructuras, que son las que toman las fuerzas laterales: se equilibran a ambos lados de la alcantarilla, de modo tal que no existen desplazamientos horizontales, por lo que el empuje siempre va a permanecer estable. (Se darían solo deformaciones por flexión.)

Para estimar el empuje en reposo, se debió utilizar el coeficiente de reposo "ko", que se calculó según la teoría de Jaky, propuesta en el año 1944, la cual propone la siguiente ecuación para ko:

$$k_o = 1 - \text{sen } \theta \quad \text{Ecuación 1}$$

Con esta ecuación, se obtiene el coeficiente de reposo, el cual más adelante fue de gran utilidad para la obtención de la carga de empuje de tierras en reposo, que se encuentra en la sección del análisis estructural.

Coefficiente de balasto:

También conocido como "coeficiente de reacción del suelo", o "coeficiente de Sulzberger". Asocia la tensión transmitida al suelo por medio de una placa rígida de 30,5 cm de diámetro, y una deformación de 0,127 cm en el suelo, producida por esta carga; así, relaciona la carga y aplica "q" con el asentamiento de la misma "y", y se identifica con la letra "Cb". (A.Leoni.)

Una de las funciones de este coeficiente es ayudar a crear modelos más realistas a la hora de modelar una interface entresuelo-estructura, de manera que se cambian los apoyos estructurales convencionales (como empotramientos o articulaciones), por resortes que modelan

mejor la forma de interacción de las estructuras con el suelo.

La forma de obtener este parámetro de diseño es mediante una prueba de campo llamada, "Prueba de Placas", la cual consiste en generar una presión capaz de penetrar 0,127 cm, una placa de 30.5 cm de diámetro. Las unidades del coeficiente de balasto son [kg/m3].

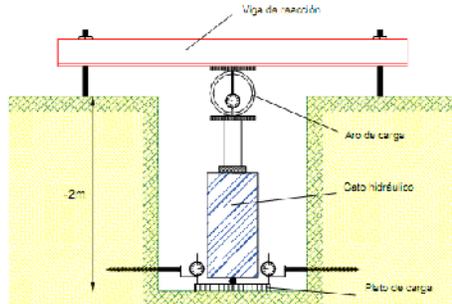


Figura 3: Diagrama de Prueba de Placas.

La manera de incorporar este concepto al proyecto fue colocando, en el perímetro en contacto con el suelo, los apoyos tipo resorte, que se comportan de una manera elástica, cumpliendo así la ley de Hooke:

$$F = k \times \Delta_l \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- F: Fuerza
- k: constante de elongación
- Δ_l : Deformación del resorte.

Aplicando esta fórmula al caso de las alcantarillas, "F" son las fuerzas que se le aplican a la estructura por medio de las cargas, " Δ_l " es la deformación que puede ocurrir en los elementos de la estructura, "k", es el producto entre coeficiente de balasto y el área tributaria para cada resorte que se vaya a evaluar; de manera que:

$$k = C_b \times A \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- k: constante de elongación para resorte de modelo estructural.
- C_b : coeficiente de balasto
- A: área tributaria de cada resorte.

Se modela la alcantarilla en el programa de análisis estructural SAP 2000 v12. Se divide en diez la losa inferior como las paredes, de modo tal que el ancho tributario para cada resorte es de un décimo de la longitud de la losa o pared, y el ancho tributario es de 1 metro, pues los

diseños por realizar son para un metro de alcantarilla.

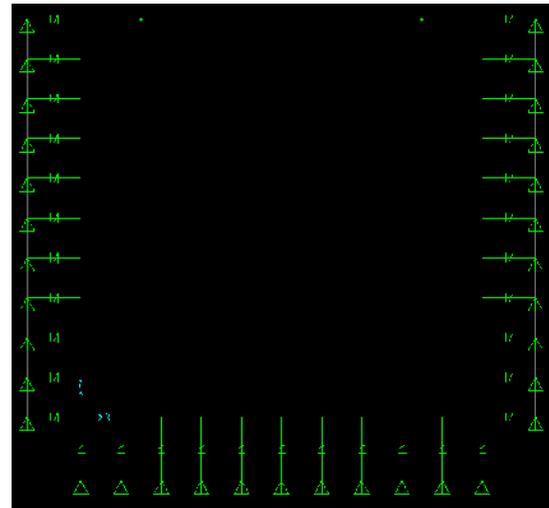


Figura 4: Diagrama de resortes en la alcantarilla.

Se investigaron valores típicos de coeficientes de balasto para los tres tipos de suelos por tomar en cuenta, haciendo uso de la siguiente tabla:

TIPO DE SUELO	Módulo de Deformación E_s (kg/cm ²)	Módulo de reacción vertical K_v (kg/cm ³)
** Suelo fangoso	11.00 a 33.00	0.50 a 1.50
* Arena seca o húmeda, suelta (N_{SP} : 3 a 9)	0.16H a 0.48H	1.20 a 3.60
* Arena seca o húmeda, media (N_{SP} : 9 a 30)	0.48H a 1.60H	3.60 a 12.00
* Arena seca o húmeda, densa (N_{SP} : 30 a 50)	1.60H a 3.20H	12.00 a 24.00
* Grava fina con arena fina	1.07H a 1.33H	8.00 a 10.00
* Grava media con arena fina	1.33H a 1.60H	10.00 a 12.00
* Grava media con arena gruesa	1.60H a 2.00H	12.00 a 15.00
* Grava gruesa con arena gruesa	2.00H a 2.66H	15.00 a 20.00
* Grava gruesa firmemente estratificada	2.66H a 5.32H	20.00 a 40.00
** Arcilla blanda (q_c : 0.25 a 0.50 kg/cm ²)	15 a 30	0.65 a 1.30
** Arcilla media (q_c : 0.50 a 2.00 kg/cm ²)	30 a 90	1.30 a 4.00
** Arcilla compacta (q_c : 2.00 a 4.00 kg/cm ²)	90 a 180	4.00 a 8.00
** Arcilla dura (q_c : 4.00 a 10.00 kg/cm ²)	180 a 480	8.00 a 21.00

H: Profundidad del pozo de cimentación en cm
 *: Los terrenos granulares si están sumergidos se tomarán con E_s o K_v igual a los del cuadro multiplicados por 0.6
 **: Los valores considerados corresponden a cargas de corta duración. Si se consideran cargas permanentes que produzcan V y M y ha de tener lugar la consolidación, se multiplican los valores de E_s y K_v por 0.25

Tabla 4: Valores del coeficiente de balasto para diferentes tipos de suelo. (CSCR)

Al utilizar todos los parámetros anteriores, se puede llevar a cabo el diseño de las alcantarillas, con la seguridad de que se tomaron los requerimientos necesarios para tal fin, y que a estos se les dio una un análisis adecuado.

Es necesario recalcar que en este proyecto no se contemplan asentamientos ni consolidaciones, por el hecho de que eso es una acción meramente inherente al sitio de construcción de la estructura, y al

ser éste un proyecto parametrizado, útil en cualquier lugar del país, no se puede generalizar un tipo de material para realizar dichas acciones. De igual manera, se contó con la premisa de que en una estructura como una alcantarilla, no se contemplan los asentamientos, por la razón de que dicha estructura desplaza una masa de material, que, por sí solo, tiene un peso adherente; al cambiar ese volumen de material por la estructura, el suelo no percibe la diferencia entre el peso del material que tenía inicialmente y la alcantarilla que lo reemplazó: en algunos casos, es más pesado el suelo excavado que la estructura restablecida, de manera que se espera que el material soporte siempre el peso de las alcantarillas, sin crear asentamientos.

Análisis estructural

Las cargas que se tomaron en cuenta para la elaboración de los diseños fueron estas: carga permanente, carga temporal, carga de empuje, carga de relleno, carga de sismo, carga por nivel freático. Todas ellas se explican a continuación:

Carga Permanente:

(También llamada carga muerta.) Es la carga perteneciente al peso de los elementos utilizados para la construcción de la estructura. Para este caso en particular se reducen a dos tipos de materiales, a saber:

Concreto: Es una mezcla pastosa que tiene una textura líquida, por lo que puede tomar casi cualquier forma posible, y una vez seco, se rigidiza hasta alcanzar la resistencia para la cual fue diseñado. El peso general del concreto es de 2300 kg/m³, pero que incluye tanto el peso del concreto, como el del acero que lo refuerza. (Este valor se utilizó para el diseño en cuestión.)

Acero de refuerzo: El acero por utilizar en este proyecto es acero de varillas, con la especificación ASTM A-706 Gr 60, que tiene una resistencia a la fluencia de 4200 kg/cm². Este acero se empleará para reforzar el concreto, de

manera que la alcantarilla sea lo suficientemente resistente para poder soportar las acciones impuestas. El peso del acero por utilizar en el diseño es de 7850 kg/m³.

Carga temporal:

(También llamada carga viva.) Es la sobrecarga que se le impone a una estructura, cuya magnitud depende de la utilidad que se le dé al diseño que se debe realizar.

En el caso del proyecto de diseño de alcantarillas, la carga temporal juega un papel predominante en las estructuras superficiales, no así en las profundas, pues la carga se disipa con la profundidad.

Debido a que la alcantarilla es una estructura de paso, la utilidad principal es, como su nombre lo dice, dar paso a los vehículos que necesiten transitarse por el lugar donde se construyan, de modo que sea completamente confiable y seguro el trasiego tanto de vehículos de circulación estándar, como los equipos especiales utilizados por el ICE en la construcción de sus proyectos.

En el diseño realizado, se utiliza varios tipos de cargas vivas, las cuales se enumeran a continuación:

- Vagoneta roquera Mack RD 688-sx, con un peso máximo de 39 ton. Denominada "Rockera".(ref 8)
- Transporte de 50 ton. (ref 8)
- Transporte de 60 ton. (ref 8)
- Vehículo diseño HS-25, con un peso máximo de 32.7 ton.(AASHTO).

Se debe aclarar que no se diseñó para los cuatro tipos de vehículos, sino que se tomó el vehículo que ejerciera las acciones más críticas sobre los elementos de la alcantarilla. Así, se resguardaba la posibilidad de que cualesquiera de los cuatro vehículos estuviera cubierta en el diseño. Para poder decidir cuál camión de diseño utilizar, se determinó la línea de influencia para cada una de las acciones en los elementos, y se tomaron todos los camiones: el que produjo las acciones máximas fue el que se eligió para realizar el diseño. Por tanto, se tuvieron que contemplar varios parámetros para la obtención final de la carga viva, los cuales se explican a continuación:

Impacto:

El impacto no es una carga; es un porcentaje que se le adiciona a la carga viva; es un incremento que se le aplica a la carga de rueda estática para tomar en cuenta el golpe por las cargas de las ruedas en los equipos en movimiento. (AASHTO, LRFD, 2004. Apartado 3.8.2). Este incremento se da por lo general por el choque entre las ruedas del vehículo y las discontinuidades de la superficie de rodamiento, lo que provoca el impacto mencionado; además, el solo hecho de ser una carga móvil, incrementa la acción estática. Para obtener el porcentaje de impacto, se necesitaron varias premisas:

Si la longitud de losa superior es menor de 45 cm, el porcentaje de impacto por utilizar es de 30%.

Si la longitud de la losa sobrepasa los 45 cm, entonces, se debe utilizar la siguiente fórmula:

$$I = \frac{50}{L+125} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde

I: porcentaje de impacto

L: ancho de losa superior

Es importante resaltar que la fórmula anterior no puede exceder el 30%, ya que este es el valor máximo probable para el impacto sobre la carga temporal. Otro aspecto, que se ha de tener en cuenta, es que el impacto se calcula sólo para las estructuras que tengan de 0 a 2,5 m de columna de relleno, sobre su losa superior. En consecuencia, a las alcantarillas con más de 2,5 m de relleno, se les aplicó un porcentaje de impacto igual a 0%.

Para los vehículos especiales, como el transporte de 50 y 60 toneladas, se puede controlar el porcentaje de impacto, pues al ser camiones precisamente especiales, se les solicita que no transiten a más de una velocidad establecida; por tanto, el valor de impacto para estos es de un 10%.

Finalmente, una vez obtenido el porcentaje de impacto, se le adiciona a la carga viva, con el objetivo de incrementar este valor.

Líneas de influencia

Una línea de influencia es un gráfico donde se puede localizar las acciones máximas (axial, momento, cortante), para un punto fijo de la estructura, realizando

un análisis de su comportamiento, mientras una carga unitaria móvil se desplaza por la longitud del elemento por analizar. (Tomado ref 9)

Las líneas de influencia son utilizadas, cuando en la estructura existen cargas móviles sobre ésta. Aquellas son muy usadas en el diseño de puentes, vigas carrileras, y cualquier estructura en la que se tenga un movimiento de cargas vivas.

Dados los tres tipos de rellenos que se generaron a partir del análisis del relleno (véase Carga de Relleno), se toma en cuenta las disposiciones establecidas por el AASHTO, en cuanto a la profundidad de la carga con respecto a la profundidad (AASHTO, LRFD, 2004. Apartado 6.4.1). Así las cosas, se encuentra que, para este proyecto, existe dos tipos de líneas de influencia, las que se generan de una carga puntual (o sea, con un relleno de 0 a 60 cm de profundidad), y las provenientes de las cargas distribuidas, producto de la distribución de la carga temporal, en el suelo de sitio, conforme la profundidad

Línea de influencia para carga puntual

Se generó a partir del concepto de líneas de influencia, citado en el apartado anterior: las acciones aquí obtenidas son válidas para alcantarillas con rellenos menores a 1 m de profundidad. La carga para obtener estas líneas se colocó sobre la losa superior, pues es solo ahí donde se echa peso a la alcantarilla con la carga viva. Sin embargo, esta carga genera acciones sobre todos los elementos del sistema.

Para producir la línea de influencia, se tomó varios puntos fijos en la losa superior (específicamente los lugares donde se localizaban los apoyos), y se evaluó en ese lugar, el cambio de las acciones conforme el movimiento de la carga unitaria. Gracias a ello, se obtuvieron distintos gráficos de líneas de influencia para distintas posiciones de la losa, facilitando así la escogencia de la línea más significativa para el proyecto. De manera que se obtuvieron magnitudes de fuerza axial, cortante y momento, para todos los elementos de la alcantarilla.

Se debe resaltar que estas líneas de influencia de carga puntual fueron utilizadas para los tres tipos de celdas existentes en el proyecto, ya que su única

limitación es que no se exceda 1 m de profundidad, y nada tiene que ver la cantidad de celdas.

Línea de influencia para carga distribuida

Estas líneas de influencia nacen de la zona intermedia de rellenos, donde la carga se distribuye en el suelo, con respecto a la profundidad. Esto es que, de acuerdo con la profundidad en la que se encuentre la alcantarilla (siempre que esté entre 1 y 2,5 m), tanto la magnitud, como la franja de carga distribuida, es cambiante. Por esto, se realizaron distintas pruebas, que consistían en obtener, mediante el programa de análisis estructural SAP 2000, la fuerza axial, momento y cortante, que sufría cada una de las alcantarillas, si se aumentaba, paulatinamente, el relleno desde 1 m hasta los 2,5 m de profundidad, y si se movía la carga viva a lo largo de la misma, colocando esta en las posiciones de llanta que se muestran a continuación (ver figura 7,8,9). Con esto, fue posible ver cómo las acciones cambiaban según la profundidad establecida, al igual que la longitud de franja de carga. Este ejercicio se realizó tanto para dos celdas como para tres, puesto que estas, por ser más anchas (ello porque la misma luz hay que multiplicarla por dos o tres, según el número de celdas), creaban losas bastante grandes con respecto a la configuración de una celda. Con esto podía suceder que más de una llanta entrara en la losa, lo que afectaría la longitud de la franja de carga, pues ya no solo sería la franja de una llanta, sino de dos. En las alcantarillas de una celda no se realizó este procedimiento, pues, al ser su losa superior tan relativamente pequeña, en comparación con las de dos y tres celdas, se daba que siempre que aquella primera se encontraba por debajo de un metro de relleno, toda la luz se hallaba cargada, lo que producía que su carga fuera uniformemente distribuida, y no en franjas de carga, que es lo que da origen a las líneas de influencia de carga distribuida.

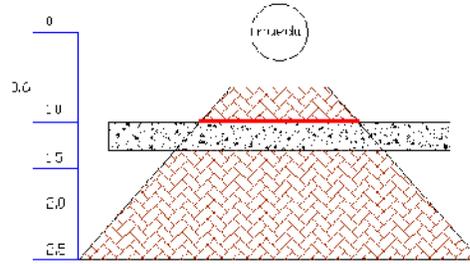


Figura 5: diagrama de franjas de carga para una rueda.

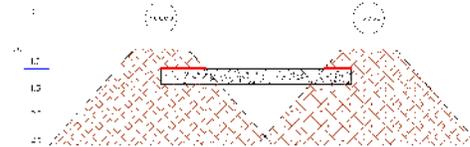


Figura 6: diagrama de franjas de carga para dos ruedas

Las pendientes de los gráficos anteriores provienen de la ecuación 7, la cual explica cómo se disipa la carga con respecto a la profundidad, y entonces, como se agranda la franja de carga conforme se avanza en el relleno. Por esta razón, en el gráfico se puede ver cómo cambia la distancia horizontal de la pirámide, desde la cota 0,6m hasta la 2,5m.

Se recolectaron los datos provenientes del software, para dos y tres celdas, respectivamente. Estos datos fueron evaluados para aumentos graduales de 50 cm a la vez; o sea, se evaluó cada alcantarilla para los rellenos de 0.6, 1, 1.5, 2 y 2.5 m. Para cada uno de estos rellenos se realizó el estudio de la línea de influencia para seis lugares diferentes de posiciones de la llanta del vehículo, lo cual dio como resultado más de 600 valores de acciones, a los que se les dio un tratamiento estadístico para obtener, finalmente, las posiciones de la llanta en donde se ejercen los mayores esfuerzos.

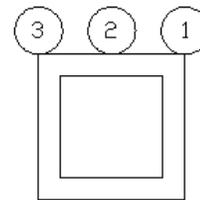


Figura 7: posiciones de llanta para una celda.

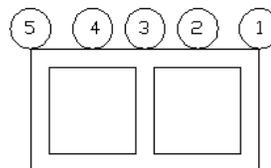


Figura 8: posiciones de llanta para dos celdas

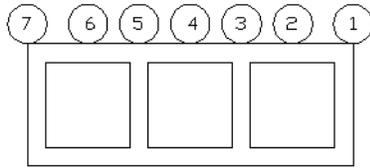


Figura 9: posiciones de llanta para tres celdas

Nota: los números corresponden a la posición de la llanta principal, sobre la alcantarilla, siendo la llanta principal la que está más cargada de todo el camión de diseño. Se dispuso un sentido de circulación del camión en la dirección de derecha a izquierda.

Una vez obtenida la línea de influencia para el rango de 1 a 2,5 m de profundidad, se hace la misma labor anterior pero ahora para profundidades mayores a los 2,5 m; ello, por cuanto se considera que toda la losa está uniformemente cargada: no se toma en cuenta la carga viva en el diseño, pues ya la profundidad del relleno distribuyó la carga misma, al ser colocada en la superficie por el camión de diseño.

Con lo anterior, se obtuvo las posiciones de llantas que provocan las acciones máximas para cada elemento de la alcantarilla, contemplando en éstas, longitud de luz, profundidad de relleno y capacidad de disipación de carga.

Distribución de carga viva:

La utilización de rellenos hace que se presente un comportamiento de disipación de carga viva con respecto a la profundidad de relleno, utilizada en el diseño de las alcantarillas. De esta forma, cuanto más profundo se encuentra la losa superior, menos es la carga que recibe; a la vez, la carga cambia de puntual a distribuida, ampliando su franja de carga distribuida, en función de la profundidad.

Según el "American Association of State Highway and Transportation Officials", por sus siglas "AASHTO", se indica la forma cómo se debe disipar la carga conforme la profundidad:

De 0 a 0,6 m de relleno: colocar la carga viva como una carga puntual sobre la losa superior.

De 0,6 a 2,5 m de relleno: en este tramo de relleno, la carga se disipa en forma triangular, de manera que ésta sigue una pendiente, sobre la cual, mientras más se acerque el valor del relleno a 2,5 m, el

área de contacto de la carga se amplía, hasta convertirse en una carga uniforme distribuida. Así, cuanto más grande sea el área de contacto, la magnitud de la carga es menor, pues está repartida en más área. La forma cómo se disminuye la magnitud de dicha carga es:

$$w = \frac{4P}{7z} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde

w: magnitud de carga distribuida [kg/m]

P: carga puntual proveniente de los camiones de diseño. [kg]

z: profundidad de relleno hasta la losa superior. [m].

La longitud de franja en donde se distribuye la carga se obtuvo, al despejar la incógnita "z" de la fórmula anterior; de tal suerte, se pudo obtener las cotas horizontales para cada profundidad deseada entre 1 y 2,5 m.

Este estudio de las dimensiones de las franjas se hace con el fin de poder ver gráficamente cómo aumenta la distancia de franja con respecto a la profundidad. A continuación, se presenta cómo se distribuye la carga en forma triangular con respecto a la profundidad: el rectángulo horizontal es la losa superior de una alcantarilla, y la franja roja es la distancia en la que se carga la losa, cuando se tiene un relleno de un metro. Por tanto, se puede apreciar que, mientras más profunda se encuentre la losa superior, esta franja roja se hace más grande, lo cual provoca que la magnitud de la carga sea menor.

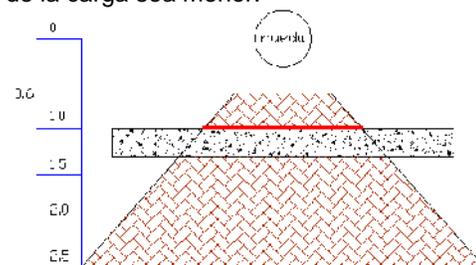


Figura 13: diagrama de cambio de franjas de carga con respecto a la profundidad.

De esta manera, se pudo observar cómo la longitud señalada en rojo, simboliza la distancia, cargada en ese punto, de la losa superior de la alcantarilla, y cómo ésta cambia con respecto a la profundidad del relleno.

Con lo comentado anteriormente sobre la columna de tierra de material sobre las alcantarillas, se entiende que fue

una carga de suma importancia para el diseño realizado.

Carga de empuje:

El empuje del suelo es la presión que ejerce la columna de material, que se encuentra a los lados de los elementos de la estructura. Éste se obtiene a partir del coeficiente de empuje, el cual, una vez que se ha alcanzado, se utilizó para calcular el empuje en reposo, que es producto de:

$$E_o = \frac{1}{2} \gamma k_o H \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

- γ: peso específico
- Ko: coeficiente de reposo
- H: nivel de desplante.

En el caso de las alcantarillas, el nivel de desplante se compone por suma de las cotas de la altura de la pared de la alcantarilla y la profundidad del relleno que se utilizó para su diseño.

Como el suelo circundante rodea la estructura, se tiene que este empuje se da en las dos paredes de la alcantarilla, formando un triángulo de presiones, en el caso cuando no se tiene relleno sobre la losa superior, y haciendo un trapecio de presiones, cuando sí existe relleno sobre aquella losa. Así las cosas, el diagrama de fuerzas para los empujes del suelo es el siguiente:

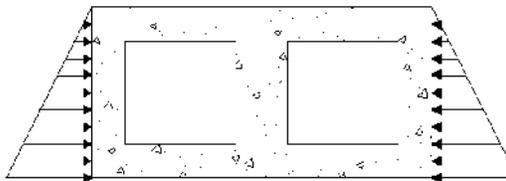


Figura 10: empuje lateral superficial. Triángulo de presiones.

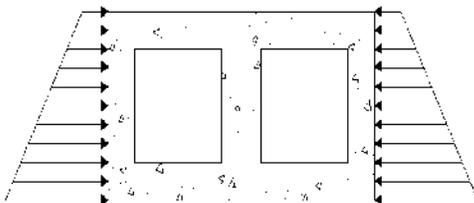


Figura 11: empuje lateral con forme la profundidad de relleno. Trapecio de presiones.

Carga de relleno:

La carga de relleno se da cuando la estructura se encuentra confinada por completo por el material circundante: sobre las paredes se ejerce la carga de empuje, y sobre la losa superior de la alcantarilla, se comienza a acumular una columna de material, la cual, cuanto más grande sea, le imprime más carga a la losa. La magnitud de esta carga está en función del peso específico del suelo; es decir, mientras más denso sea el material, la carga va a ser mayor con respecto a la profundidad.

La carga de relleno se calculó con la siguiente fórmula:

$$R = \gamma \times H \times l \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- R: carga de relleno
- γ: peso específico del suelo
- H: profundidad de relleno
- l: longitud de alcantarilla (1m)

De esta manera, se puede obtener la carga de relleno en la estructura, la cual tiene la siguiente forma y orientación:

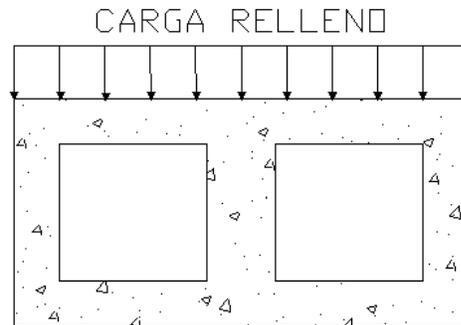


Figura 12: empuje lateral sobre la alcantarilla.

Carga de sismo:

La carga de sismo es generada por vibraciones provenientes de choques entre placas tectónicas, o también puede ser de origen volcánico. Es importante no confundir este movimiento con una fuerza, pues es, en realidad, una aceleración, que, al combinarla con el peso de una estructura, se puede estimar la fuerza que actúa sobre la misma. Existen varios métodos para determinar este tipo de carga, entre los cuales está el método estático.

En el caso en cuestión del proyecto realizado, al estar las alcantarillas confinadas por una gran masa de suelo, pueden suceder dos casos particulares.

Si en el momento en que ocurre un sismo, la alcantarilla se encuentra con un relleno vasto, las oscilaciones se dan en la estructura junto con la masa de suelo circundante: todo el suelo y la estructura se comportan como si fuera un solo ente. En síntesis, no se debe contemplar la carga de sismo en las alcantarillas profundas, ya que en el evento citado, todo el conjunto se comporta como uno solo.

Por lo contrario, si la alcantarilla se encuentra superficialmente, en el momento del sismo, sí puede alterarse la estabilidad de la estructura, creando una sobre-presión en las paredes, que puede alterar el análisis estructural y éste, por ende, el diseño final del alcantarillado. Sin embargo, es muy improbable que el sismo ocurra en el mismo momento en que, por encima de la alcantarilla, esté pasando el vehículo de diseño. En otras palabras, las acciones sísmicas combinadas con el resto de ellas ya interactuantes en el diseño, no generan acciones superiores a las ya consideradas.

Como en ninguno de los dos casos anteriores es realmente importante el análisis del sismo, por las razones recién mencionadas, se decidió no contemplar dicha carga para el análisis de las alcantarillas.

Geometría de las alcantarillas

Las alcantarillas diseñadas son de tipo rectangular, llamadas alcantarillas de cuadro; por tanto su forma básica es:

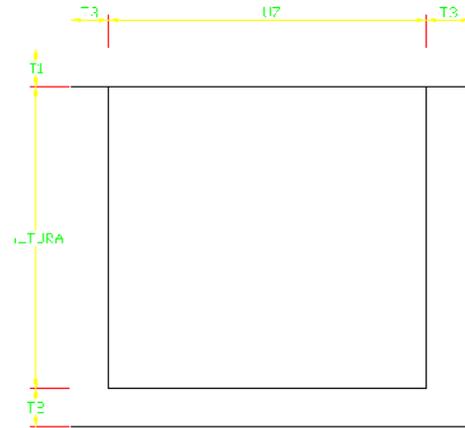


Figura 14: diagrama básico de alcantarilla de cuadro.

No obstante, existen tramos que requieren más ancho de losa superior, o más capacidad hidráulica, o simplemente, que, en el lugar donde se va a construir, se necesita una más grande que las diseñadas para una celda. Por esta razón, se establecen baterías de alcantarillas, con la finalidad de corregir las deficiencias antes citadas; estas baterías pueden ser de dos o tres celdas, como se presenta a continuación:

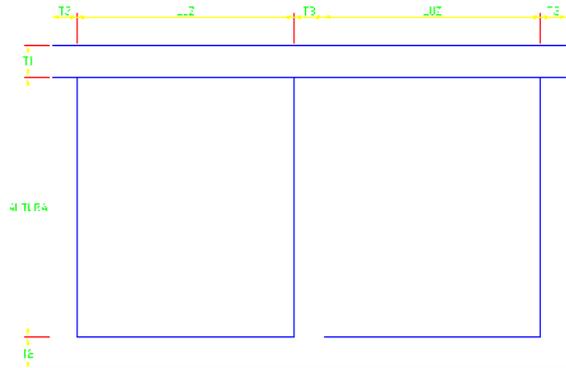


Figura 15: diagrama básico de batería de alcantarilla de dos celdas

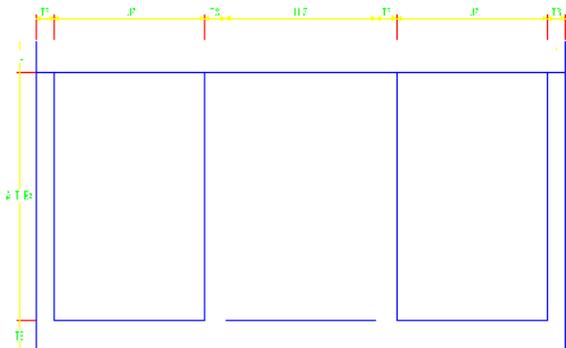


Figura 16: diagrama básico de batería de alcantarilla de tres celdas

Para cada una de estos tipos de alcantarillas se utilizó un número determinado de dimensiones de luz y alturas, que son las siguientes:

Luces de alcantarillas:

Las luces que se utilizaron en la elaboración de los planos finales son:

Para una celda: 0.6, 0.9, 1.25, 1.5, 1.85, 2.15, 2.45, 3.05 y 3.65.m

Para dos celdas: 1.5, 1.85, 2.45, 3.05 y 3.65.m

Para tres celdas: 1.25, 1.5, 1.85, 2.45, 3.05 y 3.65.m

Alturas de alcantarillas:

Las alturas establecidas para la elaboración de los diseños, según las diferentes combinaciones de alcantarillado son las siguientes:

Para una celda: 0.6, 0.9, 1.25, 1.5, 1.85, 2.15, 2.45, 2.75, 3.05 y 3.65.m

Para dos celdas: 1.85, 2.15, 2.45, 2.75, 3.05, 3.65, 3.95, 4.30, 4.60 y 4.90.m

Para tres celdas: 0.6, 0.9, 1.25, 1.50, 1.85, 2.15, 2.45, 3.05 y 3.65.m

Según la experiencia del ICE en la construcción de este tipo de obras, se recomendó hacer una investigación de las formas de construcción de estas alcantarillas. Se logró comprobar que, en la mayoría de los casos, la forma de construirlas era de manera monolítica, de forma tal, que todos los elementos de la estructura estaban ligados entre sí. Esto, según relatos suministrados por el Centro de Servicio Construcción de la UEN PySA, es un procedimiento un poco engorroso al construir las alcantarillas, por la dificultad de dejar el acero expuesto, proveniente de las paredes, para luego doblarlo y empotrarlo en la chorrera de la losa superior.

De manera, que se propuso hacer un estudio del comportamiento de dichas alcantarillas, pero en dos situaciones distintas: la primera, igual como se había estado construyendo, o sea, de forma monolítica; la segunda, formando un apoyo simple entre la parte superior de las paredes y la losa superior de la alcantarilla.

El estudio consistió en realizar un análisis estructural, con el fin de poder

observar el cambio que se obtiene en las acciones, a la hora de analizar las alcantarillas con la losa superior unida, en contraposición a tener esta misma losa, pero simplemente apoyada sobre las paredes.

Con este estudio, se pretendió tener un parámetro para realizar los diseños, pues, si los cambios ameritan una readecuación de la forma de construcción, se podría decidir si se seguirán construyendo monolíticas o si se puede evitar la complejidad constructiva.

Combinaciones de carga:

Para el diseño de las alcantarillas, se utilizó la filosofía de diseño de “Resistencia Última”, o “Load Resistance Factor Design” o LRFD, por sus siglas.

Esta filosofía utiliza al máximo los materiales y las propiedades mecánicas de estos, con el objeto de trabajar en el rango plástico de los materiales, y no solo en el elástico, como lo hace su antecesora, la filosofía de diseño ASD (Esfuerzos de trabajo).

El LRFD toma la naturaleza de las cargas una a una, y propone factores para cada una de ellas. De este modo, crea las combinaciones de diseño, en donde las cargas habituales se mayoran dependiendo de su campo de acción y de su probabilidad de ocurrencia en la vida de la estructura. Entonces, se logra involucrar cada una de las cargas que participan en el análisis de manera unitaria, y no en conjunto como en ASD.

Dicha filosofía de diseño, además de proporcionar coeficientes de reducción para cada uno de las acciones para las cuales se diseña, “castigan” más algunas acciones que otras, dependiendo de la importancia y seguridad adheridas que el diseño deba llevar.

La ecuación básica del diseño por teoría última es:

$$\gamma Q_i = \phi R_n \quad \text{Ecuación 8}$$

Para el proyecto investigado, se debió encontrar en primera instancia la parte izquierda de la ecuación anterior, y, para esto, se necesitan las combinaciones de carga que involucren todas las cargas

descritas en el capítulo de análisis estructural, al ser estas cargas de naturaleza tanto estática como móvil. Por el tipo de estructura analizada, se necesita usar combinaciones de carga aptas para ambos tipos de carga. Por tanto, se decidió utilizar las combinaciones descritas en el capítulo 3 del AASHTO, designadas para el diseño de puentes.

Para el caso de las alcantarillas, se utilizaron las cargas comentadas en el apartado de análisis estructural. El AASHTO propone más tipos de cargas; sin embargo, estas no son relevantes, pues no aplican para el caso de las alcantarillas.

Así pues, se utilizaron las siguientes cargas, con sus respectivas nomenclaturas (tomado de AASHTO LRFD 3-10):

Carga Permanente (CP): "DC".

Carga Temporal (CT): "LS".

Carga Empuje (CE): "EH".

Carga Relleno (R): "EV".

Una vez obtenidas las cargas que se utilizan en el diseño, se dispone a tomar las combinaciones que se encuentran en la tabla 3.4.1-1, "Combinaciones de Carga y Factores de Carga", de donde se escogen solo las combinaciones que contienen las cargas antes descritas, dado que las restantes no son aplicables para el caso analizado.

Escogencia de combinaciones:

Los criterios de selección de las combinaciones de carga utilizadas son:

- ✓ Resistencia I
- ✓ Resistencia II
- X Resistencia III: no se utiliza porque contempla carga de viento.
- ✓ Resistencia IV
- X Resistencia V: no se utiliza porque contempla carga de viento.
- X Evento extremo I: no se utiliza porque contempla carga de sismo.
- X Evento extremo II: no se utiliza porque contempla carga de sismo.
- X Servicio I: no se utiliza porque contempla carga de viento.
- X Servicio II: no se utiliza porque es para estructuras metálicas.
- ✓ Servicio III
- X Servicio IV: no se utiliza porque es para concreto pretensado.
- X Fatiga: no se utiliza porque no contempla las cargas utilizadas.

Valores de las combinaciones:

Las combinaciones utilizadas, según la sección anterior, son:

(nota: todas las acotaciones siguientes son tomadas de AASHTO, Cap 3.4)

Resistencia I: representa el uso normal de la estructura, sin viento.

$$\text{Resistencia I} = \gamma_p DC + \gamma_p EH + \gamma_p EV + 1.75LS$$

Ecuación 9.

Resistencia II: esta combinación expone el uso de la estructura, para vehículos de diseño específico, asignado por el interesado, vehículos de circulación restringida o, en general, cargas vehiculares especiales, sin contemplar el viento.

$$\text{Resistencia II} = \gamma_p DC + \gamma_p EH + \gamma_p EV + 1.35LS$$

Ecuación 10.

Resistencia IV: representa relaciones muy altas entre cargas permanentes y temporales.

$$\text{Resistencia IV} = 1.5DC + \gamma_p EH + \gamma_p EV$$

Ecuación 11

Servicio III: toma las cargas relacionadas con la tracción y las analiza en la estructura, con la finalidad de controlar la fisuración.

$$\text{Servicio III} = 1.0DC + 1.0EH + 1.0EV + 0.8LS$$

Ecuación 12.

Tomando en cuenta que LS se debe de incrementar por el impacto, la carga temporal final es:

$$LS = CV \times (1 + I)$$

Ecuación 13

Una vez propuestas las combinaciones utilizadas, se debe escoger los valores de los parámetros de γ_p , los cuales se obtienen de la tabla 3.4.1-2, del AASHTO LRFD.

Tipo de carga	Factor de Carga		
	Máximo	Mínimo	
DC: Elemento y accesorios	1,25	0,50	
DD: Fricción negativa (downdrag)	1,80	0,45	
DF: Superficies de rodamiento e instalaciones para servicios públicos	1,50	0,65	
EH: Empuje horizontal del suelo	Activo	0,50	
	En reposo	1,35	
EL: Tensiones residuales de montaje	1,00	1,00	
EV: Empuje vertical del suelo	Estabilidad global		
	Muros de sostenimiento y estribos	1,00	N/A
	Estructura rígida enterrada	1,35	1,00
	Marcos rígidos	1,30	0,50
	Estructuras flexibles enterradas u otras, excepto alcantarillas metélicas rectangulares	1,35	0,50
	Alcantarillas metélicas rectangulares flexibles	1,35	0,50
ES: Sobrecarga de suelo	1,50	0,75	

Tabla 5: valores a usar para γ_p

En la tabla anterior, los valores de máximo y mínimo responden, respectivamente, a que el valor máximo es usado cuando las estructuras por analizar son consideradas estables; por tanto, el criterio que rige es el de resistencia. Por esta razón se amplifica la carga, para obtener mayor resistencia de acciones.

El valor mínimo es usado para analizar estabilidad, en los casos en que la estructura pueda sufrir vuelcos por el accionar de las fuerzas actuantes sobre la estructura; por ende, los valores utilizados en el diseño son los correspondientes a la columna izquierda, ya que la estructura de las alcantarillas es completamente estable, y el criterio que interesa en este caso es el de resistencia.

En consecuencia, se usó para CP: 1.25, EH: 1.35 y para EV, se utilizó la casilla de estructura rígida enterrada, debido a las condiciones de uso de las alcantarillas, por lo que este es el valor de γ_p : 1.30.

Con los valores anteriores, se procede a armar las combinaciones finales por utilizar, como se muestra a continuación:

$$\text{Resistencia I} = 1.25CP + 1.35CE + 1.3R + 1.75CV$$

Ecuación 14.

$$\text{Resistencia II} = 1.25CP + 1.35CE + 1.3R + 1.35CV$$

Ecuación 15

$$\text{Resistencia IV} = 1.5CP + 1.35CE + 1.3R$$

Ecuación 16

$$\text{Servicio III} = 1.0CP + 1.0CE + 1.0R + 0.8CV$$

Ecuación 17

A la hora de la realización del análisis estructural, es importante recordar que éste dependía de las líneas de influencia de las cargas, tanto de las puntuales como

de las distribuidas, además de la profundidad de relleno. Así las cosas, es de suma importancia tener presente que las anteriores combinaciones son para una posición de llanta específica; por lo tanto, si cada una de las acciones máximas que se necesitan para el diseño, se encuentran en una posición de rueda diferente, la cantidad de combinaciones necesarias para ese diseño es el producto de la multiplicación de las cuatro combinaciones fundamentales, por el número total de posiciones máximas por utilizar: cada posición de rueda debe cumplir con las cuatro combinaciones anteriores. Sin embargo, es posible que la combinación que genera los momentos máximos no sea las mismas que generan los cortantes máximos.

Diseño estructural:

En esta sección, se explican los procedimientos o métodos de cálculo utilizados para la realización de los diseños estructurales de las alcantarillas, que es, en síntesis, el objetivo fundamental del proyecto.

Para explicar el método utilizado en el diseño estructural, se va a unir los dos elementos horizontales en una solo subtítulo llamado losas; esto, porque aunque una sea losa superior y la otra, losa inferior, ambas se diseñan igual. Por otro lado, también se aborda el diseño de las paredes, por supuesto, separado de las losas.

Diseño de Losas:

La función de las losas es la de proveer una superficie plana y útil (que, por lo general, es horizontal), cuyas superficies superiores e inferiores son paralelas o casi paralelas entre sí (A.Nielson). En el caso de las alcantarillas, las dimensiones de ancho y largo para la losa superior e inferior son iguales; ello, por ser alcantarillas rectangulares. La diferencia entre ambas radica en el espesor de cada una y en la cantidad de acero de refuerzo que se vaya a utilizar para su diseño. Para tal diseño, se siguieron procedimientos para comprobar flexión, compresión pura,

cortante y acero por temperatura, para ambas losas.

Flexión:

Para obtener la resistencia de la sección a la flexión, se debe iniciar obteniendo el valor M_u proveniente del análisis estructura, con el cual se procede a calcular la altura del bloque equivalente "a":

$$a = d - \sqrt{d^2 - \frac{2M_u}{\phi \times 0.85 \times f_c \times b_w}}$$

Ecuación 18

Donde:

D: distancia de la fibra en compresión más alejada al centroide del área en tensión.

M_u : Momento último

ϕ : Factor de reducción de carga para flexión.

f_c : resistencia del concreto

b_w : ancho de la losa. (se diseñó para un metro de ancho)

Una vez obtenido "a", se dispone a calcular el A_s :

$$A_s = \frac{0.85 \times f_c \times b_w \times a}{f_y}$$

Ecuación 19

Ahora se comprueba que la sección esté controlada por la tensión de la forma:

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & \text{si } f_c \leq 280 \text{ kg/cm}^2 \\ 0.85 - \frac{f_c - 280}{70} * 0.05 & \text{si } 280 < f_c \leq 560 \\ 0.65 & \text{si } f_c > 560 \end{cases}$$

Ecuación 20

Para así poder obtener "c":

$$c = a / \beta_1$$

Ecuación 21

Y finalmente poder comprobar:

$$\frac{c}{d} \leq 0.375$$

Ecuación 22

El número de varillas necesarias para la separación requerida se calcula:

$$\#Varillas = \frac{\rho \times b_w \times \text{espesor}}{A_{varilla}}$$

Ecuación 27

$$\text{Separación} = \left(\frac{b_w - 2Rec}{\#Varillas - 1} \right)$$

Ecuación 28

De esta manera se determinó la resistencia del concreto estructural a la flexión.

Compresión:

La compresión se da cuando un elemento resiste todos sus esfuerzos axiales, sobre su área transversal; sin embargo, en este caso no existe la compresión pura pues esta se da en conjunto con la flexión. De manera, que estos esfuerzos sean soportados solo por el material de concreto ubicado en la sección, y no por la combinación concreto-acero. Según el ACI 3-18, en la sección 10.2.6.2, expresa que, para este tipo de secciones, la resistencia esta dada por:

$$\phi P_n = \phi \times 0.80 \times 0.85 \times f_c \times (A_g - A_s)$$

Ecuación 29

Nota: en la ecuación anterior no se contempla el acero, en tanto se desea que todo el esfuerzo axial sea absorbido por el concreto.

Donde:

ϕ : Factor de reducción de carga para fuerza axial.

P_n : Axial última

f_c : resistencia del concreto

A_g : área transversal bruta del elemento

A_s : área transversal de acero.

Cortante:

Con el cortante último obtenido, se analizan las losas para soportar el esfuerzo de cortante en el concreto mediante la ecuación:

$$V_c = \phi_c \times 0.53 \times \sqrt{f_c} \times b_w \times d$$

Ecuación 30

$$V_c \geq V_u$$

Ecuación 31

Donde;

ϕ_c = Factor de reducción de carga por cortante. El valor usado es de 0,75.

V_u = Cortante último obtenido del análisis

Cuando el cortante estimado por el análisis estructural sobrepasa el límite estipulado con la ecuación anterior, se debe de utilizar acero de refuerzo. Esto para ayudar a la sección de concreto a soportar dichos esfuerzos y con ello, no tener que recurrir a aumentar el espesor de losa, con el fin de que lo que rija el espesor de la losa sea la flexión y no el cortante. Para lograrlo, se debe calcular la contribución del concreto hacia el cortante, y luego tomar el cortante último " V_n ", y restarle el aporte del concreto; así, el valor resultante es el esfuerzo que deben resistir los ganchos de acero colocados. Matemáticamente, esto sería:

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c$$

Ecuación 32

Al observar el diagrama de cortante de la estructura, se puede apreciar que los cortantes máximos se encuentran en los extremos de la luz, por lo que la longitud efectiva de los aros es de un 25% de la luz, a ambos lados del claro. Esta situación es debida a que, después de esa longitud, el valor del cortante puede ser tomado por el concreto, por lo que poner aros en la sección central de la losa es desperdiciar el material, pues la resistencia del concreto en ese punto no necesita acero de refuerzo. El cortante en las alcantarillas se muestra a continuación:

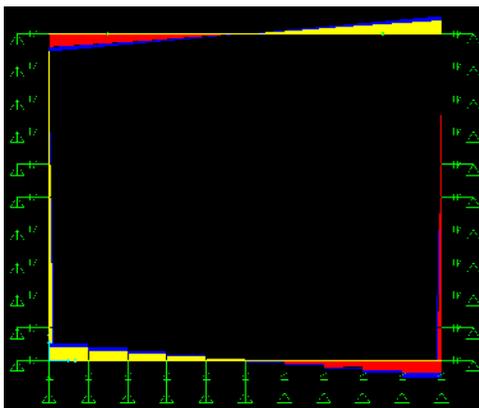


Figura 17: Forma cómo el cortante aparece en la estructura.

Para obtener la cantidad de ganchos por utilizar, primero se decide colocarlos sobre el acero por temperatura, específicamente

sobre el que está en sentido transversal al flujo de agua de la alcantarilla, de modo que su espaciamiento longitudinal, está en función del mismo espaciamiento transversal del acero por temperatura. Para obtener el espaciamiento transversal, se determinó usar una separación "d", semejante a la teoría sobre acero por cortante en vigas. La cantidad de ganchos por fila de acero transversal, se determina de la siguiente manera:

$$Ramas = \frac{0.25L - Rec}{d} + 1$$

Ecuación 33

Donde:

L: longitud de luz

Rec: recubrimiento

d: distancia de la fibra en compresión más alejada al centroide del área en tensión.

Para obtener la cantidad de ramas totales en el metro lineal de alcantarilla que se tiene, basta con multiplicar el número de ramas por acero transversal; luego, la cantidad de varillas de acero transversal que quepan en el metro de longitud. Con este valor y el espaciamiento del acero por temperatura, se puede obtener la magnitud del esfuerzo que podría soportar este acero contra el cortante. Por lo tanto, la resistencia de este acero por cortante es:

$$V_s = \frac{\# Ramas \times A_{var} \times f_y}{Sep \times b}$$

Ecuación 34

En este cálculo de V_s , no se necesita el valor "d", pues este cortante no necesita del espesor de losa, ya que aquí solo se está buscando cuánto es el acero necesario para resistir el cortante V_s . El "d" es aplicable en el cálculo del cortante que soporta solo la losa de concreto; en cambio, en la búsqueda de acero, es irrelevante cuánto es el peralte de la losa.

Sin embargo, las unidades de la ecuación anterior son kg/cm^2 , y el valor por comparar es dado en kg, por lo que:

$$v_s = V_s \times b \times d$$

Ecuación 35

Finalmente, la forma de colocación de los ganchos por cortante es:

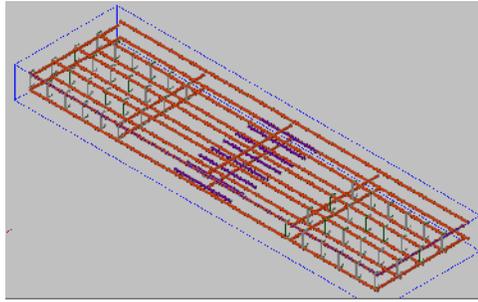


Figura 18: forma de la armadura con ganchos para cortante

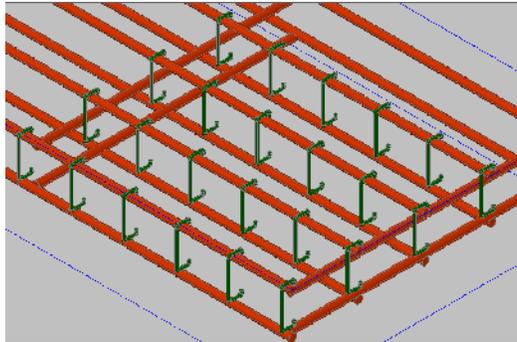


Figura 19: Forma cómo se distribuye el acero por cortante.

Acero por temperatura:

El acero por temperatura es el que se encarga de transmitir las contracciones que produce el concreto en su estado de fraguado y endurecimiento sobre su resistencia, pues esa expansión y contracción térmica hace que el concreto se agriete. Sin embargo, la temperatura de las alcantarillas es bastante estable, excepto en las superficiales; no obstante, sí es importante tomar en cuenta la contracción por fraguado, puesto que se podrían generar grietas lo subsecuentemente apreciables como para que se dé la pérdida de líquido en la alcantarilla. Además, estas grietas podrían ser perjudiciales para el comportamiento de la estructura en general: el acero por temperatura se coloca en una cantidad específica, de manera que su cuantificación está dada por el ACI en su apartado 7.12.2.1:

Si el acero es grado G-60:

$$A_t = 0.0018 \times b \times t$$

Ecuación 36

Si el acero es grado G-40:

$$A_t = 0.002 \times b \times t$$

Ecuación 37

Es importante aclarar que el A_t proporciona un valor de área de acero por utilizar para tal efecto; empero, esta cantidad se distribuye por metro lineal de losa, si se toma $B=100\text{cm}$. En consecuencia, en el caso del acero transversal, siempre se utilizará el valor anterior, pues su ancho es de 1 m, ya que todas las alcantarillas se diseñaron para un metro de profundidad; en cambio, para obtener el acero longitudinal, se debe multiplicar el área aportada por la fórmula, según el largo de cada luz y, a su vez, por el número de celdas, para así poder tener en claro cuál es el área real de acero por temperatura, que se necesita en el sentido longitudinal.

Diseño de paredes:

Para el diseño de las paredes, se contemplan los mismos parámetros empleados en el diseño de las losas; no obstante, se debe tomar una revisión más, que se conoce como el fenómeno de la "flexo-compresión": para saber si se debe de contemplar dicho fenómeno, se tiene que comprobar que:

$$P_u \leq 0.05 \times f_c \times A_g$$

Ecuación 38

De manera que, si P_u es mayor que la relación anterior, se debe comprobar que la pared resista los esfuerzos de flexo-compresión; contrariamente, si el resultado de la ecuación es menor, aunque se trate de una pared, el elemento se diseña como un elemento en flexión, que ya se analizó anteriormente.

Si el resultado es analizado como losa, el diseño de la pared es igual al de las losas; a diferencia de ello, hay que calcular todo lo mismo que se calculó para las losas, exceptuando el análisis de acero por cortante. En el caso de las paredes, éstas deben soportar todo el esfuerzo cortante por medio del concreto, dado que no es práctico constructivamente colocar ganchos de cortante aquí por un aspecto de facilidad constructiva. Si la ecuación anterior no se cumple, se debe de comprobar la flexo-compresión, de tal suerte que, según el ACI, debe considerarse la pared como una columna, con el fin de encontrar un diagrama de interacción, el cual nos permita

asegurarnos que la relación entre fuerza axial y momento no se vaya a sobrepasar de la capacidad de la sección.

En el cálculo de este proceso, se construyó un diagrama de interacción conformado por 3 regiones:

Compresión Pura

Para obtener el par correspondiente a compresión pura, se conoce una coordenada, la cual es $M = 0$, y la otra se calcula con la siguiente expresión:

$$P_o = 0,85 \times f'c \times b \times h + F_y \times (A's + A_s)$$

Ecuación 39

Flexión Pura

Se debe calcular el par correspondiente a flexión pura:

$$a = 0,85 \times C_b$$

Ecuación 40

$$\epsilon's = 0,003 \times \left(\frac{a - 0,85 \times d}{a} \right)$$

Ecuación 41

$$\epsilon_s = 0,003 \times \left(\frac{0,85 \times d - a}{a} \right)$$

Ecuación 42

$$E_s = 0,003 \times E_s \times \left(\frac{a - 0,85 \times d}{a} \right)$$

Ecuación 43

$$E_s = 0,003 \times E_s \times \left(\frac{0,85 \times d - a}{a} \right)$$

Ecuación 44

Se utilizó la siguiente ecuación para el cálculo del punto en compresión:

$$P_o = 0,85 \times f'c \times a \times b + f's \times A's - f_s \times A_s$$

Ecuación 45

Donde;

f_s = Esfuerzo del acero en tensión

$f's$ = Esfuerzo del acero en compresión

A_s = Área de acero en tensión

$A's$ = Área de acero en compresión

Se emplea la siguiente ecuación para el cálculo del momento a baja carga axial:

$$M_o = 0,85 \times f'c \times a \times b \times \left(\frac{h-a}{2} \right) + A's \times f_s \times \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s \times f_s \times \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

Ecuación 46

Falla Balanceada

Se debió calcular el par que se relaciona en la falla balanceada. Este par se calcula de la siguiente manera:

$$C_b = \frac{0,003 \times d}{0,003 + \epsilon_y}$$

Ecuación 47

$$\epsilon_y = \frac{F_y}{E_s}$$

Ecuación 48

$$a = 0,85 \times C_b$$

Ecuación 49

El punto en compresión se calculó usando la siguiente fórmula:

$$P_b = 0,85 \times f'c \times a \times b + f's \times A's - f_s \times A_s$$

Ecuación 50

Y el punto que toma en cuenta la parte en flexión es calculado siguiendo la ecuación:

$$M_o = 0,85 \times f'c \times a \times b \times \left(\frac{h-a}{2} \right) + A's \times f_s \times \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s \times f_s \times \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

Ecuación 51

Al cumplir con los requerimientos anteriores, se pudo comprobar que las acciones específicas para cada una de las alcantarillas que necesitaban este tipo de análisis, se encontraron por debajo del gráfico formado con las ecuaciones anteriores.

Los valores con los que se forma el gráfico son nominales; por lo tanto, no contemplan el valor del factor de reducción impuesto por la filosofía de diseño LFRD. Así, los valores obtenidos del análisis estructural, al ser acciones últimas, se les debe sustraer el mismo factor de reducción: el par ordenado de axial-momento que se va a graficar, fue en acciones nominales, al igual que los valores con los que se formó el gráfico.

Diseño Hidráulico:

El diseño hidráulico es de suma importancia, pues la idea fundamental de una alcantarilla es poder canalizar las aguas de algún sitio en particular, que sea necesario trasladar hacia otro lado. Por ende, no solo es preciso que la alcantarilla soporte las cargas móviles que pasaran por encima de ella, sino que debe de tener la capacidad de trasegar todo el líquido que pase por el lugar de la conducción, de manera que no falle ninguno de los dos aspectos ingenieriles. Con esto, es imprescindible poder estimar cuánto es el caudal máximo que puede trasegar una estructura de este tipo, dependiendo de sus combinaciones geométricas, para que no se rebalse, y pueda dar la utilidad para la cual es diseñada. Así que para obtener ese caudal, se debe contemplar varios parámetros que se analizan a continuación.

Características de flujo:

El estudio del flujo hidráulico comprende varios análisis, dependiendo de distintos tipos de rasgos del líquido, que se pueden clasificar en:

Tipo de flujo:

Esta clasificación se realizó en función de varios criterios tales como, el cambio de profundidad con respecto al flujo, al tiempo y al espacio, de manera que se puede dividir en “*flujo permanente y flujo no permanente*”. El primero se caracteriza porque la profundidad de flujo es constante durante el tiempo de diseño considerado. Por otra parte, el flujo no permanente, es contrario al anterior, por lo que la profundidad de flujo sí cambia con respecto al tiempo.(V.Chow)
Así las cosas, una clasificación de tipos de flujo es:

- A. Flujo permanente
 - 1. Flujo uniforme
 - 2. Flujo variado
 - a. Flujo gradualmente variado
 - b. Flujo rápidamente variado
- B. Flujo no permanente
 - 1. Flujo uniforme no permanente (raro)
 - 2. Flujo no permanente (es decir, flujo variado no permanente)
 - a. Flujo gradualmente variado no permanente
 - b. Flujo rápidamente variado no permanente.

Figura 20: Subdivisión del flujo permanente y no permanente.(imagen tomada de V.Chow. ref. 11)

Estado de flujo:

El estado de flujo está regido por la influencia de la viscosidad y gravedad, en relación con las fuerzas iniciales de flujo; de esta manera, el flujo puede ser laminar, turbulento, según el efecto de la viscosidad con la inercia. (V.Chow).

Así, un flujo laminar es cuando las fuerzas viscosas son superiores a las fuerzas inerciales, por lo que las partículas de agua tienen movimientos suaves y, por ende, las capas de líquido, con espesores superficiales, son tan suaves y definidas que se desplazan sobre sus capas adyacentes. (Tomado de V.Chow).

Caso contrario, el flujo es turbulento, si las fuerzas de viscosidad son menores que las inerciales; por tanto, las capas como las trayectorias son irregulares, por lo que no son suaves ni fijas. Sin embargo, pueden existir cada una por su lado o, si no, en estado mixto o transicional. Es importante denotar, ya que el estado de flujo depende de la viscosidad en relación con la inercia, que esto depende del número de Reynolds, el cual se define por:

$$R = \frac{V \times L}{\nu} \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde:

V: velocidad de flujo

L: longitud de canal

ν : (nu), velocidad cinética del agua

Criterios de flujo:

Para efectos del proyecto realizado, se necesita clasificar el fluido en crítico, sub-crítico y súper-crítico, para lo cual es menester, en primera instancia, establecer el concepto de energía específica. Esta se define como la energía por unidad de masa de agua, con respecto al fondo del canal por analizar; así, esta energía es igual a la suma de la profundidad de agua, más la carga impuesta por la velocidad. (Tomado de V.Chow).

Para poder introducir este concepto al esquema de canales, se debe graficar la curva de energía específica, donde se tienen dos ramas de interés llamadas AC y BC. Dicho gráfico es tomado para la elaboración de este informe del libro, "Hidráulica de canales", de Ven te Chow, en su página 42, el cual se presenta a continuación:

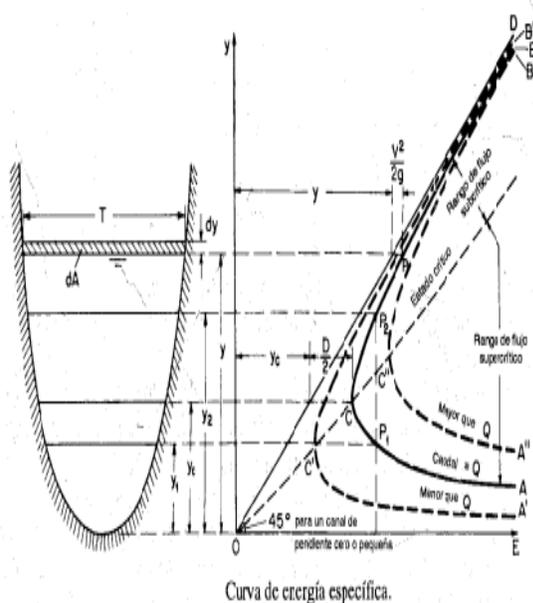


Figura 21: Curva de energía específica para un fluido en un canal abierto.

En el grafico anterior, el punto "C" corresponde al de energía mínima, la cual se vincula al estado de flujo crítico. Este punto "C" está referido a una cota de profundidad llamada "y_c", que es el tirante del cual se obtiene el flujo crítico; o sea, el tirante crítico. En consecuente, para una profundidad mayor a la crítica, se tiene una velocidad de fluido menor a la del caudal crítico, y, bajo esta condición, se obtiene el "flujo sub-crítico"; por el contrario, si se tiene un tirante de flujo que es menor que el tirante crítico, se da una velocidad que es mayor a la del caudal crítico, y así, se consigue la condición de "flujo súper-crítico". (Tomado de V.Chow).

Sin embargo, el criterio para la decisión de tipos de flujo sub-crítico o súper-crítico, depende del número de Froude, el cual se determina por:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \times D}} \quad \text{Ecuación 53}$$

Donde:

- V: velocidad del fluido
- g: gravedad (9.81 m/s²)
- D: profundidad hidráulica, que depende de la geometría del canal, en el caso de las alcantarillas, D=y.
- y: tirante del líquido en el canal.

Es importante recalcar que otro factor implícito a la hora de clasificar los fluidos en sub-críticos, críticos y súper-críticos, es la pendiente asociada al canal, ya que ésta afecta directamente la velocidad del fluido, la cual es el valor colocado en el numerador de la fórmula de Froude. Esta pendiente se encuentra en la fórmula de velocidad, que es:

$$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad \text{Ecuación 54}$$

Donde:

- V: velocidad del fluido
- R: radio hidráulico
- S: pendiente del terreno

Por tanto, al ver que la pendiente se relaciona con la velocidad, se podría encontrar la velocidad para la cual el número de Froude es 1, y, con esta velocidad, calcular la pendiente relacionada, de manera que se llega al concepto de "pendiente crítica".

$$S_c = \left(\frac{n \times Q}{A \times R^{2/3}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 55}$$

De manera que, a una pendiente mayor que la pendiente crítica, se tienen mayores velocidades de flujo; por ende, se da una condición de flujo súper-crítico, y, a menores pendientes, se da el flujo sub-crítico. Se diseñó para mantener siempre un flujo sub-crítico; sin embargo, si se da uno supercrítico, la alcantarilla igual puede funcionar, ya que el tirante máximo está a una tercera parte por debajo del límite superior de la alcantarilla, según premisas de diseño: consecuentemente, en un flujo súper-crítico, la alcantarilla igual puede canalizar las aguas. La razón por la que no se recomienda que se de este flujo es para que no se produzcan los inconvenientes antes mencionados a este comportamiento.

Cálculo de caudal:

A la hora de incorporar todo lo anterior en el diseño de las alcantarillas, se tomó en cuenta una distribución establecida por Richard French, en su libro "Hidráulica de

canales abiertos”, como aparece a continuación:

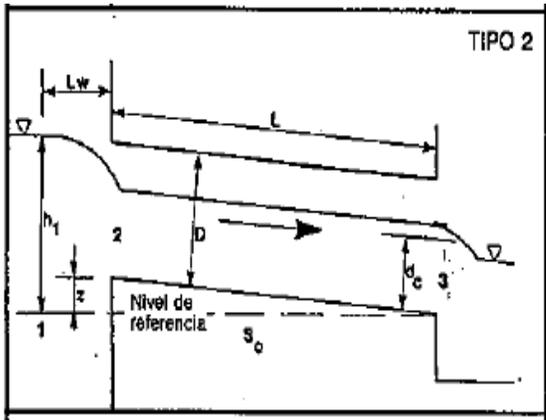


Figura 22: diagrama de descarga de alcantarilla.

El esquema anterior es llamado Tipo de descarga de flujo con tirante crítico a la salida, en donde este tirante se limita a:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \times g}} \quad \text{Ecuación 56}$$

Donde:

- Q: caudal (m³/s)
- B: ancho de alcantarilla
- g: gravedad

Según la fórmula para el alcantarillado tipo 2, la ecuación de descarga se describe como:

$$Q = C_d \times b \times y_c \times \sqrt{2g(y_c + \frac{Q}{g \times b \times y_c} - \sqrt{\frac{Q^2}{b^2 \times g} \times h_f}} \quad \text{Ecuación 57}$$

Donde:

- Q: caudal
- b: ancho de alcantarilla
- y_c: tirante crítico
- g: gravedad
- h_f: pérdidas por fricción

En la ecuación anterior, hizo falta mencionar el significado de C_d, el cual es un coeficiente de gasto adherido a la teoría que se está utilizando y que se ha establecido mediante pruebas de laboratorio, oscilando entre 0.38 a 0.98 (R.French). Estos datos dependen de la geometría, pues es solo para alcantarillas de aristas cuadradas, cuya función se determina por medio del cociente entre el tirante crítico y el diámetro de la alcantarilla o, en su defecto, por su profundidad (y_c/D). Para la obtención de estos datos, se ha utilizado la siguiente gráfica obtenida del libro de Richard French:

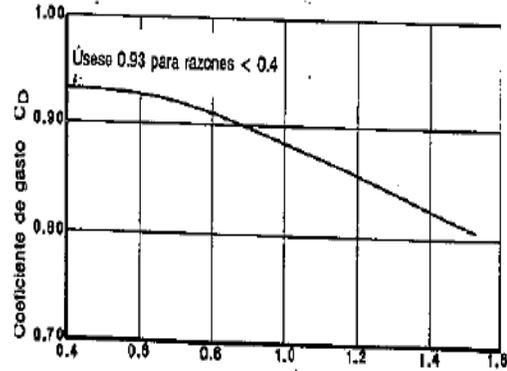


Figura 23: nomograma para obtención de coeficiente de gasto C_d.

Una vez encontrados todos los valores necesarios para hallar el caudal de salida, se dispuso a realizar interacciones. Esto, por la razón de que, en la ecuación de descarga, se encuentra implícito el caudal, pues no se puede despejar de manera libre. Así, se iteró el caudal real, hasta llevarlo a converger con el caudal teórico, suministrado por la ecuación anterior, incluso considerando un error no mayor al 0.5%.

La ecuación de gasto contempla también al final de su raíz cúbica, un término asociado a las pérdidas relacionadas por la fricción con el material, lo que involucra un “n” de “*manning*”, referente a la rugosidad del material. Para el diseño se consideró la pérdida provocada por la fricción en el metro de longitud que se utilizó, ya que el análisis se realizó para alcantarillas de longitudes unitarias. De esta forma, no importa cuánto sea la longitud por usar en el futuro para estas alcantarillas, siempre considerarán las pérdidas en todo su trayecto.

Otros parámetros de diseño:

La sección hidráulica es, sin duda, imprescindible en este proyecto, ya que las alcantarillas deben soportar la avenida del caudal máximo para las cuales se diseñaron; sin embargo, se deben tomar en cuenta otros parámetros importantes por adicionar en los diseños, de manera que puedan ser de utilidad a la hora de emplear estas estructuras.

Área hidráulica:

El área hidráulica se refiere al área de la sección transversal del flujo: se obtiene de la multiplicación del tirante crítico por el ancho de la luz de la alcantarilla,

Perímetro mojado:

Es la longitud de la línea que se forma entre el agua y el recipiente que la contiene (en este caso la alcantarilla). Para este proyecto en específico, el perímetro mojado es:

$$P = b + 2y_c \quad \text{Ecuación 58}$$

Radio hidráulico:

Es una relación geométrica establecida entre el área hidráulica y el perímetro mojado.

$$R = \frac{A}{P} \quad \text{Ecuación 59}$$

Cantidades de materiales:

Otro apartado que se tomó en cuenta en los diseños, son las cantidades de materiales principales (concreto y acero), necesarios para la construcción de las alcantarillas. Estos fueron puestos en los planos finales con el fin de facilitar a los constructores la tarea de contabilizar los materiales a la hora de preparar un presupuesto. Los valores que se establecen son los que representan las cantidades de materiales por metro de longitud de alcantarilla: sus valores fueron obtenidos de la siguiente manera.

Concreto:

El concreto que se utilizó, se tomo según las especificaciones de ASTM y ACI. La densidad de aquél es de 2400 kg/m^3 .

Luego se obtuvo el volumen de los elementos de concreto, para cada una de las combinaciones geométricas existentes: para los tres tipos de elementos presentes en las alcantarillas, se obtuvo el volumen, multiplicando la luz de las alcantarillas por el espesor, proveniente del necesario para soportar los esfuerzos de flexión, y esto por 1 m de

longitud de alcantarilla, dado que son diseños por metro lineal. Así, se sumaban todos los volúmenes y se obtuvo el volumen de concreto en metros cúbicos, por metro de longitud de alcantarilla (m^3/m).

Acero de refuerzo:

Para obtener la cuantía de acero, se necesitó descomponer los diseños en metros lineales de varillas, tanto las varillas por flexión, como el acero por temperatura y el de cortante, con el afán de obtener longitudes de materiales por cada tipo de varilla por utilizar. Una vez hecho esto, se multiplicó cada una de estas dimensiones por el área transversal de cada varilla utilizada, de manera que se obtuvo el volumen de acero por emplear en los diseños. Finalmente, se multiplicó este volumen por la densidad del acero, que es de 7850 kg/m . Con esto se obtuvo el peso del acero total, por m. de longitud de alcantarilla.

Salida de datos y planos finales:

Se terminó de diseñar las estructuras propuestas, contemplando todos las indicaciones establecidas en esta metodología. De tal modo, el diseño final debe iniciar con el análisis estructural, realizado sobre la base del programa SAP 2000, en el que se deben obtener las acciones máximas de las combinaciones de carga establecidas según el AASHTO, dependiendo de las posiciones finales de las ruedas, las cuales se obtuvieron con las líneas de influencia estudiadas con anterioridad.

Una vez obtenidas las acciones nocionales, se diseñó estructuralmente las losas y paredes, con las especificaciones para concreto estructural, comentado en el tema, "*Diseño estructural*". Aquí, se revisa flexión, flexo-compresión, cortante, y acero por temperatura. Siguiendo con el diseño, se obtienen las cantidades de materiales, y, por último, se obtienen las capacidades de la sección hidráulica, indicando siempre una pendiente adecuada para asegurarse de que el flujo que trasiegue por estas estructuras sea siempre sub-crítico, por razones de seguridad de diseño.

Los planos finales e individuales se encuentran en el apéndice 7, representando el resumen de todos los diseños de alcantarillas realizados.

Resultados

Suelos utilizados

A la hora de realizar los procedimientos correspondientes para la obtención de los diseños finales, se inició elaborando un cuadro con los tipos de suelo sugeridos

en el departamento de geotecnia,

Cuadro 1. Valores de peso específico, ángulo de fricción y coeficiente de balasto para distintos suelos.				
Tipo de suelo	tipo	γ_d (kg/m ³)	ϕ	K (kg/cm ³)
Grava	fina	2000	40	9
	media	2200	47	12.5
	gruesa	2400	55	25
Arena	Uniforme densa	1825	40	18
	uniforme suelta	1480	31	2.4
	Limosa suelta	1630	30	2.4
	limosa densa	1940	41	18
Arcilla	dura	1725	42	14.5
	blanda	1325	31	0.975

Los valores utilizados finalmente son los tres resaltados en otro color, a saber:

Cuadro 2. Valores de peso específico, ángulo de fricción y coeficiente de balasto a usar.				
Tipo de suelo	tipo	d (kg/m ³)	ϕ	K (kg/cm ³)
Grava	Media	2200	47	12.5
Arena	Limosa suelta	1630	30	2.4
Arcilla	Blanda	1325	31	0.975

Estudio de acciones entre resortes y apoyos

Una vez obtenidos los tipos de suelos por utilizar, junto con sus características, se tomó el modelo para obtener las acciones internas finales de los elementos, Con este motivo,

se realizó el estudio de las acciones de los elementos, partiendo de un modelo con diferentes tipos de coeficientes de balasto, y también con un modelo sin resortes, a fin de encontrar las diferencias con respecto al suelo y el tipo de apoyo. Para la obtención de datos se utilizó una configuración de alcantarilla de dos celdas, estándar, con luces y alturas de dimensiones intermedias.

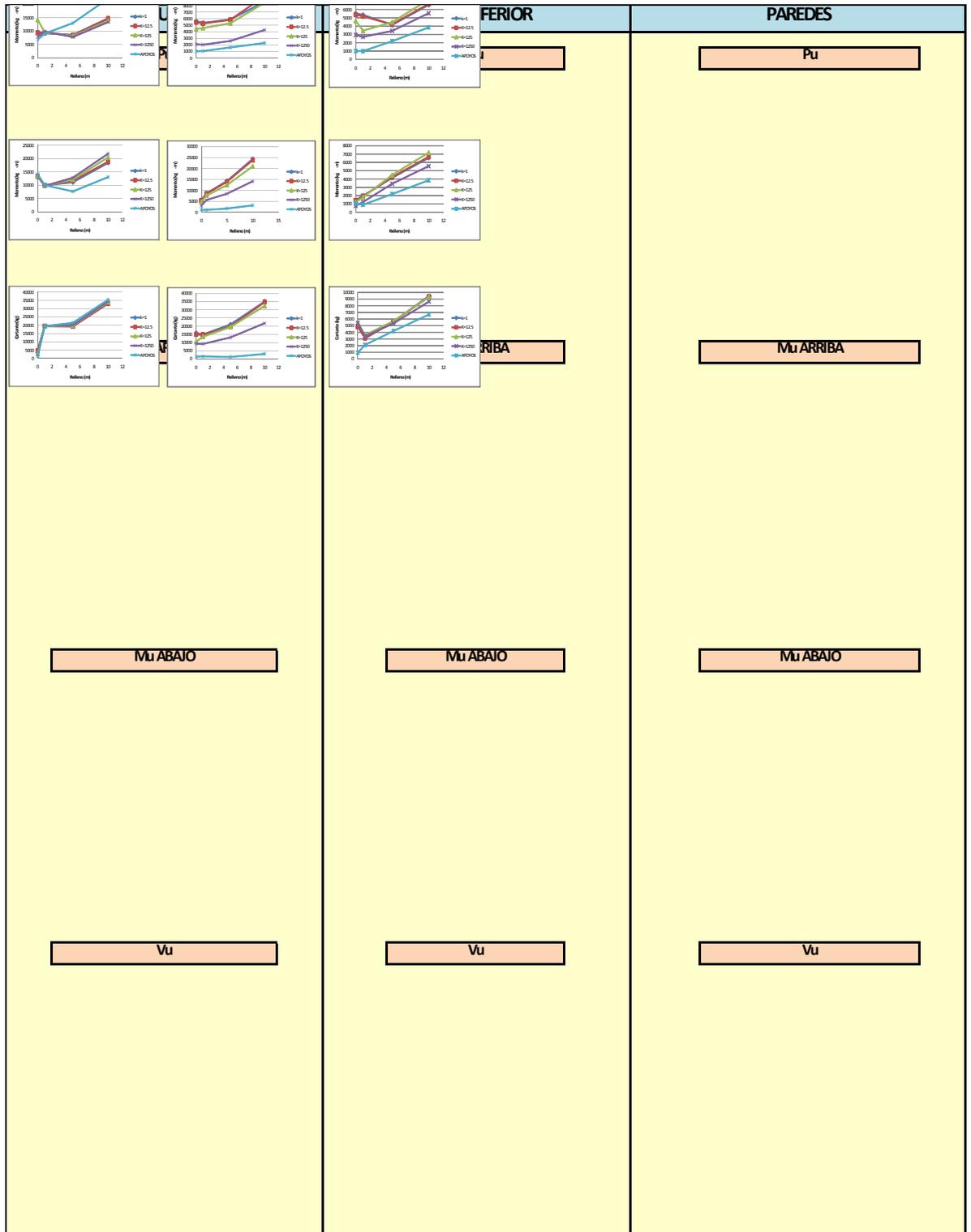
Cuadro 3. Cambio de acciones con distintos “k” y apoyos.

CAMBIO DE ACCIONES CON DIFERENTES "K"																
# Celdas	Luz (m)	Altura (m)	K	Relleno	Losas Superior				Losas Inferior				Paredes			
					Pu (kg)	Mu ↑(kg-m)	Mu ↓(kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑(kg-m)	Mu ↓(kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑(kg-m)	Mu ↓(kg-m)	Vu (kg)
2	2.45	3.05	1	0	2841	9557	13204	5025	4771	5606	5532	15843	28927	5532	1457	4925
				1	1356	9209	9965	19500	3423	5344	8650	14942	38000	5354	1965	3100
				5	2339	8519	11110	19332	5632	5878	14269	21000	56210	4142	4142	5532
				10	4557	14770	18417	33058	9472	8600	24368	35034	93630	6548	6548	5473
			12.5	0	2194	9302	13289	4559	4845	5456	5379	14935	29573	5379	1422	4835
				1	1329	9259	9917	19469	3445	5268	8485	14751	38345	5130	1948	3140
				5	2236	8413	11673	19225	5611	5828	13985	13754	56372	4219	4219	5515
				10	4322	14673	18822	33224	9363	9473	23823	34722	94000	6678	6678	5370
			125	0	407	14178	13605	2955	4853	4429	4635	10545	30937	4635	1223	5445
				1	1293	9532	9835	19530	3691	4570	7647	13505	39806	3452	1812	3577
				5	1783	8111	12150	19508	5664	5286	12435	19423	57059	4477	4477	5708
				10	3375	13848	20522	34000	9261	8446	21000	32359	95348	7137	7137	5332
			1250	0	201	7719	13817	1751	3752	2102	2948	9300	32200	2548	770	5400
				1	1084	9841	9711	19706	3605	2028	5578	9160	41020	2707	1230	3422
				5	822	7760	12835	20138	4557	2802	8451	13084	57620	3429	3429	5336
				10	1578	13369	21887	34475	8023	4284	14345	21795	96452	5552	5552	8541
			no uso K, sino que uso modelo con apoyos, no con resortes	0	535	6764	14135	1265	1324	1030	1085	1381	32508	1009	1050	950
				1	1303	9017	10055	19500	2022	1053	1060	1521	41333	597	903	2106
				5	3112	13000	7667	21500	4839	1808	1705	1200	57759	2192	2192	4200
				10	5588	22224	13055	35377	8344	2292	3125	3100	96738	3850	3850	6700

De los datos anteriores, se pueden apreciar las diferencias en las acciones, entre los distintos tipos de coeficientes de balasto, con respecto a diferentes rellenos,

De ello, se obtienen los siguientes gráficos:

Gráfico 1. Cambio de acciones para diferentes K y apoyos, con distintos rellenos



Comparación acciones apoyos de losa superior

Otro aspecto por tomar en cuenta es la forma de construcción de las alcantarillas, El estudio se realizó para alcantarillas de

una y dos celdas, con luces de 3 m y alturas de 2.45 m, y rellenos de 0,5 m y 3 m.

Cuadro 4. Cambio de acciones respecto de estado de losa superior.

Tabla Comparativa de distintos tipos de Alcantarillas																
#Celdas	Luz (m)	Altura (m)	Relleno (m)	Losa Superior				Losa Inferior				Paredes				Estado de losa
				Pu (kg)	Mu ↑(kg-m)	Mu ↓(kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑(kg-m)	Mu ↓(kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑(kg-m)	Mu ↓(kg-m)	Vu (kg)	
1	3	2.45	3	3430	3455	5700	10830	3845	6220	3609	8915	10950	3921	0	1015	Monolítico
1	3	2.45	3	3116	3277	5700	8578	3921	4515	3609	8867	14028	3921	0	2614	Apoyo Simple
1	3	2.45	0.5	1902	5993	13484	13600	973	6850	4022	10200	16054	5993	0	1800	Monolítico
1	3	2.45	0.5	1902	5993	13484	13600	980	6849	4022	10100	15172	5993	0	1900	Apoyo Simple
2	3	2.45	3	3153	7665	4122	8800	3888	4453	8290	10900	29533	2995	0	2700	Monolítico
2	3	2.45	3	2300	7533	5591	11209	4800	4191	9880	11635	31020	2200	0	3242	Apoyo Simple
2	3	2.45	0.5	1675	10655	10307	15600	3140	4914	6952	9430	24000	4580	0	2163	Monolítico
2	3	2.45	0.5	428	9978	14488	17509	2714	4620	8180	10725	25473	3118	0	2199	Apoyo Simple

Al obtener los valores anteriores, se alcanzaron los promedios entre las mismas acciones, de manera que se puede

observar el cambio de acciones respecto de los distintos rellenos y estados de losa superior. Así, estos cambios se encuentran en el siguiente cuadro.

Cuadro 5. Valores promedios de acciones respecto de estado de losa superior.

Comparación entre 1C-3L-2.45H-3R				
		Diferencia entre Cerrado y Release (%)		
Losa superior	Pu	0.0915	Pu Vu Mu	Promedio 0.110 0.275 0.109
	Vu	0.2079		
	Mu	0.0515		
Losa Inferior	Pu	0.0194	Pu Vu Mu	Promedio 0.021 0.021 0.000
	Vu	0.0054		
	Mu	0.2741		
Paredes	Pu	0.2194	Pu Vu Mu	Promedio 0.0549 0.0526 0
	Vu	0.6117		
	Mu	0		
PROMEDIOS TOTALES:				
		Pu:	0.15	
		Vu:	0.13	
		Mu:	0.09	

Comparación entre 1C-3L-2.45H-0.5R				
		Diferencia entre Cerrado y Release (%)		
Losa superior	Pu	0	Pu Vu Mu	Promedio 0.021 0.021 0.000
	Vu	0		
	Mu	0		
Losa Inferior	Pu	0.0071	Pu Vu Mu	Promedio 0.0098 0.0001 0.0549
	Vu	0.0098		
	Mu	0.0001		
Paredes	Pu	0.0549	Pu Vu Mu	Promedio 0.0526 0 0
	Vu	0.0526		
	Mu	0		

Comparación entre 2C-3L-2.45H-3R				
		Diferencia entre Cerrado y Release (%)		
Losa superior	Pu	0.2705	Pu Vu Mu	Promedio 0.169 0.148 0.114
	Vu	0.2149		
	Mu	0.0172		
Losa Inferior	Pu	0.19	Pu Vu Mu	Promedio 0.313 0.082 0.148
	Vu	0.0632		
	Mu	0.0588		
Paredes	Pu	0.0479	Pu Vu Mu	Promedio 0.0578 0.0164 0.3192
	Vu	0.1672		
	Mu	0.2654		

Comparación entre 2C-3L-2.45H-0.5R				
		entre Cerrado y Release (%)		
Losa superior	Pu	0.7445	Pu Vu Mu	Promedio 0.313 0.082 0.148
	Vu	0.109		
	Mu	0.0635		
Losa Inferior	Pu	0.1357	Pu Vu Mu	Promedio 0.0578 0.0164 0.3192
	Vu	0.1207		
	Mu	0.0598		
Paredes	Pu	0.0578	Pu Vu Mu	Promedio 0.0164 0.3192 0.3192
	Vu	0.0164		
	Mu	0.3192		

Con los valores por utilizar para los suelos, los valores de "Cb" y el tipo de losa superior, se hizo el estudio de las líneas de influencia para la colocación de la carga viva. Este estudio es trascendental en el desarrollo del proyecto, pues muestra los lugares donde se van a producir los esfuerzos máximos para la

carga móvil, con el objeto de diseñar para las acciones más exigentes.

El inicio del estudio se dio con las líneas de influencia para las cargas puntuales. (Van de 0 a 0.6 m de relleno.)

Las líneas de influencia obtenidas para cada Momentos y cortantes son.

Gráfico 2. Línea de influencia de cortante en C. (Carga unitaria)

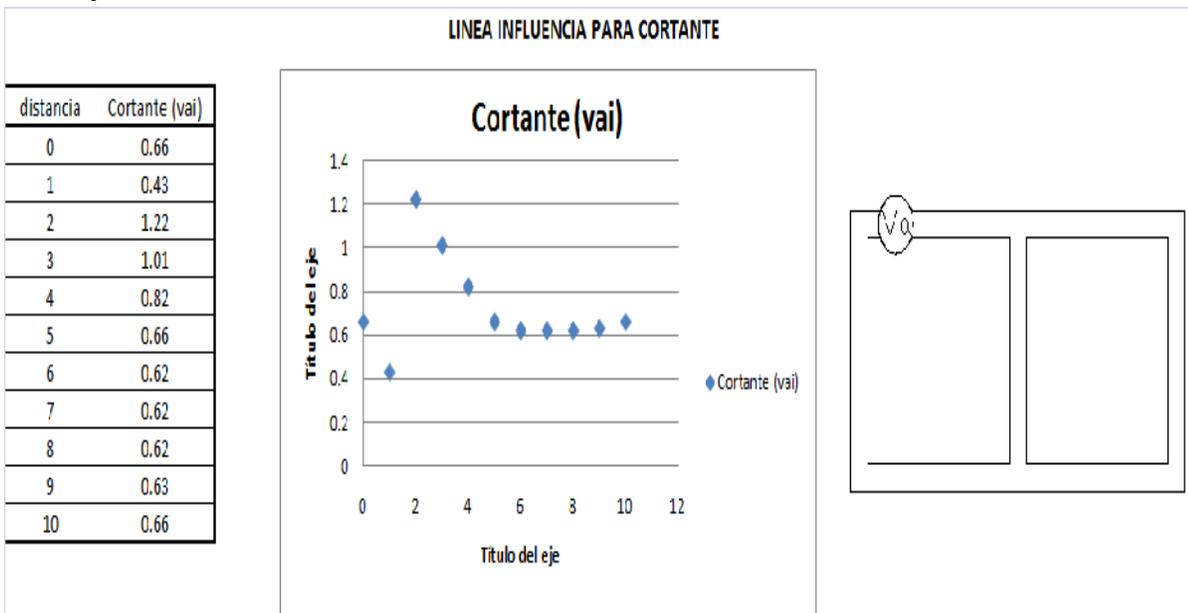


Gráfico 3. Línea de influencia de Momento positivo en 1. (Carga unitaria)

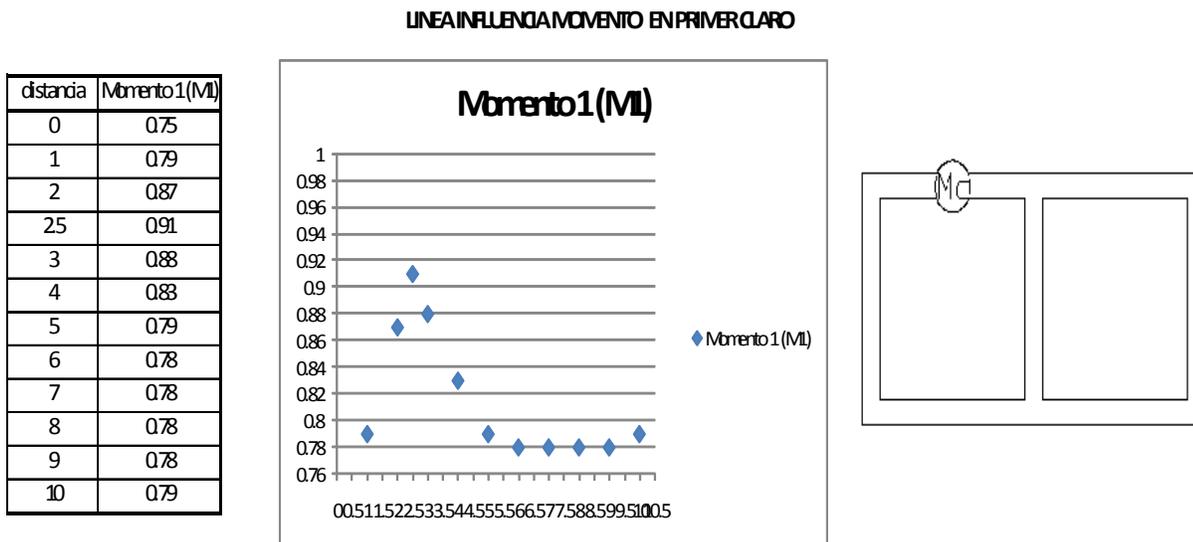
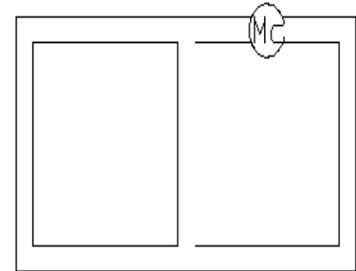
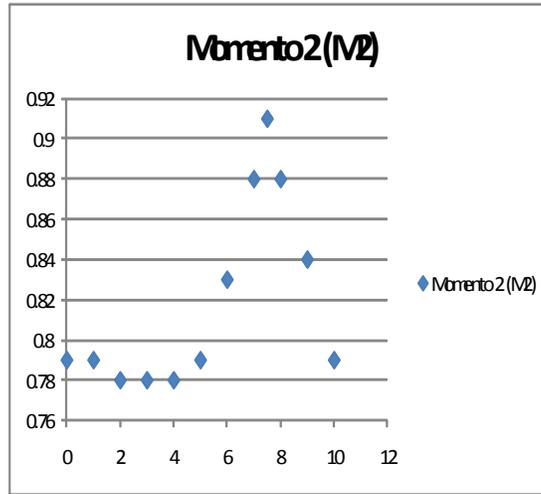


Gráfico 4. Línea de influencia de Momento positivo en 2. (Carga unitaria)

LINEA DE INFLUENCIA MOVIMIENTO PARA EL SEGUNDO CLARO

distancia	Momento2(M2)
0	0.79
1	0.79
2	0.78
3	0.78
4	0.78
5	0.79
6	0.83
7	0.88
7.5	0.91
8	0.88
9	0.84
10	0.79



Es importante resaltar que el estudio de línea de influencia de carga puntual se realizó solo en la losa superior, pues es el elemento que recibe directamente la carga impuesta por el vehículo de diseño.

Para profundidades superiores a los sesenta centímetros, las cargas no son puntuales, sino distribuidas. (Ver apartado, “Distribución de carga Viva”, en metodología).

Así, la distribución del área de contacto con respecto a la profundidad es:

Cuadro 6. Valores estadísticos de acciones respecto de estado de losa superior.

Franjas de contacto según 4P/7Z	
Profundidad	Longitud de contacto
0.6	1.1
0.7	1.2
0.8	1.4
0.9	1.6
1	1.8
1.1	1.9
1.2	2.1
1.3	2.3
1.4	2.5
1.5	2.6
1.6	2.8
1.7	3.0
1.8	3.2
1.9	3.3
2	3.5
2.1	3.7
2.2	3.9
2.3	4.0
2.4	4.2
2.5	4.4

Por tanto las longitudes finales para las cuales se utilizan estas franjas son:

Cuadro 7. Longitudes máximas de franjas de carga.

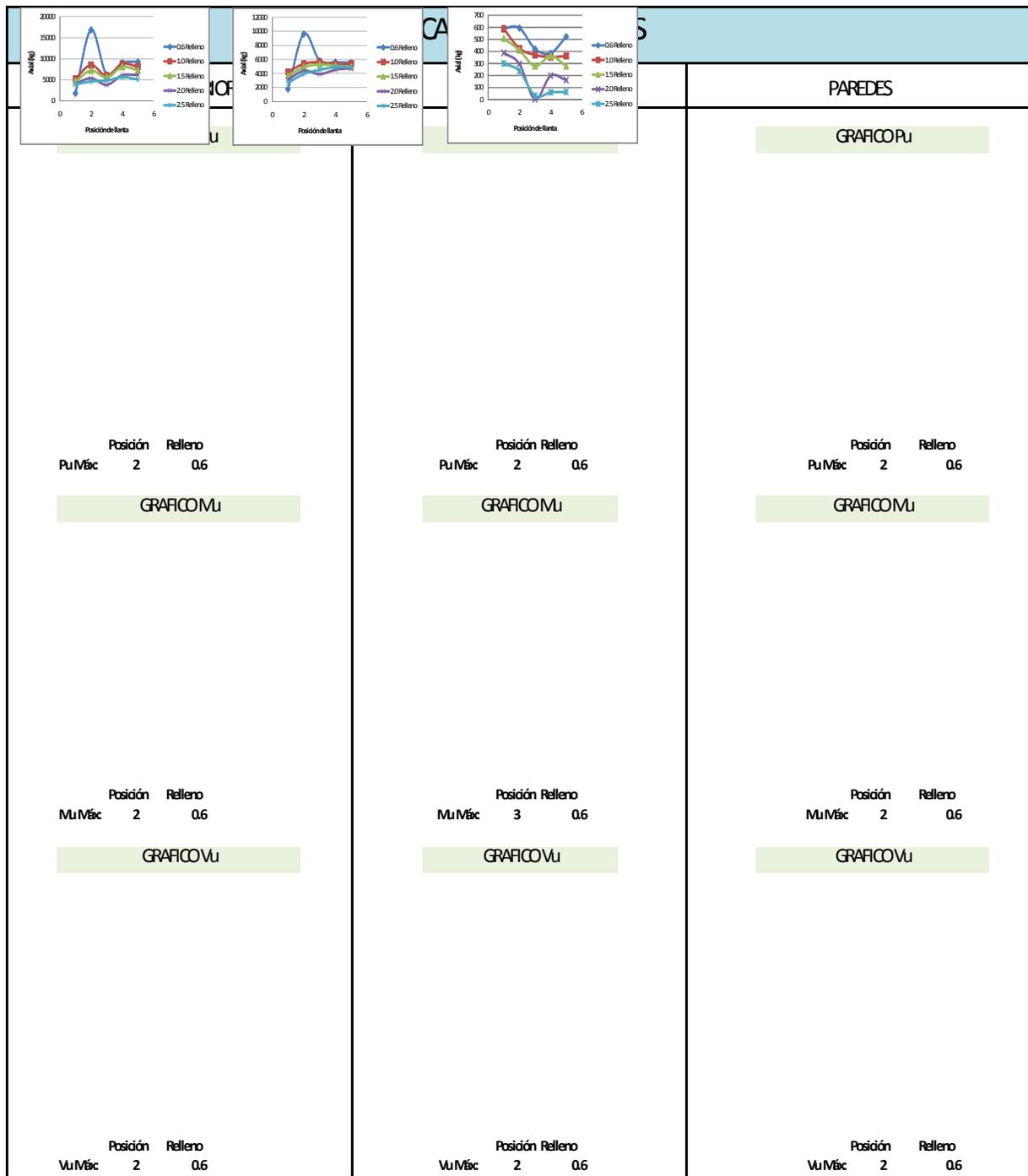
Color	Rango(máximo)(m)
Red	1.76/0.43
Blue	1.77/1.77
Yellow	2.99/2.67
Light Green	3.43/1.78
Dark Blue	4.41/4.41

Nota: el primer número que aparece en el rango corresponde a la longitud abarcada por la primera llanta que ingresa a la losa; el segundo es la longitud de la franja de carga, cuando ingresa la segunda llanta a la losa, sin que la primera haya salido de esta. Ello es aplicable para alcantarillas de una, dos o tres celdas.

Una vez obtenidas las longitudes de franja, para las cuales se tienen las mayores dimensiones de carga distribuida, se deben colocar éstas en el modelo por seguir, para saber cómo cambian las acciones internas de los elementos con respecto a la profundidad de relleno, tomando como inicio de relleno los 0.6 m: a esta profundidad se inicia la disipación de carga, y se finaliza a los 2.5 m de profundidad, pues, para profundidades mayores, no se considera la carga viva, debido a que su magnitud es tan pequeña en relación con la magnitud de la carga de relleno, que es despreciable. (Ver “*distribución de carga*” en metodología.)

Con estas premisas, se obtuvieron los siguientes gráficos de variación de acciones, los cuales corresponden a las líneas de influencia para carga distribuida con profundidades de 0.6 a 2.5 m de columna de relleno.

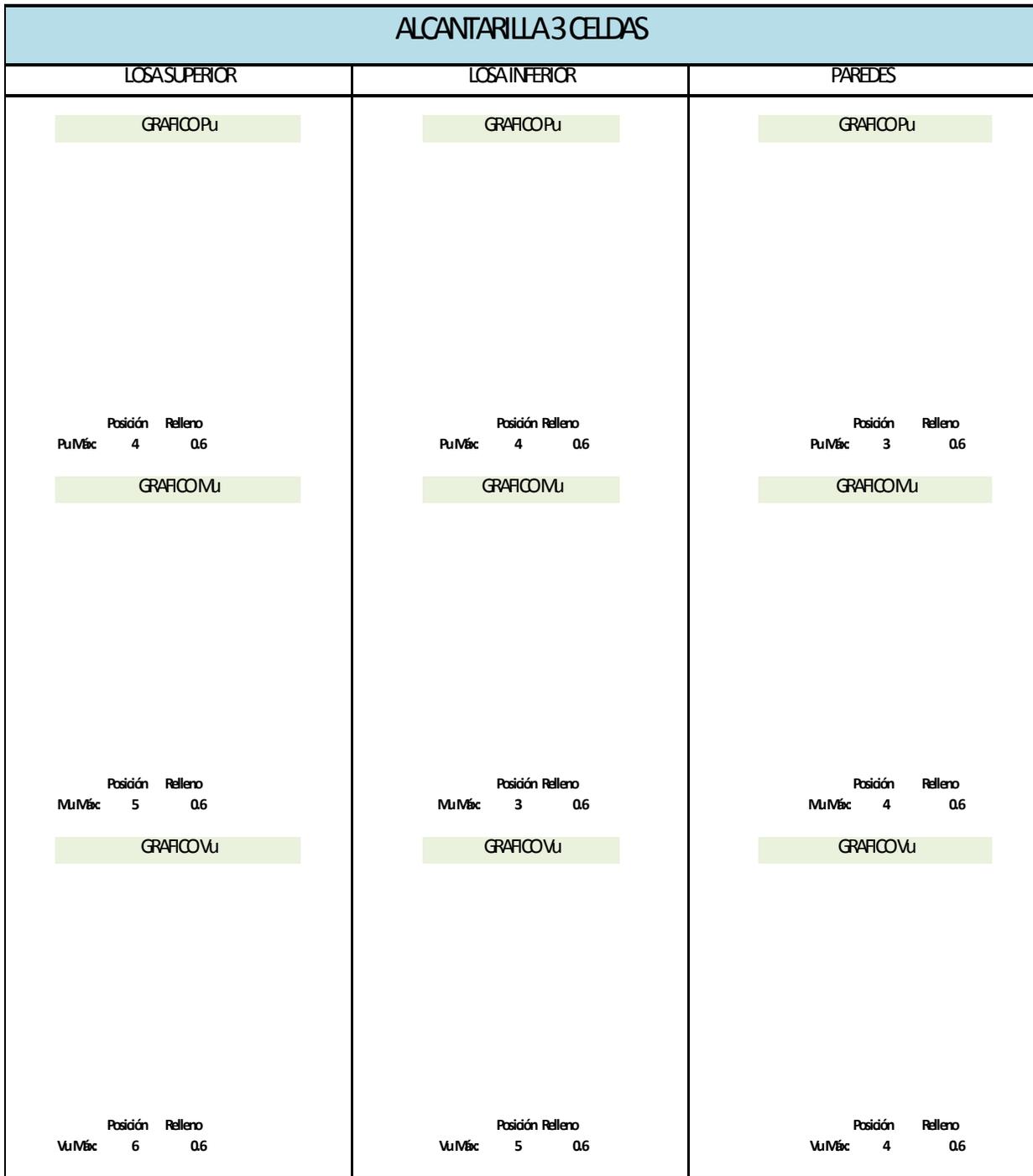
Gráfico 5. Líneas de influencia para alcantarillas de dos celdas.



Nota: las acciones anteriores se obtuvieron para una alcantarilla de 2 celdas, con 2,5 m de luz y 3,05 m de altura. Cortante tomado a una distancia

“d”, desde las paredes. Los gráficos de momento fueron hechos para los valores negativos, obtenidos del análisis estructural.

Grafico 6. Líneas de influencia para alcantarillas de tres celdas.



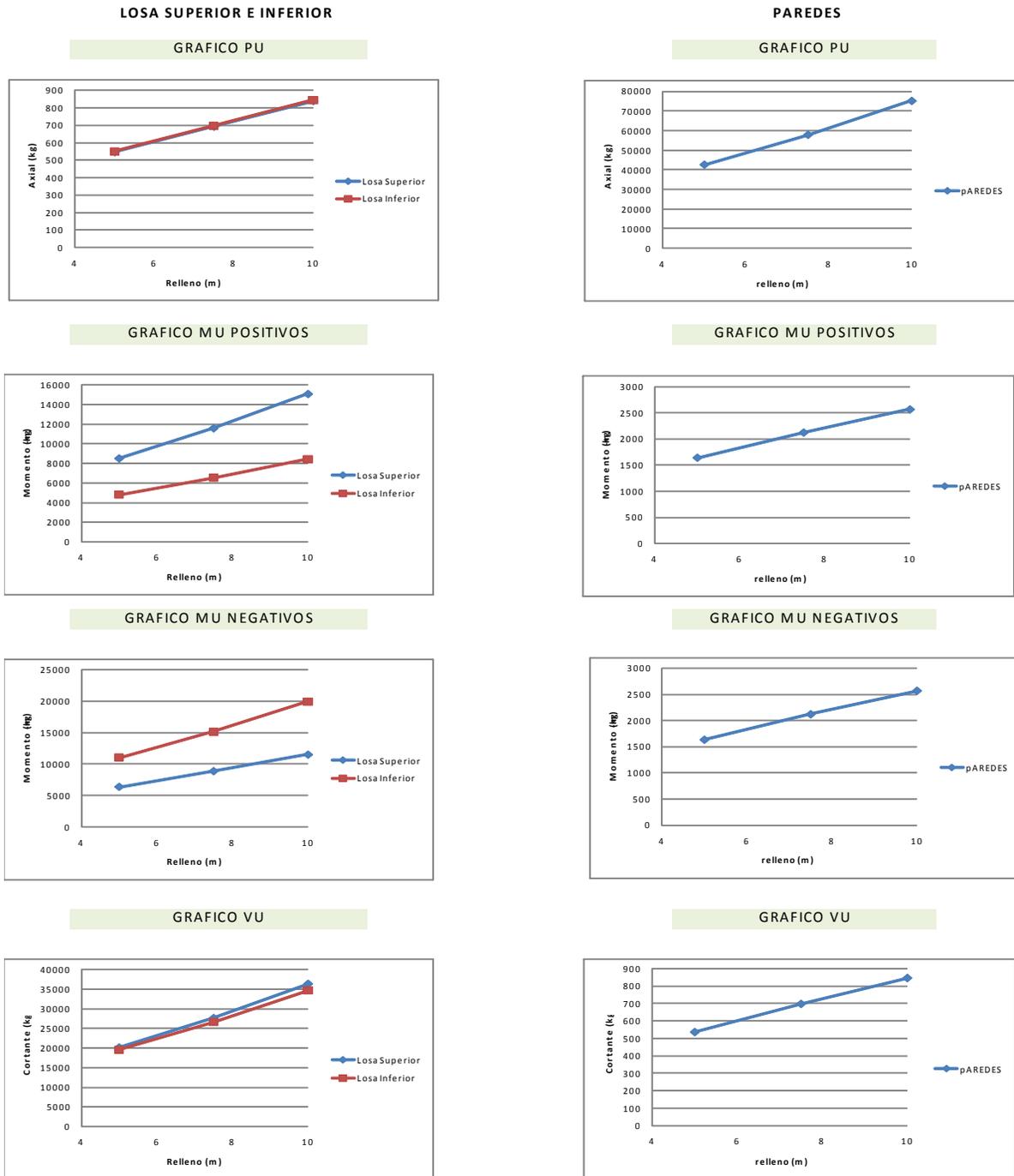
Nota: las acciones anteriores se obtuvieron para una alcantarilla de 3 celdas, con 2,5 m de luz y 3,05 m de altura. Cortante tomado a una distancia "d", desde las paredes. Los gráficos de

momento fueron hechos para los valores negativos, obtenidos del análisis estructural.

Se dispuso a realizar el mismo trabajo pero ahora con las profundidades restantes, de manera que se pudiera obtener valores de acciones para profundidades mayores a 2,5 m, y

menores a los 10 m, para apreciar el cambio de las acciones conforme la profundidad.

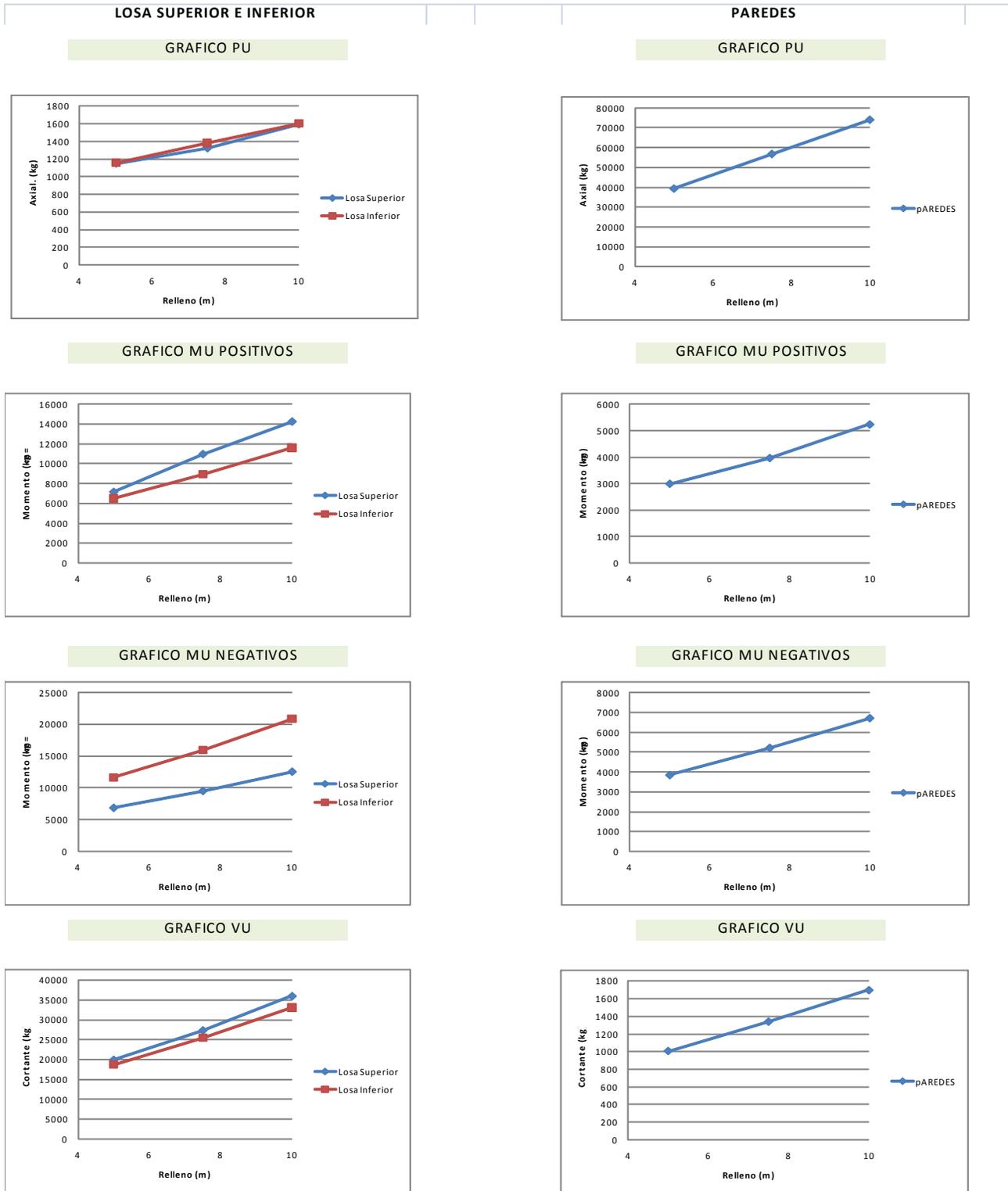
Gráfico 7. Acciones para dos celdas, a profundidades mayores de 2,5 m.



Nota: las acciones anteriores se obtuvieron para una alcantarilla de 2 celdas, con 2,5 m de luz y 3,05 m de

altura. Cortante tomado a una distancia "d", desde las paredes

Gráfico 8. Líneas de influencias para tres celdas, a profundidades mayores a los 2,5 m.



Nota: las acciones anteriores se obtuvieron para una alcantarilla de 3 celdas, con 2,5 m de luz y 3,05 m de

altura. Cortante tomado a una distancia "d", desde las paredes

Por último, con los valores máximos encontrados con la información anterior, se conformó el cuadro de posiciones finales, con el que se compiló en la base

de datos de acciones para todas las combinaciones de alcantarilla existentes, que se presenta en el apéndice 4.

Cuadro 8. Posiciones finales para colocar carga viva, según el número de celdas y las acciones por utilizar.

Relleno (m)	# Celdas	Los Superior				Los Inferior				Paredes			
		Pu (kg)	Mu ↑ (kg-m)	Mu ↓ (kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑ (kg-m)	Mu ↓ (kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑ (kg-m)	Mu ↓ (kg-m)	Vu (kg)
0a1	1	1	SIEVPREAh/3 DEL PRIMER APOYO		1	1	SIEVPREAh/3 DEL PRIMER APOYO		1	1	SIEVPREAh/3 DEL PRIMER APOYO		1
	2												
	3												
1a25	1	Longitud carga distribuida supera longitud de alcantarilla											
	2	2	2	2	2	2	3	3	1	1			
	3	4	2	2	4	3	3	3	4	4			
2,5a10	1	Longitud carga distribuida supera longitud de alcantarilla											
	2												
	3												

Se tiene que todas las posiciones anteriores son para la carga viva. Sin embargo, esta carga viva se genera por los vehículos de diseño indicados en "Carga Temporal", de la sección de Metodología. Así, se utilizó para el diseño, la vagoneta MACK RD 688 – SX, con un peso de 39 toneladas, y un peso por llanta de diseño de 14600 kg.

Con esta carga, se emplearon las líneas de influencia anterior. Se consideraron los demás vehículos de diseño, con el objetivo de resguardar que el cálculo con la vagoneta cubre las acciones obtenidas con los demás vehículos:

SE TIENE QUE PARA ROQUERA

P: 14600
 IM: 0.18
 Cv: 17228 kg

de grafico de linea de influencia se tiene:

Mu max: 0.91 x Cv
 Mu: 15677.48 kg-m

Con la información anterior se determinaron las posiciones criticas, las cuales se combinaron con el resto de las cargas: permanente, temporal, empuje y relleno. Con estas acciones últimas se obtuvieron las acciones de diseño.

Para presentar los valores de los diseños finales, se ordenaron en tablas, a

Para transporte de 50 ton

P: 50000 kg
 P en eje: 13750 kg
 P en solo un lado del eje: 6875 kg
 IM: 0.1

Cv: 7562.5 kg

de grafico de linea de influencia se tiene:

Mu max: (0.77+0.83)xCv
 Mu max: 12100 kg-m

Para carreta de 60 ton

P: 60000 kg
 P en eje: 16500 kg
 P en solo un lado del eje: 8250 kg
 IM: 0.1

Cv: 9075 kg

de grafico de linea de influencia se tiene:

Mu max: (0.77+0.83)xCv
 Mu max: 14520 kg-m

Así:

$$15677 > \begin{cases} 12100 \\ 14520 \end{cases} \therefore \text{ Uso Roquera: 14600 kg}$$

manera de poder encontrar rápidamente los valores del diseño, dependiendo de las dimensiones y configuración de alcantarillas que se vaya a necesitar

Cuadro 9. Salida de datos de tabla final de diseño.

Luz (m)			
Altura (m)			
Máximo Relleno (m)			
Concreto	Losa superior T1 (cm)		
	Losa inferior T2 (cm)		
	Paredes (cm)		
ACERO DE REFUERZO	L o s a	a	Varilla #
			espaciamiento (cm)
			longitud (cm)
		b	Varilla #
			espaciamiento (cm)
			longitud (cm)
	Acero por cortante	Varilla #	
		Cantidad ganchos	
		Esp. Transversal (cm)	
	T e m p e r a t u r a	Transversal	Varilla #
			espaciamiento (cm)
			Cantidad
		Longitudinal	Varilla #
			espaciamiento (cm)
			Cantidad
	L o s a i n f e r i o r	c	Varilla #
			espaciamiento (cm)
			longitud (cm)
		d	Varilla #
			espaciamiento (cm)
			longitud (cm)
		e	Varilla #
			espaciamiento (cm)
			longitud (cm)
		Acero por cortante	Varilla #
			Cantidad ganchos
			Esp. Transversal (cm)
	T e m p e r a t u r a	Transversal	Varilla #
			espaciamiento (cm)
			Cantidad
Longitudinal		Varilla #	
		espaciamiento (cm)	
		Cantidad	
P a r e d e s	f	Varilla #	
		espaciamiento (cm)	
		Cantidad	
	Temperatura	Varilla #	
		Cantidad	
		espaciamiento (cm)	
CANTIDAD	CONCRETO m3/ml		
	Acero kg/mL		
CARACTERÍSTICAS HIDRAULICAS	Area (m2)		
	Radio hidráulico (m)		
	Capacidad de descarga "Q" (m3/s)		
	Pendiente máxima a utilizar (%)		

Nota: La nomenclatura de las letras se encuentra en las imágenes del apéndice 3. Los resultados finales de diseño se presentan en planos, los cuales se ofrecen en el apéndice 7, pues son tablas sumamente extensas para ser presentadas en esta sección.

Análisis de Resultados

En el trabajo realizado, lo que se hizo fue una serie de estudios puntuales y limitados, todos dirigidos a obtener el diseño y la parametrización de las alcantarillas. El objetivo es generar planos típicos para alcantarillas de cuadro de 1, 2 y 3 celdas con concreto reforzado. Los estudios que se realizaron para lograrlo, además de la parametrización (obviamente representativa) que se consiguió hacer y documentar, fueron medios para lograr dicho fin. Los planos típicos permitirán al ICE una respuesta más rápida que un diseño ajustado a cada sitio, sin dejar de lado la economía y la seguridad de estas estructuras.

El análisis comenzó con el ordenamiento de los parámetros. Se realizaron varios estudios de manera paralela, útiles para continuar con el procedimiento (explicado en la metodología), para el diseño.

La selección de los suelos por utilizar se reunió en una tabla, la cual se presenta en la Tabla 1 de la sección de resultados. Esta tabla fue formada de la conjunción de distintas bibliografías como Braja Das, Bowles, Jiménez Salas, Villalaz, para encontrar los valores de peso específico, ángulo de fricción y módulo de reacción de los suelos. Sin embargo, el Área Ingeniería Geotécnica del ICE recomendó utilizar valores de arenas, arcillas y gravas; ello, amparado en la experiencia obtenida por esta Área en la construcción de este tipo de estructuras, ya que se informó que los tres suelos sugeridos son los más representativos (Esto se referenció según lo que los ingenieros del ICE han encontrado en distintos lugares del país.). De esta manera, se utilizaron los tipos de suelos recomendados por el área de geotecnia, y las propiedades mecánicas de éstos se obtuvieron de la bibliografía antes citada.

Para el diseño de las alcantarillas, se estableció un modelo para el análisis estructural. Dicho modelo contemplaba las características geotécnicas descritas en el Cuadro 2 de la sección de resultados.

Se buscaba el modelo idóneo para el proyecto. De aquí se desprende el Cuadro 3, el cual se formó escogiendo una

alcantarilla de dos celdas, con luces y alturas promedio. Para este modelo de estudio se obtuvieron las acciones de fuerza axial, momento tanto positivos o negativos y cortantes para la losa superior, la losa inferior y las paredes. Estos valores fueron tomados con el modelo de resortes, explicado en la metodología; así, se consideró el objetivo de este estudio era determinar la influencia de los parámetros geotécnicos en los resultados del diseño, donde la constante de los resortes era la variable del estudio.

De los cuadros 2 y 3, se desprendieron datos con los que se realizó el Gráfico 1 de la sección de resultados. Se puede observar que, para la fuerza axial, se determinó que el modelo que usa apoyos, da mayores acciones, conforme el relleno se acerca a su máxima profundidad. Sin embargo, para el relleno de un metro, los valores de "Pu" convergen en un mismo punto, de manera que no importa el tipo de material utilizado, pues la fuerza axial que debe soportar la losa superior siempre está regida por la carga viva y no por el tipo de material utilizado. Si se aumenta la profundidad, se acentúan cambios en el comportamiento de las acciones; no obstante, no son pronunciados como sí lo son los datos obtenidos con el modelo de apoyos, el cual tenía en un extremo de la losa inferior una articulación, y en el otro, un rodillo.

Cabe recalcar que los valores de coeficiente de balasto utilizados en el estudio fueron Cb:1, Cb: 12.5, Cb: 125, Cb: 1250 (todos kg/m³). En cuanto a las acciones obtenidas con estos valores anteriores, se tiene que la fuerza axial varía en un 25% para los cuatro coeficientes de balasto, el momento tiene un desfase de 10% entre sus acciones máximas y el cortante cambia en 8%.

Si se incluye el modelo con apoyos en los resultados obtenidos, se tiene que la fuerza axial y el momento se desplazan en un 22% aproximadamente de los valores máximos obtenidos por el modelo de resortes, además que en los momentos si se presentan valores mayores, por ejemplo, un 33% de cambio en la losa superior, un 75% en la losa

inferior, y un 46% en las paredes. Como es apreciable, los cambios si son significativos entre los modelos con resortes y los de apoyos, es por esto que se llega al criterio que el tipo de suelo no es importante para el modelo, sin embargo, la ausencia de este (utilizar un modelo de apoyos), si es significativo para las acciones.

Con tales indicadores se establece que, sin importar el tipo de suelo o de apoyo, la carga axial en estos elementos solo depende del vehículo de diseño, y no de la profundidad donde se encuentre la alcantarilla, para los momentos, se observó que las acciones obtenidas para la losa superior no cambian sensiblemente, aunque el "Cb" sí cambie.

Otro aspecto que se ha de notar es que, en todas las líneas referentes al momento, se puede apreciar cómo se dan cambios con respecto a los diferentes valores de "Cb"; sin embargo, estos cambios se dan cuando se aumenta "Cb" en varios órdenes de magnitud, por ejemplo de $C_b=1$ y $C_b=12.5$. Se notó cómo en la losa superior se da un $M_u=9557$ kg-m para un $k=1$, y para un $k=1250$ el $M_u=7719$. De este modo, se observó cómo el cambio de los momentos es del 19%, con un aumento del 1250%. Se concluye que el cambio en la magnitud de las acciones es muy pequeño con respecto al gran cambio de la magnitud del C_b . Además, los cambios considerables en las acciones se empiezan a notar después de aumentar en 125% el valor $C_b=1$. Se debe recordar el que los valores de los suelos utilizados van de 1 a 12,5 kg/m³.

Al discutir las acciones de cortante, para la losa superior se aprecia cómo las líneas son convergentes entre sí; no interesa el tipo de suelo, apoyo o relleno, sino, solamente, la carga aplicada a la estructura. El valor más crítico se da con el relleno más profundo (10m).

Si se referencian los valores mencionados de acciones directamente al diseño de alcantarillas, se puede notar cómo los suelos que se utilizaron para los diseños tiene unos valores de módulo de reacción que oscilan entre 0.9 y 12.5; por ende, las acciones obtenidas para los tres suelos, no cambian considerablemente, pues se demostró que para que exista un cambio, se debe aumentar el C_b en 125 puntos del valor de $C_b=1$; y entre los existentes solo se crece en 12.6 puntos.

Con base en los resultados expuestos, se decidió que el modelo a usar para la elaboración de los diseños,

fuera el de resortes. Las acciones siempre fueron las más elevadas, aparte de ser un modelo más realista, pues contempla la rigidez del medio sobre la estructura.

Del Gráfico #1 de la sección de resultados, se tomaron los valores para suelos con "Cb" entre 1 y 12.5. Se observó que dichas líneas convergían entre sí, lo que indica que las acciones no cambian para un rango de "Cb" con poca diferencia entre sus valores.

Según el gráfico indicado, se tuvo que el cambio en la magnitud de las acciones entre $C_b=1$ y $C_b=12.5$, fue aproximadamente del 10%, lo que se consideró un porcentaje aceptable de variación. Así, con estos valores se decidió usar solo un tipo de suelo, en lugar de los tres seleccionados inicialmente. Con esta información encontró que no era necesario realizar el diseño para los tres tipos de suelos, porque el análisis iba a arrojar valores de fuerza axial, momento y cortante muy similares.

Alternamente, se dispuso con el área de ingeniería geotecnia que el suelo por utilizar era la "Grava Media", con un peso específico de 2200 kg/m³, un ángulo de fricción (ϕ) de 47° y un coeficiente de balasto (C_b) de 12,5 kg/cm³. Por la razón de que es el material con mayor peso específico, esto produce las mayores cargas por columna de relleno; ello, porque su columna de material es mas pesada que la misma columna pero en otro material. Otra razón de peso fue que es el suelo con mayor coeficiente de balasto, que, aunque ya se demostró que la estructura no es sensible a su cambio, sí es el que mejor puede distribuir los esfuerzos.

Una vez definidos el modelo a usar y el tipo de suelo, se tomó en cuenta la parte constructiva de estas estructuras.

Se analizó la forma más adecuada de llevarlas a cabo. A raíz de preguntas realizadas al área de ingeniería en construcción del ICE, se determinó que estas alcantarillas son construidas completamente monolíticas, en donde todos los elementos son continuos, de manera que generan mejor distribución de esfuerzos por medio de toda la estructura.

Para construir la losa superior, se debe de dejar previstas las varillas que empotrarán a ésta, desde las paredes, esto implicaba, dejar acero expuesto además de la dificultad del doblado de las varillas a la hora de la chorrea de concreto. Se dispuso estudiar los cambios que presentaría una alcantarilla monolítica, contra una que tenga su losa superior

simplemente apoyada. Se considera que sería una manera más apropiada de construirlas, pues se evitarían todos los problemas antes citados.

Además se contempla la idea de prefabricar la losa superior para alcantarillas de dimensiones "moderadas", de manera de agilizar el proceso constructivo, sin embargo, este tipo de losas no son tomadas en cuenta en la ejecución del presente proyecto, sino que queda propuesto para una posible mejora al mismo.

Se realizó un estudio de las acciones provocadas por las cargas de diseño para ambos modelos, uno continuo en todos sus elementos y otro con la losa superior simplemente apoyada.

Se tomaron en cuenta dos combinaciones geométricas de alcantarillas: una de 1 celdas y otra de 2 celdas, ambas con luces de 3 metros y alturas de 2.45 metros. Se cargaron con dos tipos de relleno: uno de tres metros y otro de cincuenta centímetros.

Estos valores de relleno no fueron antojadizos, sino que sus magnitudes dependen básicamente de la forma de aplicación de carga temporal sobre la losa superior, de modo que, para el relleno de cincuenta centímetros, la carga viva se aplica puntualmente sobre la losa, según el apartado de carga de relleno. En cambio, para el de tres metros, ya no se aplica dicha carga puntual, pues se supone que ya se ha distribuido completamente con la profundidad. Así las cosas, se comparan las mismas acciones para combinaciones geométricas similares, pero una en su condición monolítica y otra en su condición simple, con el propósito de obtener porcentajes de diferencia entre ambas configuraciones.

Se puede observar en el Cuadro 5 del apartado de resultados, cómo los promedios entre la losa superior, la losa inferior y las paredes varían de 0.02 a 0.3 %, en las cuatro combinaciones de alcantarilla utilizadas, lo que indica que los cambios entre un método y otro sí existen. Sin embargo, se debe decidir si estos cambios son sensibles, como para mantener la misma forma de construcción existente o cambiarla.

Por tanto, del cuadro 5 se obtienen los promedios globales de las cuatro combinaciones arrojan una diferencia del 15% en la fuerza axial, la cual no es de importancia pues su diferencia es aceptable, además de que la fuerza axial es la acción de menor interés en el diseño, pues sus magnitudes son pequeñas en

comparación a la resistencias que aporta cada estructura a la compresión; de manera que una diferencia del quince por ciento, si es aceptable para los diseños realizados. Además que el comportamiento lo rige el momento y el cortante.

El promedio global del momento y el cortante estuvieron al margen de los nueve puntos y los trece puntos porcentuales respectivamente, los cuales son más significativos, tomando en cuenta que es la capacidad a flexión lo que rige el espesor de los elementos; no obstante, un margen de un 9% y un 13% se considera aceptable, si se va a lograr construir una losa superior simplemente apoyada y mejorar la forma de construcción anterior.

Una vez tomada la grava como parámetro definitivo de diseño, se estudió sobre los rellenos, y cómo estos afectaron la carga viva, al punto de que no era la misma situación, cuando se tiene una alcantarilla superficial a una enterrada. Es por esto que se indagó sobre el comportamiento de las estructuras con diferentes profundidades de relleno. Para esto, se dividió los 10 metros de profundidad (se utilizaron 10 m de profundidad por solicitaciones del ICE) en tres tramos según lo especifica el AASHTO, en las cuales se tiene cargas puntuales para profundidades de 0 a 0,6 metros, cargas distribuidas para un rango de 0,6 a 2,5 metros, y para un intervalo final de 2,5 a 10 metros ya no se contempla la carga viva; sin embargo, ésta se reemplaza por un incremento cada vez más considerable en lo que a carga por relleno se refiere. Cabe resaltar que la carga temporal es la impuesta por los vehículo de diseño especificados en la metodología.

Así, cuanto menos profunda es una alcantarilla, ésta tiene una mayor carga temporal, por la razón de una pobre carga de relleno. En cambio, cuando la profundidad aumenta, esta relación se hace contraria, pues a rellenos mayores, la carga viva pierde importancia y la carga de la columna de tierra se vuelve cada vez más significativa.

Entonces, el estudio de cargas se comenzó por la carga temporal, en el rango de alcantarillas superficiales (de 0 a 0,6 metros) hasta un metro de relleno, donde la carga impuesta por los vehículos de diseño se considera puntual en este rango. Para realizar el estudio, se usaron líneas de influencia. Con ellas se pudo saber en qué punto se debe poner la carga puntual de la llanta, de manera que ésta

ejerza los esfuerzos máximos para un elemento. Para esto, se tomó una alcantarilla de dos y tres celdas, con una carga unitaria, a fin de que los resultados pudieran ser analizados para cualquier tipo de alcantarilla. Con esta se obtuvo el Gráfico 2 de la sección de resultados, donde se tiene que, entre el diez y treinta por ciento de la longitud de luz, se encuentra el cortante máximo, y para el resto de la longitud, se estabiliza su valor.

De la misma manera, se analizó el momento para las cargas puntuales: sobre la luz se puso una carga unitaria, y se tomaron los valores para formar los gráficos 3 y 4, en donde se pudo ver que el momento máximo se da para el 25 % de la luz, tomando como referencia el punto llamado "Mc" (ver gráfico 3 y 4), en el sentido normal del movimiento del vehículo (camión circulando hacia adelante).

Se debió de tener en cuenta que la influencia de la carga viva disminuía en relación con la profundidad. Esto, debido al cono formado en el suelo, el cual produce distribución de la carga viva. Sin embargo, para las alcantarillas de 1 celda, se tuvo que en el rango de 0 a 1 m de relleno, se debió colocar la carga puntual con las líneas de influencia anteriores. Por el contrario, para rellenos mayores a 1 m, se hizo un estudio de carga distribuida.

Para una celda no afecto la longitud de carga distribuida pues dicha longitud fue siempre mayor a la longitud de luz de la alcantarilla. Se concluyó que para alcantarillas de una celda, con más de 1 metro de relleno, su carga viva se colocaría como una carga uniforme distribuida pues toda su losa siempre estaría completamente cargada.

Por tanto, para el primer rango de profundidad (0 a 0,6 m), las líneas de influencia de carga puntual sirvieron para 1,2 y 3 celdas., ya que se extrapolo los valores obtenidos para las 2 celdas, a 1 y 3 celdas. Esto llevó a crear líneas de influencia para profundidades mayores a los 0,6 m, donde la carga pasa de ser puntual a distribuida, y es aplicable para "combinaciones geométricas" con rellenos de 0,6 a 2,5 metros de profundidad.

Para realizar el estudio de estas líneas de influencia fue necesario determinar las longitudes de las franjas cargadas. Esto, por la razón de que, al ser un cono de distribución de carga, una alcantarilla tiene diferentes valores de carga conforme varia la profundidad. Entre más profunda esté la alcantarilla, más se

acerca a la parte ancha del cono de distribución.

Se estableció un sistema de verificación de cómo entra el camión de diseño a la alcantarilla, de manera que siempre va a entrar una llanta primero a la losa. Si la losa es más pequeña que la longitud entre los tándem del camión, entonces siempre solo una llanta va a cargar la losa; pero si la luz de la estructura es más grande que dicha distancia, una segunda llanta entra a la losa aún cuando la primera no ha salido de ella.

Para el estudio de este fenómeno, se debieron tomar todas las combinaciones geométricas existentes de dos y tres celdas, e idear un sistema de posiciones de llanta que consiste en poner siempre la llanta más pesada del camión de diseño en la entrada de la losa, y luego ir corriendo esta posición, de manera que esta llanta iba a esta siempre en los inicios o centros de los claros existentes entre una pared y otra. Por ejemplo, en la losa de una alcantarilla de una celda, solo iban a existir tres posiciones de llanta: la primera sería en el inicio de la luz; la segunda, en el centro del claro comprendido entre ambas paredes, y la tercera en el final de la luz. De esta forma se establecieron 3 posiciones de llanta para 1 celda, 5 posiciones para 2 celdas y 7 posiciones para 3 celdas.

Con esta convención, se tomó una combinación específica de alcantarilla, a la cual se le hizo un estudio de acciones para rellenos de 0.6 a 2,5m, de manera que se pudiera apreciar cómo cambian las acciones internas de los elementos, y así encontrar en qué posiciones de llanta y a qué profundidades se producían los esfuerzos máximos.

Para la elaboración de las líneas de influencia para alcantarillas de dos celdas, se utilizó una luz de 2,5 m, una altura de 3,05 m; se utilizaron profundidades de relleno de 0,6 a 2,5 m.

Para cada uno de estos rellenos; se utilizaron cinco posiciones de llanta las cuales fueron: tres posiciones en la parte superior de las paredes, y dos posiciones en los centros de los dos claros de la losa superior. Luego, se obtuvieron los valores de fuerza axial, momento y cortante para todas esas combinaciones de llantas, rellenos y luces. Con los datos obtenidos se construyó el Gráfico 5 de la sección de resultados.

En el gráfico, se observa que para fuerza axial, el máximo valor siempre se encuentra en la posición de llanta dos, o

sea en el centro del primer claro. Este valor está asociado al relleno correspondiente a 0,6 metros. Esto es congruente con la teoría del cono de distribución de carga. Era de esperar que el mayor esfuerzo se da con el menor relleno, pues la carga del vehículo de diseño se ha distribuido muy poco a los 60 cm de profundidad. En ese punto se da una carga mayor que en los demás puntos de colocación de llanta. También, se puede notar en los gráficos, tanto para la losa superior como inferior, las líneas de carga se disminuyen conforme la profundidad, lo que es razonable, pues cuanto más profunda la alcantarilla, la carga viva es distribuida en una mayor longitud.

Por el contrario, se apreció cómo la fuerza axial para las paredes, es similar para toda magnitud de relleno, entre 1 y 2,5 m, lo que indica que el factor importante para esta carga en las paredes, es la carga impuesta por el camión de diseño. El peso del relleno que esté por encima de este no tiene un aporte importante en la magnitud de la acción.

Para los momentos, es la posición dos la que rige, pues, para losa superior y paredes se tiene que el momento máximo se da para la posición de llanta dos. En la losa inferior dicho valor corresponde a la posición 3. El momento en la losa superior se presenta cuando la llanta más cargada se ubicó en el centro del primer claro. Esto porque cuando esta llanta se encuentra en cualquier otra posición, la siguiente llanta del camión ya ha entrado en la losa. Se genera entonces un efecto de momento contrario al que se está tomando como máximo. Entonces el momento máximo es en la posición dos de la llanta y no en la cuatro, por ejemplo.

Se observó en el gráfico que la tendencia de las acciones eran menores conforme avanza la profundidad del relleno, lo que hace que las acciones para 0,6 m se tomen como aisladas con respecto a los valores tomados para los siguientes rellenos, pues estos datos no siguen la tendencia que cursan los que van en el rango de 1 a 2,5 m.

Para finalizar estas líneas de influencia de carga distribuida para dos celdas, se analizó el cortante. Se mantienen las tendencias anteriores: una línea mayor perteneciente al relleno de 0,6 m, que rige su valor máximo sobre la posición de rueda 2. Luego líneas simétricas y “casi” paralelas pertenecientes a los demás rellenos utilizados. Si se deja por fuera un

momento el relleno de 0,6 m, se puede apreciar cómo en la losa superior el cortante máximo pertenece al relleno de 1 m y se encuentra en la posición 2; el cortante para la losa inferior está en el relleno de 1 m y localizado en la posición 3 de la llanta, y para las paredes la posición máxima se localiza en la posición 1, con 1 m de relleno. Todos los máximos se encuentran a 1 m de relleno porque a esta profundidad se encuentra muy cerca la carga distribuida de la puntual.

Con las líneas de influencia construidas como se explicó anteriormente se obtuvieron las acciones máximas para distintas posiciones de llanta en rellenos de 0,6 m a 2,5 m.

Respecto del trabajo de las líneas de influencia para dos celdas, se realizó la misma labor para las alcantarillas de tres celdas, con las mismas dimensiones geométricas. Para este caso en particular, las posiciones de llanta aumentaron de cinco a siete; estas se ubicaron en: cuatro, en los cuatro tramos superiores de las paredes existentes de la alcantarilla, y las otras tres posiciones en los centros de los tres claros formados por la combinación de las tres celdas. (ver figura 9 de Metodología)

Si se observa el Gráfico 6 del apartado de resultados, específicamente los gráficos de carga axial, se puede comprobar que al igual que las alcantarillas de dos celdas, el relleno de 0,6 m es el que obtiene la mayor magnitud de carga; sin embargo, las posiciones de llanta son distintas tanto para la losa superior, como la inferior y las paredes. La acción máxima se encuentra en la posición cuatro, en el centro del segundo claro; pero para las paredes, la axial mayor está sobre la segunda pared, o en la posición tres de la figura 9 de la metodología. Otra característica en los gráficos, es la similitud en la tendencia de las líneas de acción, las cuales dan mayor veracidad al esquema, pues se nota que lo que diferencia una con otra, es la disminución de carga viva producida por la ecuación 7.

Además, al igual que en las dos celdas, la fuerza axial de las paredes no cambia su comportamiento con respecto a los rellenos; es decir, no importa el relleno que se tenga, ya que la línea siempre es convergente con las demás, lo que hace que el relleno no sea importante para esta acción, sino más bien lo que rige es la carga temporal.

Para los momentos, se encontró que la línea correspondiente al relleno de 0,6 m tiene un valor máximo por sobre los

demás rellenos; sin embargo, al analizar los rellenos de 1 a 2,5 m, se encontró que las acciones máximas se dan para las distintas posiciones de llanta, según fuera losa superior, losa inferior o paredes. Para la losa superior, el momento máximo que se encuentra en la posición 2 o en el centro del primer claro. Para la losa inferior, el valor máximo de momento se encontró en la posición 3. El valor máximo para las paredes coincidió en la posición 4 tanto para el relleno 0,6 m, para el de 1 m; esto es, en el centro del segundo claro de la alcantarilla. En el caso del cortante de las tres celdas, se pudo ver cómo las líneas de acción son "casi" paralelas entre sí, sin presentar grandes saltos de acciones entre un relleno y otro, lo que indicó que los rellenos no son un factor de peso a la hora de obtener los cortantes, y más bien, es la carga viva, la que incide de forma directa sobre la magnitud de dicha acción. En particular, se puede observar cómo para la losa superior, el cortante máximo se da para la posición 2, que es en el centro del primer claro.

Los cortantes para la losa inferior se dan con la posición 3 para todos los rellenos. En las paredes se obtuvo esta misma acción en la posición 4, para un relleno de 1 m.

Con estos valores analizados, se obtuvieron los lugares donde colocar la carga permanente. De esta manera se garantiza el diseño para las acciones máximas para una carga móvil, en la cual las acciones varían conforme su cambio de ubicación. Estas líneas se obtuvieron para un relleno máximo de 2,5 m; esto, porque el AASHTO indica que hasta esta profundidad se toma en cuenta la carga temporal. Sin embargo, se debe realizar un nuevo estudio para las profundidades que van desde los 2,5 m hasta los 10m, con la diferencia de que los datos obtenidos no son limitados a una franja de carga distribuida, sino que son aplicados a toda la longitud de la losa. Esto pues, por su profundidad, se considera que la parte inferior del cono de disminución de carga es tan amplia, que cubre sobradamente el ancho de la losa superior. Por esta razón, aquí las cargas obtenidas son cargas uniformemente distribuidas, y no solo distribuidas en una longitud parcial como en el caso del rango de relleno de 0,6 a 2,5 m.

Para la construcción de las tendencias de comportamiento de carga uniforme distribuida, se utilizó una combinación geométrica con 3 celdas, luz

de 2,45 m y altura de 3.05 m, con rellenos para profundidades entre los 2,5 y 10 m.

Con estos resultados se realizó el Gráfico 7, donde se obtuvo información del comportamiento de las acciones, para los tres elementos de las alcantarillas. Se observó el comportamiento de las fuerzas axiales de losa superior contra las de la losa inferior. Se comprobó que dichas acciones son similares para ambos elementos, pues sus líneas son congruentes, lo que indica que la fuerza axial crece con respecto a la profundidad de relleno, al igual que la axial en las paredes, cuyos valores presentan un comportamiento completamente lineal de la carga con respecto al relleno. Al analizar los gráficos basados en las losas, se ve cómo en los momentos positivos, la línea de la losa superior está por encima de la de la losa inferior, contrario a lo sucedido en el gráfico de momentos negativos. Esto es esperable pues el diagrama de momento de la losa superior tiene sus valores máximos para el sentido positivo de la flexión; en cambio, el diagrama para la losa inferior es como un espejo del diagrama de la losa superior.

Es decir, las magnitudes de las acciones en la losa superior y la inferior son similares, pero una posición espejo una con respecto a la otra.

En relación con los cortantes, son muy similares a los gráficos para fuerza axial; así, el cortante de la losa superior es levemente mayor al de la losa inferior en un 3%.

Una vez obtenidos los diagramas expuestos en el Gráfico 7, se muestra que todos ellos se comportan de la misma manera. Todos van en sentido creciente, de manera que su valor de acción aumenta conforme la profundidad de relleno. Esto se da porque cuanto más profunda esté la alcantarilla, es más pesada la columna de material por encima de la losa superior, de manera que le imprime mayor carga de relleno.

Esto es contrario a lo sucedido en el rango de 0,6 m a 2,5 m de relleno, pues, en ese rango, la carga predominante era la impuesta por el camión de diseño; en cambio, en las estructuras profundas esta carga temporal pierde relevancia, y, en su lugar, toma importancia la carga de relleno, la cual aumenta considerablemente su magnitud, en profundidades entre los 5 y 10 m.

Así, se obtuvo definitivamente los valores de las líneas de influencia para carga viva. Con este estudio, se puede localizar exactamente el punto donde se

empleó la carga temporal, en los modelos utilizados para el diseño de las alcantarillas

Como se pudo observar en las líneas para el rango de 0,6 m a 2,5 m, en todos los gráficos se siguió el patrón de que la línea de 0,6 m era la de mayor acción, y en algunos casos, estas acciones se salían del rango de las demás acciones obtenidas para rellenos entre 1 a 2,5 m. Por ende, se decidió unir el rango de 0 m a 0,6m, que de carga puntual, con el de 0,6 m de carga distribuida hasta 1 m, para obtener así el valor del primer rango de relleno por utilizar en el diseño final, que fue de 0 a 1 m de profundidad.

El siguiente valor de relleno por escoger fue el que se encontró entre 1 m y 2,5 m de profundidad. La razón de este rango de relleno es porque en las líneas de influencia descritas en los gráficos 5 y 6, se observó que los rellenos de 1 a 2,5 m, fueron siempre similares para todos los gráficos, con una diferencia entre los valores de sus acciones de un 6% aproximadamente; por lo tanto, el segundo valor de relleno para diseño fue de 1 a 2,5 m.

Queda un rango de relleno de 2,5 a 10 m, el cual fue el límite de relleno propuesto por el Area de Ingeniería Estructural y Arquitectura de PySA. Se acordó que, por el comportamiento lineal exhibido en el gráfico 7, no era necesario realizar diseños para este rango de rellenos, sino que él se dividió en dos nuevos rangos de relleno, los cuales van desde 2,5 m hasta 5 m, y de 5m a 10m.

Así, los diez metros de profundidad de relleno se subdividieron en cuatro zonas de diseño:

- Relleno 1: 0-1 m
- Relleno 2: 1-2,5 m
- Relleno 3: 2,5-5 m
- Relleno 4: 5-10 m

Con la información de las líneas de influencia se conformó el Cuadro 8 de la sección de resultados. Es la compilación de todas las posiciones de carga. Este cuadro contiene las posiciones de llanta donde se consiguen las acciones máximas para losa superior, losa inferior y paredes.

Con el cuadro, se determinó cómo aplicar la carga viva a las estructuras; sin embargo, se debió seleccionar cuál es la magnitud y la configuración de la carga viva de diseño. Se consideraron cuatro vehículos. Por tanto, se hizo un estudio para determinar la carga temporal por utilizar en el diseño.

Se investigaron las características de los camiones de diseño, su geometría, sus cargas máximas, la cantidad de ejes de cada uno, la distancia entre los ejes, entre otras. De los cuatro vehículos de diseño se determinó cuál de ellos era el más crítico a la hora de realizar dicho análisis, por lo que se utilizó una vagoneta roquera de 36 t, un transporte especial de 50 toneladas y otro igual de 60 toneladas, y un vehículo de diseño estándar HS-25.

Para la realización de este estudio, se utilizaron las líneas de influencia para carga puntual aplicable a un solo eje, de manera que se pudiera encontrar cuál de los cuatro vehículos de diseño produciría mayores acciones. Es de verdadera importancia rescatar que esta es fue de las decisiones más representativas del proyecto, pues dependiendo del vehículo escogido, se podían o no encarecer los diseños.

Como la vagoneta roquera utiliza dos llantas en un lado de su eje trasero, se tomó que la reacción de la fuerza resultante de dicho eje se encuentra en el centro del eje tándem. Por esta razón, se localiza dicha reacción de carga en el punto más alto de la línea de influencia, para encontrar así el valor del momento máximo que produciría este vehículo. Por otro lado, los transportes especiales por analizar tienen en su tándem trasero tres llantas por lado, por lo cual se tomaron dos reacciones de fuerza resultante, ubicadas en los dos espacios intermedios entre las tres ruedas mencionadas. Como son dos reacciones con magnitudes iguales, no se puede colocar una de ellas en la cota máxima de la línea de influencia correspondiente a momento, ya que la otra reacción quedaría en una cota más pequeña de acción; por lo tanto, se tomó la distancia que hay entre ambas reacciones, y se colocó centrada con la cota máxima, de manera que ambas reacciones fueran a estar a cada lado de la cumbre del gráfico 2 de la sección de resultados. La cota en donde se colocaron las reacciones no fue la máxima; sin embargo, es una cota más considerable ya que para las dos cargas es igual.

Así, se obtuvo que para la vagoneta roquera se tiene un valor de momento máximo de 15700 kg-m, con un valor del 18% de incremento a la carga viva por impacto; por el contrario, el transporte de 50 toneladas, generó un momento de 12100 kg-m, y el de 60 toneladas, uno de 14520 kg-m, ambos con un impacto de 10% (ver carga de impacto en la sección de Metodología). Estos

valores presentaron como el momento de la roquera es de un 7% mayor al momento producido por el transporte de 60 toneladas, y un 22% en relación con el de 50 toneladas.

Por ende, el camión de diseño seleccionado fue la vagoneta roquera, ya que genera los momentos mayores de los cuatro vehículos. Ello sucede por el incremento de la carga temporal debido al impacto, pues el impacto para la roquera es un 80% mayor que el de la carreta. De manera que, aunque las carretas sean más pesadas que la vagoneta, nunca van a generar acciones más grandes que esta, por la razón de la regulación de su velocidad.

Al obtener todos los parámetros de diseño, se procedió a confeccionar una base de datos (ver apéndice 4), la cual se generó a partir del análisis estructural realizado para cada una de las configuraciones geométricas y cargas correspondientes.

Con la base de datos de las acciones, se procedió con el diseño estructural, el cual consistió en el diseño de las losas. Fue necesario comprobar la flexión, pues es esta condición la que determina el espesor de la losa por utilizar.

Una vez realizado esto, se procedió a revisar el cortante, pues cuando el espesor de losa era suficiente para soportar el cortante, solo era necesario revisar dicha acción; en cambio, cuando el espesor de losa no era suficiente para tomar por sí solo el cortante, se debió reestructurar el diseño, de manera que en el momento en que la losa no resistiera el cortante, se colocaban ganchos de acero, para poder aumentar la resistencia cortante del elemento y así no tener que hacer la losa con mayor peralte.

Estos ganchos van anclados sobre el acero por temperatura que se encuentra en el sentido transversal al flujo de agua (esto porque se crea un maya de acero por temperatura, de manera que se tiene de este acero en ambos sentidos de la estructura), y se colocaron en los tramos comprendidos entre 0 y 25% y de 75 a 100% de la luz. Es decir, que los ganchos se colocan en los extremos de las luces, ello porque el diagrama de cortante amplía sus magnitudes en los extremos de la luz, por lo que no tiene sentido poner ganchos por cortante en el centro del claro, en donde el valor de éste se puede resistir mediante el espesor del concreto; por esta razón, solo se colocan ganchos de acero por cortante en los extremos.

Una vez realizado el diseño por cortante, se debió revisar la resistencia de la sección por compresión, la cual, en la mayoría de los casos, rondaba alrededor del 10% del valor teórico de resistencia, obtenido de los procedimientos señalados en la sección de "diseño estructural" de la Metodología. Lo que hace ver que las fuerzas axiales no son de interés en el diseño de las losas, pues quienes rigen el espesor de estas son la flexión y el cortante, y nunca la fuerza axial.

Para concluir el diseño de las losas, se calculó el acero por temperatura, el cual se da por metro lineal de losa; además, el espaciamiento de este acero es de suma importancia, pues es sobre éste donde se colocan los ganchos por cortante.

Terminado el diseño de las losas, se realizó el diseño de las paredes, donde se debía comprobar la forma de análisis de la pared; por ende, si el valor tomado de carga axial sobrepasaba el 5% de la resistencia teórica, la pared se debía analizar por flexo-compresión; de manera contraria, se debía realizar dicho análisis como si la pared se comportara similar a una losa.

En el caso de los análisis por flexo-compresión (generalmente usados para dos y tres celdas, con luces mayores a 2m, alturas mayores a 1,5 m y con todos los rellenos), se debió diseñar a flexión, utilizando los mismos parámetros empleados en las losas; seguidamente, se revisó el cortante, con la salvedad de que en las paredes no se usaron ganchos por un aspecto de facilidad constructiva; por tanto, en las paredes, el espesor dependía del requerimiento máximo de espesor entre flexión y cortante.

Luego, se calculó el acero por temperatura de las paredes, con los mismos criterios de las losas. Finalmente, se realizó el análisis por flexo-compresión, de manera que se generó un diagrama de interacción en el cual se creó una curva de resistencia del elemento, donde se involucra tanto la fuerza axial y el momento. Este se comparó con el par ordenado, creado por las acciones obtenidas del análisis estructural; en consecuencia, si este valor se encontraba dentro de la curva mencionada, se aceptaba el diseño. De no ser así, era necesario aumentar el espesor de la losa, con el fin de añadir más resistencia a la flexión y a la fuerza axial.

Para obtener la capacidad hidráulica, se debió iniciar un proceso iterativo, en el cual había que probar

valores de caudal real, para, con este, poder obtener un valor teórico del mismo.

Una vez obtenido este, se debía comparar ambos, hasta que la diferencia entre ellos fuera menor que el 0.5 %. De esta manera, se aceptaría dicho caudal, como el máximo que ha de pasar por la sección transversal de la alcantarilla.

Además del caudal, se calcularon otros parámetros hidráulicos. Debe mencionarse que el diseño hidráulico no es susceptible a las profundidades de relleno, pues éste depende solo de la cantidad de agua que trasiegue por la estructura. De esta manera, el caudal no depende de la profundidad de las alcantarillas. Lo que sí afecta el caudal son las combinaciones geométricas de las alcantarillas, pues mientras mayores sean las luces y alturas de la estructura, se tienen áreas transversales más amplias para el trasiego del líquido.

Además, el caudal también está sujeto al material utilizado en la construcción de las alcantarillas, ya que de éste depende el porcentaje de pérdidas

por fricción. Como en este caso es solo concreto, se reduce el factor de rugosidad de "*Manning*" a un solo valor.

Es importante destacar que el caudal de las alcantarillas fue obtenido bajo una condición de flujo sub-crítico, por ende, para mantener esta condición, se debe de respetar la pendiente crítica asociada a este comportamiento. De manera que si se supera dicha pendiente, la alcantarilla, en efecto podrá trasegar el mismo caudal, pero con un comportamiento de flujo distinto (crea remolinos, bolsas de aire, turbulencia, en el fluido), lo cual puede llegar a crear inconvenientes en el comportamiento estructural de los elementos.

Por último, se compiló los diseños de todas las combinaciones geométricas de alcantarillas, cuyas tablas componen los planos finales de una, dos y tres celdas, ubicados en el apéndice 7 de este proyecto.

Conclusiones y Recomendaciones

1. De este trabajo se puede concluir que, a la hora de analizar estructuras que estén confinadas por algún tipo de suelo, se debe usar un modelo de apoyos de resortes, en donde su constante de elongación provenga del módulo de reacción del suelo, pues los esfuerzos que este modelo genera son mucho mayores a los obtenidos con el de apoyos tradicionales, dado que estos no contemplan las características del suelo circundante.
2. Referente al punto anterior, se concluye, después de un análisis de las acciones para un mismo elemento, con las mismas cargas asociadas, que la magnitud del coeficiente de balasto sí genera cambios en las acciones de un elemento; sin embargo, para que se den estos cambios, el coeficiente debe de crecer en grandes cantidades (varias órdenes de magnitud), porque, con pequeños incrementos, los cambios en las acciones son imperceptibles.
3. Al obtener los módulos de reacción de los tipos de suelo utilizados, se concluyó que, de los tres tipos de suelos escogidos, solo se utilizó uno de ellos, por la razón de que el módulo de reacción entre los tres cambia en 12 unidades, cuyo cambio, precisamente, es demasiado pequeño como para que haya uno en las acciones internas de los elementos de la alcantarilla. Por tanto, solo se realizó un diseño útil para arena, arcilla y grava, a la vez.
4. Con respecto a la carga viva, se llegó a la conclusión de que existen ciertos puntos estratégicos en los cuales se puede obtener los valores máximos de acciones para todas las combinaciones geométricas de las alcantarillas, tomando en cuenta los rellenos por utilizar.
5. En relación con las líneas de influencia y sus líneas de acción, se concluyó que los diez metros de profundidad de relleno estipulados desde el inicio del proyecto, se dividirían en cuatro rangos de profundidad, amparados en las acciones mostradas por la líneas de influencia, las cuales son: de 0 a 1m, 1 a 2,5 m, 2,5 a 5 m y 5 a 10 m.
6. Con ayuda en la línea de influencia de carga puntual, se pudo concluir que el camión de diseño por utilizar para todos los casos fue la Vagoneta roquera Mack RD 688 SX, que, aunque su peso bruto es menor que las carretas "loboy", por su configuración de ruedas traseras, genera los mayores esfuerzos en los elementos de las alcantarillas.
7. Se concluyó que la acción primordial por revisar, a la hora del diseño, fue el cortante, pues se tuvo que agregar ganchos para su resistencia; de manera, que se deduce que es la fuerza más crítica actuante en dichas estructuras.
8. Se concluyó que los diseños más exigentes fueron los relacionados con las profundidades de relleno

de 0 y 10 m., respectivamente, pues en la primera, se concentra toda la carga viva en un punto, y en el segundo se da la mayor carga por columna de suelo. Por tanto, el primer y último diseño de una combinación de alcantarilla, son los más estructurados.

9. Al tomar varios tipos de relleno por cada combinación geométrica de alcantarilla, se generaron alrededor de 300 diseños más que en los planos originales hechos por el MOPT en los años 50, de manera que los planos nuevos tienen tipos de alcantarillas más particulares, además de estar analizados y diseñados por modelos y filosofías diferentes.
10. Se concluye que el cambio de las acciones en los elementos es mínimo, en lo referente a estructuras monolíticas, con respecto al modelo de la losa superior simplemente apoyada, de manera que se cambia la forma de la construcción de éstas, por una que sea más simplificada para el departamento de construcción.
11. Dada la geometría rectangular de las alcantarillas analizadas, se recomienda realizar un estudio paralelo al hecho en este trabajo, para otras secciones transversales, que también son muy conocidas, tal y como las secciones circulares.
12. Con referencia a la cantidad de celdas, se recomienda analizar baterías de alcantarillas con mayor número de celdas, de manera que se pueda obtener alcantarillas más amplias y con mayor capacidad hidráulica.
13. Se recomienda realizar el mismo análisis hecho en este proyecto, para otras combinaciones de celda-luz-altura-relleno, que no sean las obtenidas aquí, con el fin

de ampliar la base de datos de acciones y con esto, la cantidad posible de alcantarillas disponibles.

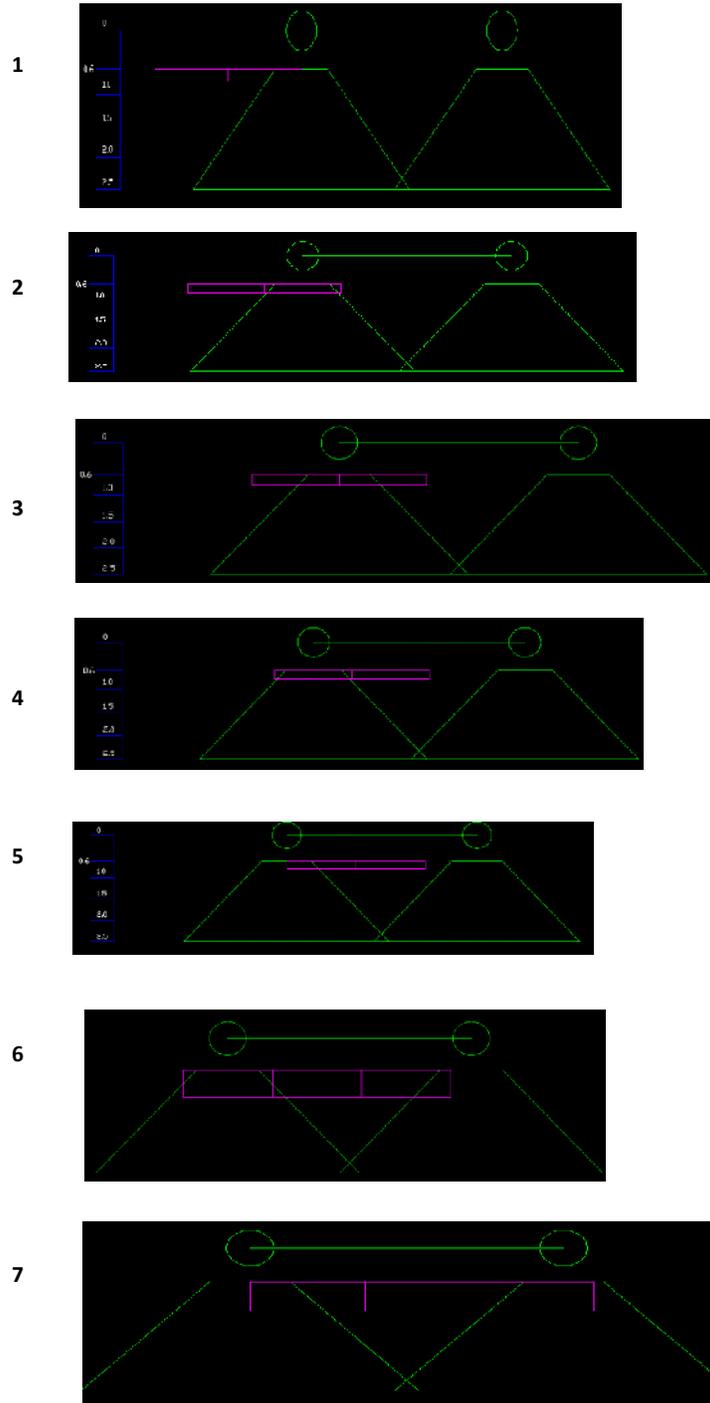
14. Dado que el material de construcción de las estructuras propuestas es concreto, se recomienda realizar los mismos diseños con otros materiales disponibles como acero o polietileno.
15. En la hoja programada de diseño, se recomienda realizar una programación, donde se pueda simular las matrices de rigidez de las alcantarillas, contemplando todas las especificaciones indicadas en este proyecto para el análisis estructural, de manera que, con solo introducir los valores iniciales de diseño, se obtengan las acciones máximas para cada uno de los elementos, sin depender de una base de datos, la cual solo puede realizar diseños para los valores que en ella se encuentren.
16. Ya que la forma de construcción de estas alcantarillas será con la losa superior simplemente apoyada, se recomienda realizar un estudio para determinar si la losa superior pudiera ser prefabricada, a fin de evitar el inconveniente de construirla en sitio, para así solo colocarla a la hora de utilizar una estructura de este calibre.

Apéndices

Los apéndices que se presentan corresponden a:

1. Posiciones de llanta utilizadas para obtener las líneas de influencia de las cargas distribuidas.
2. Estudio de longitud de franja contra profundidad de relleno.
3. Gráficos expuestos en los planos finales, para una, dos y tres celdas, respectivamente.
4. Base de datos de fuerza axial, momento y cortante, para losas superior, inferior y paredes, de todas las combinaciones posibles tomadas para el proyecto realizado.
5. Ejemplo de modelo en SAP, para el análisis estructural, tomando un modelo sin correr; luego, los diagramas de fuerza axial, momento y cortante.
6. Ejemplo de diseño de una alcantarilla, con toda su memoria de cálculo adjunta.
7. Planos finales de una, dos y tres celdas.

APENCIDE 1



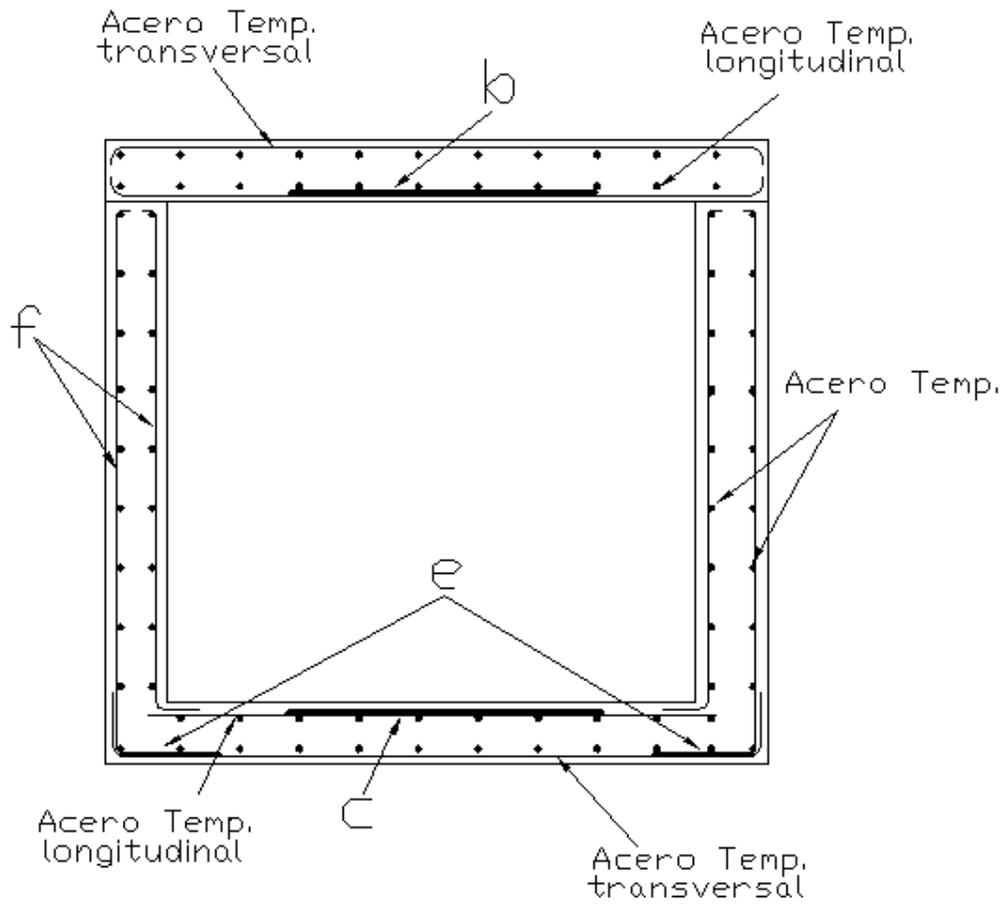
APENDICE 2

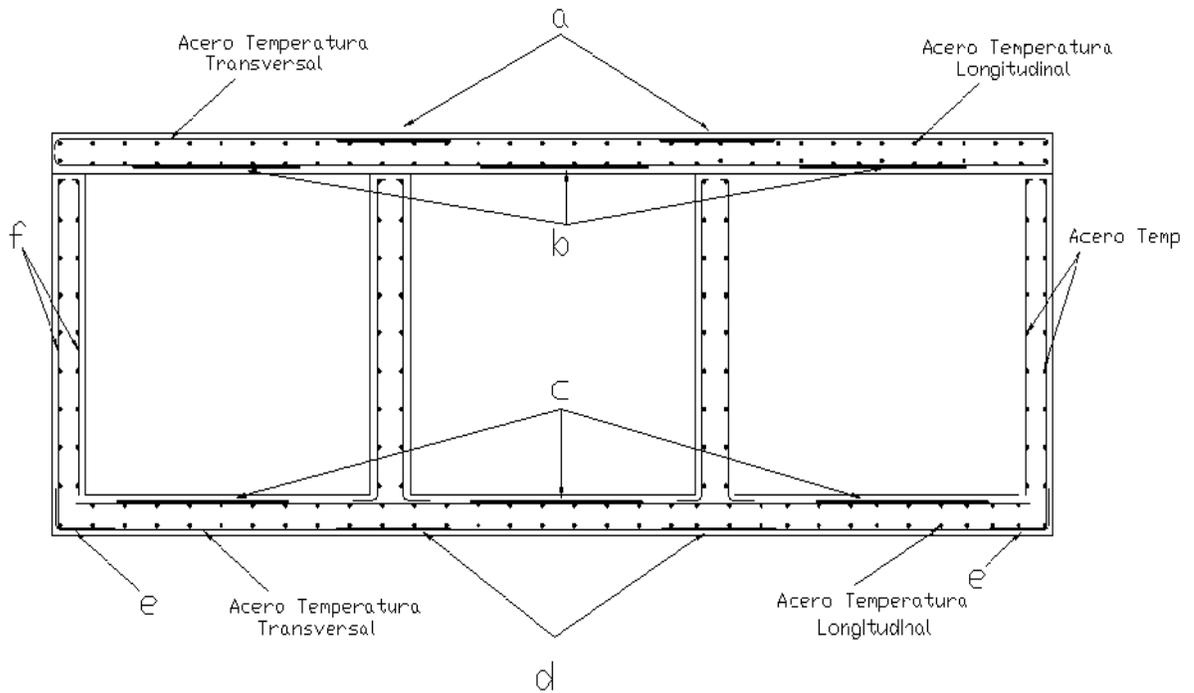
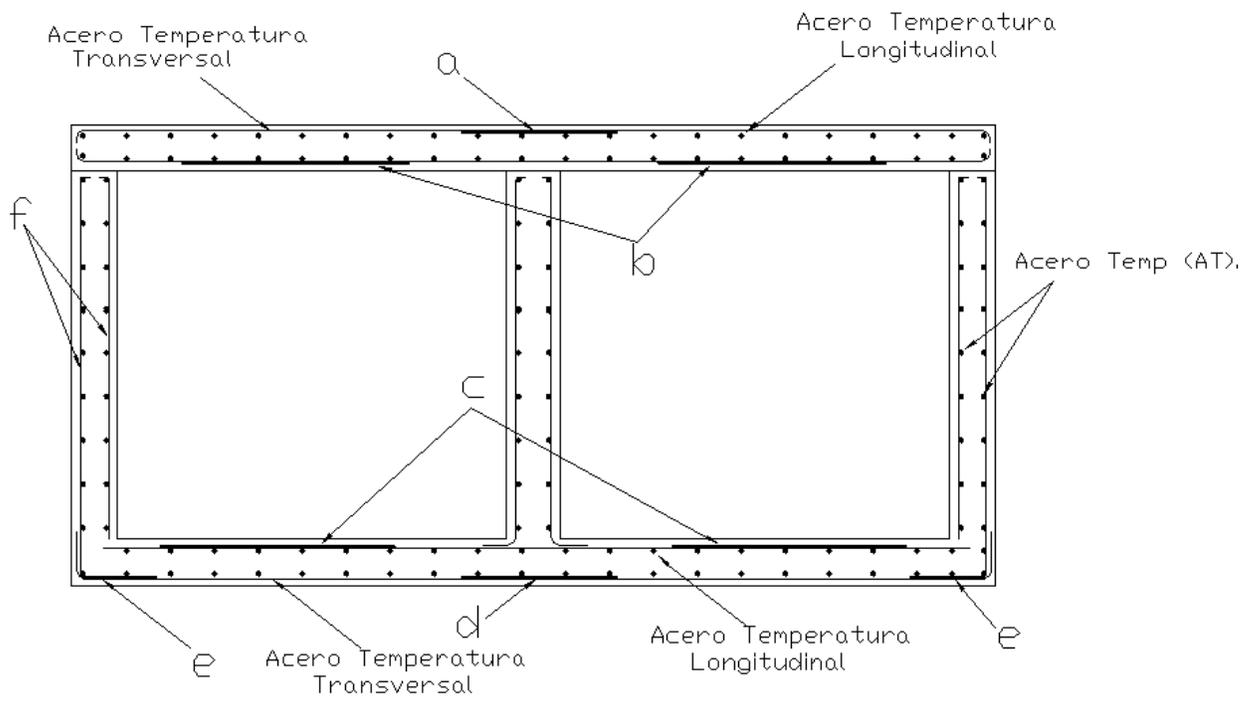
# Celdas	Luz	Relleno	Posición	Maxima Longitud
1	0.6 a 0.9	0.6	2	0.9
		1	2	0.9
		1.5	1,2,3	0.9
		2	1,2,3	0.9
		2.5	1,2,3	0.9
	1.2 a 1.5	0.6	2	1.06
		1	2	1.5
		1.5	2	1.5
		2	1,2,3	1.5
		2.5	1,2,3	1.5
	1.8 a 2.1	0.6	2	1.06
		1	2	1.77
		1.5	2	2.1
		2	2	2.1
		2.5	1,2,3	2.1
	2.45	0.6	2	1.06
		1	2	1.77
		1.5	2	2.45
		2	2	2.45
		2.5	2	2.45
	3.05	0.6	2	1.06
		1	2	1.77
		1.5	2	2.65
		2	2	3.05
		2.5	3	2.2/1.16
	3.65	0.6	2	1.06
		1	2	1.77
		1.5	2	2.65
2		2	3.44	
2.5		3	2.2/1.76	

2	1.5	0.6	2,3,4	1.06
		1	3	1.76
		1.5	3	2.65
		2	3	3
		2.5	5	2.2/1.1
	1.85	0.6	2,3,4	1.06
		1	2,3,4	1.76
		1.5	3	2.65
		2	3	3.53
		2.5	4	2.95/1.06
	2.45	0.6	4	1.06/0.11
		1	4	1.76/0.43
		1.5	4	2.55/0.9
		2	4	2.99/1.34
		2.5	4	3.43/1.78
	3.05	0.6	4	1.06/1.00
		1	4	1.76/1.36
		1.5	4	2.65/1.80
		2	4	3.29/2.24
		2.5	4	3.73/3.30
	3.65	0.6	4	1.06/1.06
		1	4	1.77/1.77
		1.5	4	2.65/2.65
		2	4	3.53/3.13
		2.5	4	4.03/3.58

3	1.25	0.6	1 a 6	1.06
		1	3,4,5	1.77
		1.5	4	2.64
		2	5	3.01/0.16
		2.5	5	3.45/0.6
	1.5	0.6	6	1.06/0.18
		1	6	1.63/0.53
		1.5	5	2.65/0.22
		2	5	3.27/0.66
		2.5	4	4.41/0.36
	1.85	0.6	6	1.06/1.05
		1	6	1.77/1.41
		1.5	5	2.64/0.92
		2	5	3.27/1.36
		2.5	5	4.06/1.81
	2.45	0.6	5,6	1.06/1.06
		1	6	1.77/1.77
		1.5	6	2.54/2.64
		2	5	3.53/2.56
		2.5	5	4.41/3.00
	3.05	0.6	5,6	1.06/1.06
		1	5,6	1.77/1.77
		1.5	5,6	2.67/2.67
		2	5	3.53/3.53
		2.5	5	4.41/4.2
	3.65	0.6	4,5,6	1.06/1.06
		1	4,5,6	1.77/1.77
		1.5	4,5,6	2.64/2.64
2		5,6	3.53/3.53	
2.5		5	4.41/4.41	

APENDICE 3





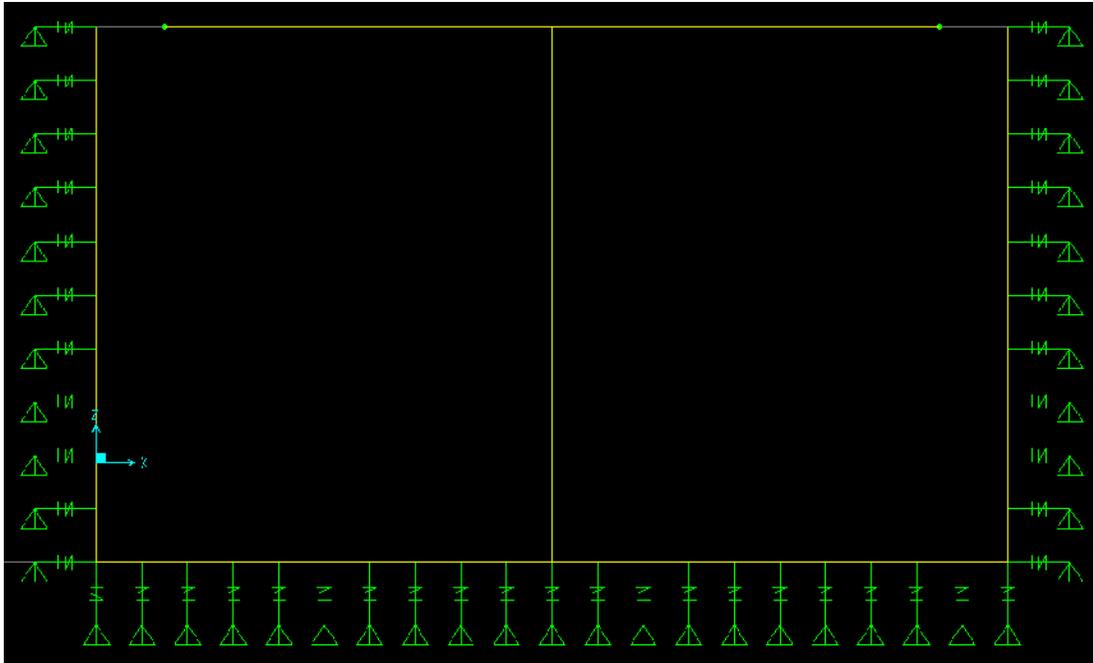
APENDICE 4

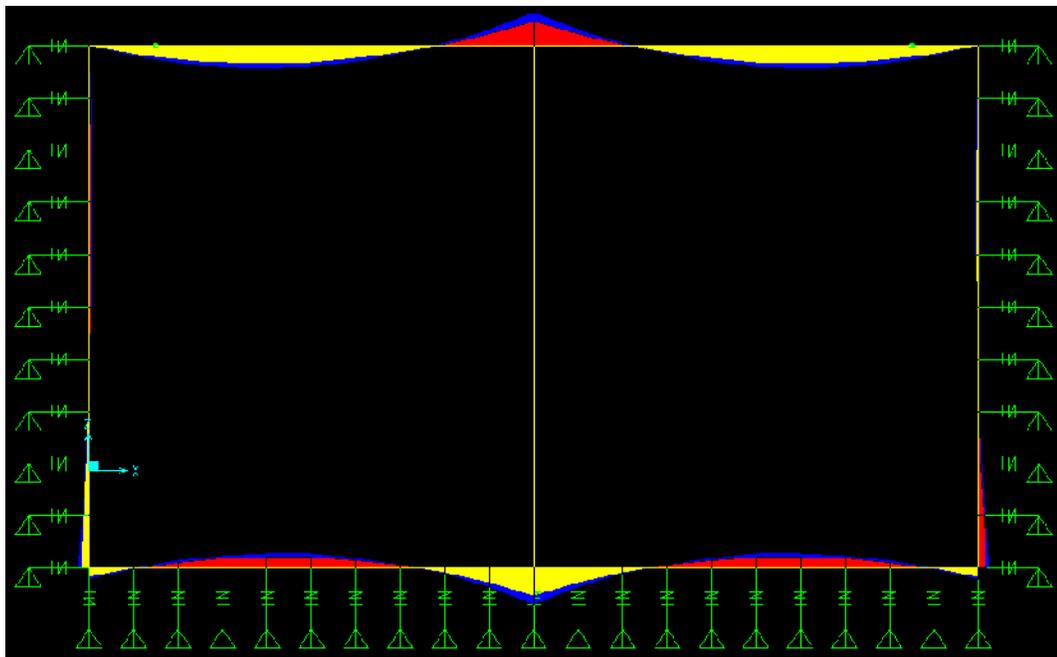
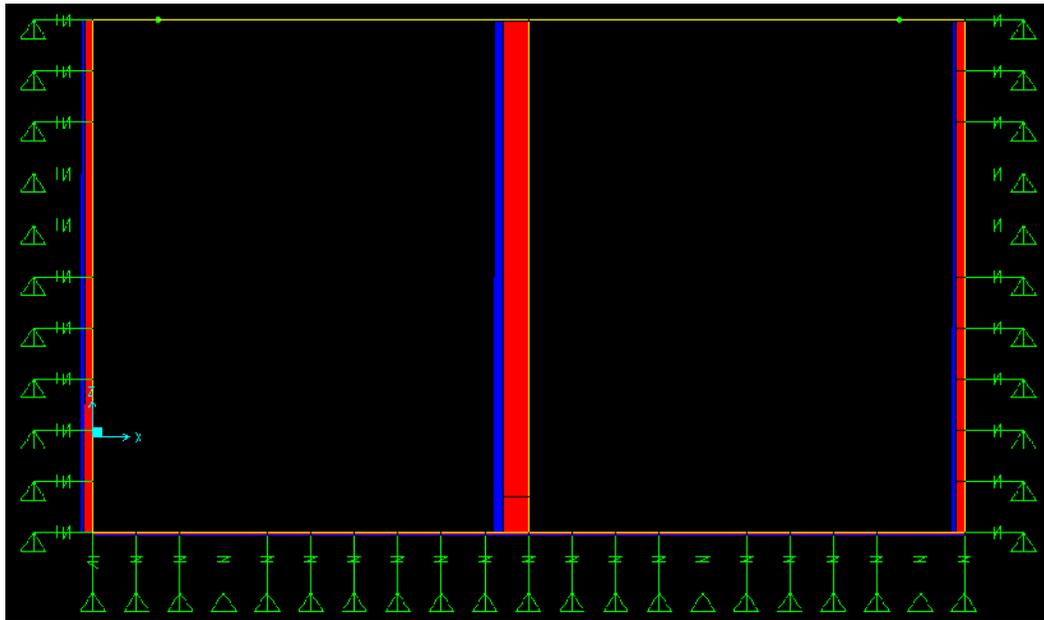
# Celdas	Luz (m)	Altura (m)	Relleno (m)	Losa Superior				Losa Inferior				Paredes			
				Pu (kg)	Mu ↑ (kg-m)	Mu ↓ (kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑ (kg-m)	Mu ↓ (kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑ (kg-m)	Mu ↓ (kg-m)	Vu (kg)
1	0.6	0.45	0	2900	0	5507	3400	2941	2159	1792	2500	41710	1792	830	7200
1	0.6	0.45	1	713	0	1003	3600	933	596	367	3100	7096	367	367	933
1	0.6	0.45	5	256	0	815	2930	1174	478	314	2669	5848	314	314	1174
1	0.6	0.45	10	260	0	1393	5100	2095	790	527	4419	9692	527	527	2095
1	0.6	0.6	0	1507	0	10980	108	1580	1650	631	12000	33265	1834	100	7771
1	0.6	0.6	1	518	0	1003	3812	830	686	397	3642	7251	397	397	830
1	0.6	0.6	5	100	0	815	3400	1239	540	356	3014	5976	356	356	1200
1	0.6	0.6	10	251	0	1393	6200	2237	877	596	4840	9830	596	596	2238
1	0.9	0.6	0	2695	0	6379	162	2769	2254	526	11418	32436	2336	928	4369
1	0.9	0.6	1	1549	0	2202	6600	1861	1390	149	5388	10329	1016	1016	1861
1	0.9	0.6	5	838	0	1834	5403	2107	1149	876	4542	8639	876	876	2107
1	0.9	0.6	10	1222	0	3134	9700	2770	1904	1466	4452	14400	1466	1466	3100
1	0.9	0.9	0	1556	0	6379	162	1723	2379	2780	12000	32706	2780	130	3739
1	0.9	0.9	1	793	0	2202	6000	1316	1458	100	5337	10600	925	925	1316
1	0.9	0.9	5	111	0	1834	5454	1948	1168	121	4520	8964	1948	1948	1948
1	0.9	0.9	10	180	0	3134	9450	2600	1898	223	7404	14741	1417	1417	3478
1	1.25	0.6	0	4163	0	8672	225	4238	2908	500	9120	31762	2975	2052	5238
1	1.25	0.6	1	3391	0	3694	9142	3705	2446	2121	7362	13839	2121	2121	3705
1	1.25	0.6	5	2437	0	3145	7855	3708	2081	1836	6322	11865	1836	1836	3708
1	1.25	0.6	10	3914	0	5374	13181	6382	3479	3082	10549	19889	3082	3082	4808
1	1.25	0.9	0	2504	0	8673	675	2675	3062	927	12620	32032	3404	1209	7556
1	1.25	0.9	1	1943	0	3694	9000	2471	2574	1962	7312	14109	1962	1962	2471
1	1.25	0.9	5	980	0	3145	7855	2942	2162	335	6298	12135	1264	1264	2942
1	1.25	0.9	10	1379	0	5275	10200	5138	3571	2908	10420	20160	2908	2908	5138
1	1.25	1.25	0	1546	0	8673	675	1879	3248	3861	16400	32347	3861	290	7513
1	1.25	1.25	1	1072	0	3694	9060	1900	2109	1793	7257	14424	1793	1793	1900
1	1.25	1.25	5	156	0	3145	7715	2399	2210	1675	6272	12450	1675	1675	2300
1	1.25	1.25	10	419	0	5375	13100	4945	3594	2797	10278	20474	2797	2797	4945
1	1.5	0.6	0	4912	0	10290	810	4991	3144	3610	9185	31411	3610	2317	9351
1	1.5	0.6	1	4794	0	5253	10640	5113	3138	2965	8100	16300	2965	2965	5113
1	1.5	0.6	5	3683	0	4530	9258	4657	2706	2585	6982	14130	2585	2585	4657
1	1.5	0.6	10	6028	0	7739	15962	8502	4544	4352	11700	23759	4352	4352	8500
1	1.5	0.9	0	3215	0	10290	810	3388	3530	3852	10649	31681	3852	2042	7392
1	1.5	0.9	1	3045	0	5253	10700	3577	3516	2956	8555	16571	2956	2956	3577
1	1.5	0.9	5	1400	0	4530	9342	3916	3010	2616	7428	14400	2616	2616	3916
1	1.5	0.9	10	3009	0	7739	15674	6773	5004	3312	12431	24029	4378	4378	6774
1	1.5	1.25	0	2035	0	10290	810	2375	3745	4334	14000	32000	4334	1047	7542
1	1.5	1.25	1	1806	0	5253	10737	2644	3715	2716	8600	16886	2716	2716	2644
1	1.5	1.25	5	625	0	4530	9342	3448	3124	2481	7535	14715	2481	2481	3449
1	1.5	1.25	10	703	0	7739	15962	6026	5131	4140	12418	24334	4140	4140	6027
1	1.5	1.5	0	1519	0	10290	810	560	3876	4626	16000	32221	4626	444	7407
1	1.5	1.5	1	1249	0	5253	10932	2338	3825	2577	8597	17111	2577	2577	2339
1	1.5	1.5	5	203	0	4530	9342	3431	3155	2436	7516	14940	2436	2436	3432
1	1.5	1.5	10	514	0	7739	16400	6017	5133	4062	12317	24569	4062	4062	6017
1	1.85	0.6	0	6783	0	12540	1000	6859	4099	4325	7476	31043	4325	4325	8447
1	1.85	0.6	1	8130	0	8861	13000	8447	4805	4996	14500	29700	4996	4996	8447
1	1.85	0.6	5	6667	0	7752	11420	7941	4210	4375	12991	17301	4375	4375	7941
1	1.85	0.6	10	11066	0	13244	19686	13539	7085	2157	20800	29177	7375	7375	13540
1	1.85	0.9	0	4239	0	12540	1000	4416	4157	4552	17861	31313	4552	4552	7405
1	1.85	0.9	1	5004	0	8908	13361	5543	5053	4722	14680	20072	4722	4722	5543
1	1.85	0.9	5	4393	0	9022	9700	6367	5077	4818	15000	20318	4818	4818	6368
1	1.85	0.9	10	6634	0	10946	21200	7835	8020	7647	23700	32194	7647	7647	10400
1	1.85	1.25	0	2750	0	12540	1000	3099	4420	4972	19220	31628	4972	4972	7405
1	1.85	1.25	1	3110	0	8861	13171	3965	5317	4356	14655	20285	4356	4356	3996
1	1.85	1.25	5	1785	0	7752	11420	4624	4590	3941	12900	17886	3941	3941	4625
1	1.85	1.25	10	2646	0	13244	20000	8000	7603	6585	21000	30000	6585	6585	8000
1	1.85	1.5	0	2095	0	10167	1000	2605	4586	1630	20387	31853	5296	1526	7431
1	1.85	1.5	1	2279	0	8861	13000	3398	5500	4143	14500	20510	4143	4143	3398
1	1.85	1.5	5	882	0	7752	11400	4361	4619	3821	12700	18111	4362	4362	4619
1	1.85	1.5	10	1072	0	13244	19864	7579	7716	6373	21300	29987	6373	6373	7580
1	1.85	1.85	0	1456	0	10167	1000	2241	4775	5682	21700	32168	5682	5682	7236
1	1.85	1.85	1	1459	0	8861	13369	2996	5683	3904	14500	20825	3904	3904	3000
1	1.85	1.85	5	291	0	7752	11730	4356	4749	3737	12838	18426	3737	3737	4357
1	1.85	1.85	10	678	0	13248	20000	7565	7735	6225	21100	30310	7566	7566	7566
1	1.85	2.15	0	1053	0	13540	1000	2119	4991	5927	22575	32438	5927	703	6896
1	1.85	2.15	1	938	0	8861	13290	2877	5789	3759	14450	21000	3759	3759	2877
1	1.85	2.15	5	898	0	7752	11400	4542	4719	3746	12710	18700	3746	3746	4542
1	1.85	2.15	10	1792	0	13244	20200	7859	7613	6235	20900	30572	6235	6235	7861
1	2.15	0.9	0	4820	0	14464	1161	5000	4400	5364	16900	31084	5364	3432	9283
1	2.15	0.9	1	6656	0	11375	15428	7110	6112	6126	15900	22855	6126	6126	7111
1	2.15	0.9	5	5116	0	10051	13600	7100	5391	5474	14000	20289	5474	5474	7101
1	2.15	0.9	10	8361	0	17137	22400	9165	9046	9210	23700	34091	9210	9210	12200
1	2.15	1.25	0	3383	0	14500	1161	3741	4973	5553	18500	31400	5553	3221	7336
1	2.15	1.25	1	4482	0	11375	15200	5356	6860	6083	16800	23179	6083	6083	5357
1	2.15	1.25	5	3025	0	10051	13332	5879	6000	5500	15000	20604	5880	5880	5880
1	2.15	1.25	10	4727	0	17193	23291	10105	10000	9204	25000	34406	9204	9204	10100
1	2.15	1.5	0	2609	0	14464	1161	3134	5167	5857	19400	31624	4324	2530	7349
1	2.15	1.5	1	3371	0	11375	15291	4520	5167	5804	15900	23395	5804	5804	4521
1	2.15	1.5	5	1861	0	10051	13371	5378	6173	5315	14600	20829	5315	5315	5379
1	2.15	1.5	10	2717	0	17173	22519	9270	10216	8874	24464	34631	8874	8874	9272
1	2.15	1.85	0	1854	0	14464	1161	2665	5397	6272	20600	31939	6272	1654	7274
1	2.15	1.85	1	2282	0	11375	15500	3873	7363	5475	16700	23710	5475	5475	3874
1	2.15	1.85	5	652	0	10051	13300	5140	6344	5139	14600	21144	5139	5139	5141
1	2.15	1.85	10	628	0	17173	22879	8869	10365	8561	24400	34846	8561	8561	8871
1	2.15	2.15	0	1379	0	10091	1161	2483	5552	6566	21200	32209	6566	1053	7053
1	2.15	2.15	1	1596	0	11375	15291	3616	7531	6257	16600</				

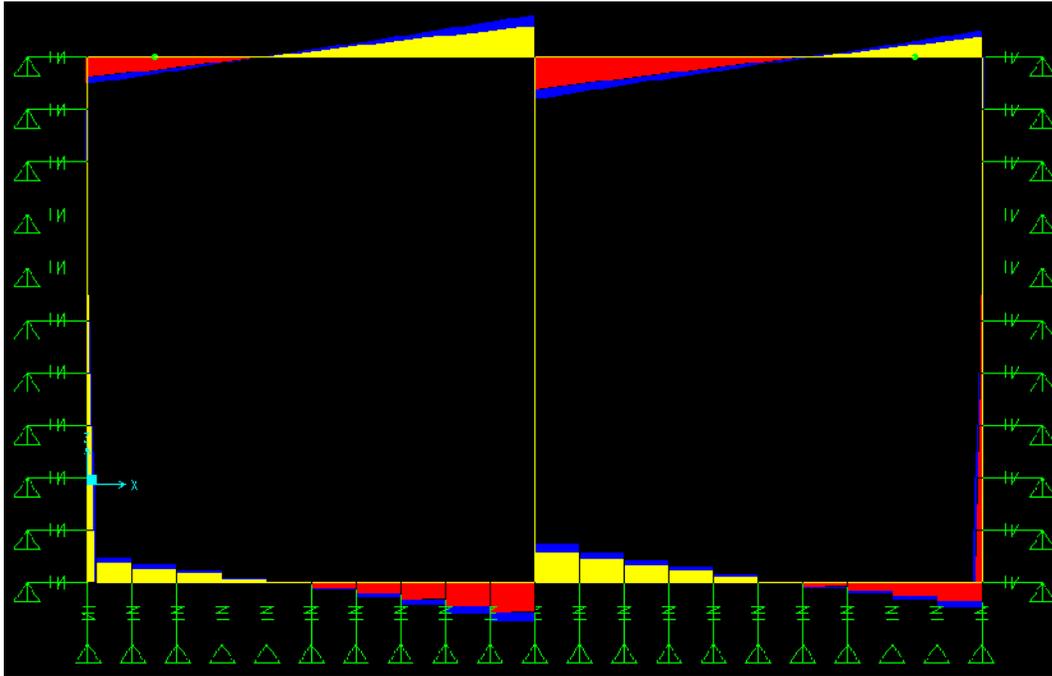
1	2.45	1.85	1	3354	0	14753	17250	4925	9428	7442	19300	27000	7442	7442	4926
1	2.45	1.85	5	1623	0	13160	15386	6105	8253	6922	17300	24324	6932	6932	6106
1	2.45	1.85	10	2204	0	22408	25900	10440	10253	8686	28000	40051	8686	8686	7838
1	2.45	2.15	0	1715	0	16390	1323	2860	6178	7159	20600	32040	7159	1991	7083
1	2.45	2.15	1	2378	0	14645	17122	4493	9419	7034	18600	26842	7034	7034	7034
1	2.45	2.15	5	549	0	13000	15337	5986	8128	6675	16900	24132	6675	6675	6000
1	2.45	2.15	10	549	0	22300	26071	10262	13339	11107	27700	39860	11107	11107	10265
1	2.45	2.45	0	1275	0	16390	1323	1269	6212	7418	21200	32310	7418	1473	6828
1	2.45	2.45	1	2378	0	14645	17122	4493	9419	7034	18600	26842	7034	7034	7034
1	2.45	2.45	5	523	0	13000	15300	6090	8154	6614	16900	24402	6614	6614	6000
1	2.45	2.45	10	1080	0	22300	25600	10397	13300	10986	27700	30413	10986	10986	10400
1	3.05	1.5	0	3509	0	19321	100	4059	5681	6657	25600	28521	6657	4467	6712
1	3.05	1.5	1	7051	0	21822	19900	8305	11588	11400	21100	29215	11400	11400	8307
1	3.05	1.5	5	5181	0	19615	18000	8791	10307	10364	19000	26262	10364	10364	8794
1	3.05	1.5	10	8790	0	34240	31800	15514	17973	18109	33156	45841	18109	18109	15518
1	3.05	1.85	0	3110	0	20261	1647	4000	7098	8047	28313	31559	8047	4678	7200
1	3.05	1.85	1	5626	0	22847	21200	7439	13204	11858	22400	32253	11858	11858	7441
1	3.05	1.85	5	3711	0	20641	19300	8401	11803	10978	20800	29300	10978	10978	8403
1	3.05	1.85	10	5759	0	35265	32400	14319	19626	18354	34200	48877	18354	18354	14434
1	3.05	2.15	0	2412	0	20261	1647	3643	7335	8332	11848	31829	8332	3991	7037
1	3.05	2.15	1	4297	0	22847	23700	6648	13558	30126	23070	32523	11402	11402	6650
1	3.05	2.15	5	2306	0	20641	21400	7958	12000	10672	21000	29596	10672	10672	7961
1	3.05	2.15	10	3352	0	35265	36257	13564	19935	17800	34812	49148	17800	17800	13568
1	3.05	2.45	0	1853	0	20261	1116	6197	7500	8600	12626	32099	8593	3411	6832
1	3.05	2.45	1	3248	0	22847	23679	6457	13840	11022	15947	32793	11022	11022	6200
1	3.05	2.45	5	1165	0	20641	20800	7816	12100	10500	14500	29839	10547	10547	7819
1	3.05	2.45	10	1404	0	35265	37000	13279	20100	17403	26100	49418	17403	17403	13284
1	3.05	2.75	0	1387	0	20261	569	3435	7582	8815	20444	32369	8815	2960	6620
1	3.05	2.75	1	2386	0	4487	23600	5983	14000	10700	22870	33063	10700	10700	6000
1	3.05	2.75	5	210	0	20641	21393	7875	12176	10333	20800	30100	10333	10333	7878
1	3.05	2.75	10	364	0	35265	36500	13318	20000	17160	34300	49688	17160	17160	13323
1	3.05	3.05	0	1157	0	20261	549	3300	7936	9470	21685	32639	9479	2175	6872
1	3.05	3.05	1	1971	0	22800	23111	5575	14254	10500	23151	33333	10500	10500	5576
1	3.05	3.05	5	742	0	20641	21393	7850	12500	10335	21100	30300	10335	10335	7851
1	3.05	3.05	10	1431	0	35265	35400	13221	20500	17200	34500	49458	17200	17200	13223
1	3.65	1.85	0	3968	0	24200	1971	4920	8040	9358	18000	31465	9358	6644	7765
1	3.65	1.85	1	8525	0	6449	27000	10532	17300	17396	26800	37890	17396	17396	10500
1	3.65	1.85	5	6411	0	29662	25200	11279	15904	16132	24700	34735	16132	16132	11283
1	3.65	1.85	10	10300	0	51400	42000	19188	26248	27037	41300	58166	27000	27000	19195
1	3.65	2.15	0	3122	0	24171	657	4440	8267	9575	18500	31750	9575	5979	7085
1	3.65	2.15	1	6653	0	32500	27270	9292	18024	16742	26847	38160	16742	16742	9296
1	3.65	2.15	5	4495	0	30130	25400	10415	16300	15600	24600	35000	15600	15600	10500
1	3.65	2.15	10	5389	0	51477	42690	17692	27000	19798	41000	58436	19798	19798	17700
1	3.65	2.45	0	2444	0	24171	647	4186	8500	9793	18900	32000	9793	5393	6863
1	3.65	2.45	1	5176	0	32646	27959	8531	18194	16216	26668	38430	16216	16216	8535
1	3.65	2.45	5	2953	0	30000	25191	9978	16437	15270	24570	35275	15270	15270	9982
1	3.65	2.45	10	4402	0	38826	43000	16906	27206	25477	40600	58706	25477	25477	16914
1	3.65	2.75	0	1877	0	24171	657	4093	8695	9988	19170	32275	9988	3645	6669
1	3.65	2.75	1	3964	0	33000	27800	8103	18660	15762	26500	38700	15762	15762	8100
1	3.65	2.75	5	1669	0	29662	26420	9833	16600	14992	24475	35545	14992	14992	9838
1	3.65	2.75	10	2222	0	50838	38841	16596	27400	25000	40500	58976	25000	25000	16600
1	3.65	3.05	0	1390	0	24171	1971	4119	8889	10154	19572	32545	10154	4567	6465
1	3.65	3.05	1	2941	0	32697	27819	7916	18911	15403	26400	38970	15403	15403	7920
1	3.65	3.05	5	577	0	29896	27240	9891	16576	14817	24400	35815	14817	14817	9896
1	3.65	3.05	10	380	0	50998	46800	16604	27560	24612	40252	59246	24612	24612	16613
1	3.65	3.65	0	595	0	24171	1971	4411	9055	10435	19980	33085	10435	4213	6291
1	3.65	3.65	1	1309	0	32799	23989	8008	19000	14960	26243	39510	14960	14960	8014
1	3.65	3.65	5	1430	0	30036	27440	10357	16631	14750	24236	36355	14750	14750	10364
1	3.65	3.65	10	2641	0	51158	46190	17180	27118	24382	39869	59786	24382	24382	17192
2	1.5	1.85	0	3846	3900	6900	6900	4550	2400	4580	12500	24600	2800	2386	6726
2	1.5	1.85	1	1300	3900	6900	6900	1680	3875	2950	1226	24947	1217	2000	1692
2	1.5	1.85	5	1918	4200	2100	10000	2561	2512	3016	8900	32400	1800	1800	1700
2	1.5	1.85	10	3837	3376	6974	16700	4355	4119	7011	14600	53765	2500	2500	4300
2	1.5	2.15	0	3076	6057	8271	5101	4186	3262	3413	15829	28379	3413	667	3279
2	1.5	2.15	1	1137	3811	3950	15132	1408	2568	4666	12229	31444	2445	1806	1789
2	1.5	2.15	5	1654	3782	3233	13884	3534	2155	5230	12672	34159	1709	1709	3040
2	1.5	2.15	10	3274	6196	5639	18128	6135	3500	8942	21000	56635	2752	2752	4800
2	1.5	2.45	0	3008	6389	8160	5100	4454	3300	3696	20136	28197	3696	1073	4367
2	1.5	2.45	1	1453	3938	3861	15998	2672	2432	5031	12250	31527	2645	2186	1715
2	1.5	2.45	5	2226	3319	2519	14670	3963	2024	5325	12663	34149	1899	1899	3311
2	1.5	2.45	10	3932	5800	5791	20835	5070	3155	9102	21000	56377	3000	3000	5800
2	1.85	2.15	0	2890	6909	10237	4463	4069	4200	3842	20298	28800	3842	742	4940
2	1.85	2.15	1	783	5802	5855	19362	1532	3865	4984	13278	34104	3231	1510	2200
2	1.85	2.15	5	1406	6302	4268	17000	3839	3352	5700	15640	42272	2330	2330	3345
2	1.85	2.15	10	2853	10462	7900	30130	6603	5548	13514	26100	70502	3700	3700	5631
2	1.85	2.45	0	2687	7178	10147	4775	4192	4195	4057	20444	28766	4057	1000	4550
2	1.85	2.45	1	1061	5957	5366	18122	1767	3841	4697	13333	34314	3396	1769	2300
2	1.85	2.45	5	1806	6224	4553	16443	4261	3335	7929	15708	30790	2549	2549	3443
2	1.85	2.45	10	3567	10272	7307	28000	7288	5332	13546	26192	70585	4000	4000	6266
2	1.85	2.75	0	2491	7436	10000	5000	4359	4206	4292	20617	28747	4292	1000	4283
2	1.85	2.75	1	1300	6096	5383	18300	3066	3799	4439	13382	34512	3589	2025	1181
2	1.85	2.75	5	2181	6108	4352	16381	4723	3241	7959	15735	42602	2821	2821	4196
2	1.85	2.75	10	4226	10023	7944	28652	8021	5203	13600	26108	70586	4517	4517	7062
2	2.45	2.75	0	2384	9049	13374	4383	4543	5522	5146	20138	29298	5146	1294	5049
2	2.45	2.75	1												

2	3.05	3.95	5	3000	18000	12700	28238	7525	8662	21358	25631	70600	6838	6838	6361
2	3.05	3.95	10	5490	30061	21902	48745	12170	13986	36260	25631	117669	10700	10700	10543
2	3.05	4.3	0	906	11513	16423	4535	4492	6498	7278	19807	30601	7278	2479	5666
2	3.05	4.3	1	1200	12871	13910	23400	3943	6498	9907	15850	42662	7458	2571	4093
2	3.05	4.3	5	3240	17700	12800	29400	7918	8600	21500	25620	70743	7119	7118	6767
2	3.05	4.3	10	5983	29600	22200	48500	12668	10500	27500	32345	117700	11200	11200	10780
2	3.05	4.6	0	689	11545	16500	4577	6475	6333	7543	19786	30900	7543	2800	5500
2	3.05	4.6	1	2000	12900	13800	23400	4300	6500	9900	15900	43000	7700	2600	4400
2	3.05	4.6	5	5700	17000	13000	30500	9400	8000	22000	25500	70600	8100	8100	8400
2	3.05	4.6	10	6300	29200	22400	47300	13000	13333	27800	32337	117700	8700	8700	11500
2	3.65	3.5	0	1168	12961	19850	3584	5172	7688	7533	19353	30620	7533	2500	6074
2	3.65	3.5	1	1200	6600	17600	24617	3500	8500	13500	16352	45472	8454	1500	4300
2	3.65	3.5	5	2000	27300	17900	35135	8085	12500	29000	30000	84254	9360	9360	7036
2	3.65	3.5	10	3800	46000	31000	58500	10000	20735	37300	50300	141401	15000	15000	11678
2	3.65	4.3	0	600	13250	19400	2100	5404	7600	8200	19285	11422	8200	3100	6418
2	3.65	4.3	1	1800	16900	17600	24300	4271	8200	13000	16600	46103	8883	2000	4800
2	3.65	4.3	5	3100	26900	18200	34400	9000	12300	29400	30000	84727	9800	9800	7900
2	3.65	4.3	10	5600	45300	31107	59633	14400	20000	49795	50300	141700	15600	15600	12500
2	3.65	4.6	0	574	13290	19740	3356	6565	7608	8400	19120	31407	8400	3254	6200
2	3.65	4.6	1	1903	16843	18000	24700	4600	8117	12833	16577	46335	9081	2100	5000
2	3.65	4.6	5	3276	26700	13000	35200	9278	8900	29522	30125	84849	10021	10021	8045
2	3.65	4.6	10	5991	44900	31000	58491	14726	19860	49968	50250	141745	15800	15800	13000
2	3.65	4.9	0	605	13300	19738	3307	5836	7549	8639	19281	31700	8639	3488	6500
2	3.65	4.9	1	1998	16749	17567	24500	4827	8000	12755	16661	46566	9288	2200	5200
2	3.65	4.9	5	3450	26478	18384	35300	9552	12015	29644	30200	85089	10250	10250	8490
2	3.65	4.9	10	6296	44565	31543	57700	15000	19567	50131	50246	107380	16000	16000	13584
3	1.25	0.6	0	17776	1990	2753	4810	17853	2300	3400	14000	27190	1900	1900	12000
3	1.25	0.6	1	9569	2397	2728	9020	9259	1922	5140	10100	25407	2300	2600	7280
3	1.25	0.6	5	1336	2282	2336	4500	1608	1634	3541	3400	25000	881	862	1600
3	1.25	0.6	10	2641	3860	4005	12500	2698	2754	6058	10200	42327	1520	1520	2875
3	1.25	0.6	0	12985	2016	3142	4177	13106	2019	5841	17721	27161	1648	1769	10000
3	1.25	0.6	1	5428	2864	2709	10280	4964	1864	4711	9869	26139	1806	2078	4313
3	1.25	0.6	5	226	2713	2216	9255	2298	1690	3000	9930	18538	1196	1196	1847
3	1.25	0.6	10	226	2713	2216	9255	2298	1690	3000	9930	18538	1196	1196	1847
3	1.25	1.25	0	9165	2713	2216	4636	9101	2041	3246	17668	27145	1600	1600	6859
3	1.25	1.25	1	3876	2859	27236	11950	3061	1864	4610	12015	26381	1725	1979	2964
3	1.25	1.25	5	394	2707	2220	11500	2784	1728	2949	9957	25937	1286	1296	2089
3	1.25	1.25	10	1244	4465	3657	19900	4330	2857	5092	16792	43351	2037	2037	4331
3	1.5	0.9	0	15428	2417	3467	4500	15613	2464	7000	17467	27166	2051	2123	12000
3	1.5	0.9	1	7500	4189	3779	12163	6985	2371	6362	12900	28154	2422	3064	6067
3	1.5	0.9	5	452	3927	3186	11792	2412	2354	4472	11961	30609	1600	1600	2500
3	1.5	0.9	10	1022	6598	5479	21200	3973	4000	7677	20255	51648	2586	2586	3915
3	1.5	1.25	0	10835	2479	3617	4449	11208	6956	2349	21182	27229	2077	2144	8010
3	1.5	1.25	1	5453	4097	3845	14055	4657	2217	6305	129917	28306	2413	2914	4282
3	1.5	1.25	5	432	3810	3103	12400	2428	2436	4493	12000	30846	1562	1562	2300
3	1.5	1.25	10	634	6352	5300	20600	4017	4055	7723	20360	51800	2475	2475	3814
3	1.5	1.5	0	8756	2513	3704	4189	9306	2211	6913	20900	27269	2112	2177	5357
3	1.5	1.5	1	4581	4066	3783	14700	3560	2306	6263	12800	28400	2326	2736	3500
3	1.5	1.5	5	920	3719	3000	13000	2591	2500	4530	12152	31010	1553	1553	2332
3	1.5	1.5	10	2218	6162	5412	22800	4291	4000	7800	20500	51897	2450	2450	4320
3	1.85	1.25	0	13200	2993	4000	4700	13579	3000	8449	21300	27300	2435	2481	9071
3	1.85	1.25	1	7070	6549	5311	18000	1500	3045	8441	13900	31000	3108	410	5800
3	1.85	1.25	5	240	6030	4332	16235	3403	3600	6900	10657	37907	2500	2500	2900
3	1.85	1.25	10	500	10119	7439	28700	5046	6060	11686	25000	63870	3887	3887	4746
3	1.85	1.5	0	10720	3016	4008	4222	11280	2800	8416	21000	27341	2431	2462	8010
3	1.85	1.5	1	5900	6538	5305	18500	11280	3000	8500	13800	31000	3071	4000	4716
3	1.85	1.5	5	406	5937	4345	15874	3393	3627	6832	14839	38000	2356	2550	2799
3	1.85	1.5	10	1416	9926	7985	28900	5120	6084	11730	25000	64000	3800	3800	4800
3	1.85	1.85	0	8280	3063	4104	4000	9187	2662	8364	20800	27457	2455	2455	5572
3	1.85	1.85	1	4817	6494	5553	17200	3456	2898	8358	13753	31000	2998	3823	3687
3	1.85	1.85	5	1119	5792	4771	16552	3335	3648	6892	15000	38319	2374	2374	3100
3	1.85	1.85	10	2657	9623	7500	28000	5396	6096	11838	25122	64164	3736	3736	5000
3	2.45	1.5	0	13038	3877	4227	4500	13653	3542	10622	21000	27634	2735	2841	10193
3	2.45	1.5	1	7456	10210	9530	21200	6435	11725	4168	14750	34251	3867	5715	6388
3	2.45	1.5	5	1131	11000	8612	22343	4623	6113	11730	19200	50217	4432	4432	4272
3	2.45	1.5	10	1590	18469	14700	38542	7582	10242	20078	32471	84739	7156	7156	7300
3	2.45	1.85	0	10119	3890	4301	4383	11096	3432	10500	5446	27813	2691	2750	7719
3	2.45	1.85	1	6000	10082	9623	21500	4657	4117	11700	14725	34500	3786	5425	5000
3	2.45	1.85	5	228	10814	8648	20000	4521	6176	11744	19311	50500	4324	4324	4000
3	2.45	1.85	10	774	18200	14876	37481	7462	10386	20101	32584	84932	6921	6921	6850
3	2.45	2.15	0	8300	3916	4350	4432	9656	3316	10539	21000	28000	2675	2675	6500
3	2.45	2.15	1	5200	10000	9566	20701	3500	3978	11678	14700	34700	3700	5200	4100
3	2.45	2.15	5	526	10900	8666	22288	3227	3978	6300	19500	50712	4076	4076	3555
3	2.45	2.15	10	1500	17900	15000	38307	7700	10500	20200	32600	85000	6850	6850	6771
3	2.45	2.45	0	6869	3945	4391	4275	8667	3191	10500	20427	28152	2681	2754	5848
3	2.45	2.45	1	4611	9933	9705	20600	2587	4000	11603	14660	34900	3609	3609	3515
3	2.45	2.45	5	1210	10532	8797	22300	4846	4600	11852	19450	50900	4298	4298	4227
3	2.45	2.45	10	3104	17595	15137	36000	8000	10326	20277	32682	85237	6800	6800	6843
3	3.05	1.5	0	13840	4597	3976	4751	14500	3936	12303	20800	28097	2596	2922	11000
3	3.05	1.5	1	8085	14158	13250	23540	7053	5030	14600	15189	37500	4108	7072	7454
3	3.05	1.5	5	3751	17665	12713	28210	7229	8908	17577	23164	62410	7363	7363	6250
3	3.05	1.5	10	5464	29931	22127	48410	12058	15098	30000	39211	105590	12058	12058	10000
3	3.05	1.85	0	10734	4589	3704	4672	11761	3885	12265	20600	28323	2533	2809	8419
3	3.05	1.85	1	6502	14000	13300	23400	5115	5000	14505	15223	37701	40		

3	3.65	1.85	10	8033	44144	31407	59684	16534	20564	41000	45240	126761	17900	17900	12511
3	3.65	2.15	0	8531	5042	3400	4505	10015	4000	13455	20000	29106	2000	2480	6712
3	3.65	2.15	1	5508	18025	17069	24900	3295	5705	16851	15509	41125	3841	7324	5193
3	3.65	2.15	5	3641	25900	18341	33000	9265	12418	24018	26862	75200	10700	10700	6974
3	3.65	2.15	10	5284	43900	31600	58206	15429	21000	40879	45290	126953	17446	17446	11721
3	3.65	2.45	0	7074	5045	3432	4215	9000	4046	13442	19876	29338	1960	2404	5522
3	3.65	2.45	1	4866	17900	17121	24589	3336	5715	16840	15600	41400	3764	7000	4392
3	3.65	2.45	5	2313	25707	18375	33500	8929	12539	24030	26950	75338	10476	10476	6818
3	3.65	2.45	10	3037	43567	31481	56726	14837	21000	30877	34298	127143	17093	17093	11478
3	3.65	3.05	0	4760	5075	3524	4224	7897	4000	13425	19617	29820	1934	2311	3806
3	3.65	3.05	1	4045	17579	17245	24410	3620	5669	16811	15566	41868	3586	6430	3284
3	3.65	3.05	5	824	25386	18504	33990	8864	12662	24117	27000	75840	10335	10335	7125
3	3.65	3.05	10	1731	43000	31675	58658	14584	20970	30933	45406	127515	16700	16700	11680
3	3.65	3.65	0	3308	5092	3586	4122	7523	3851	13144	19825	30300	1856	2195	2815
3	3.65	3.65	1	3455	17441	17302	24457	4128	5719	16770	15661	42389	3358	5914	2540
3	3.65	3.65	5	1945	25256	18524	24180	9285	12765	24077	27275	76345	10796	10796	7676
3	3.65	3.65	10	2720	42662	31900	60677	15251	21015	40800	45441	127297	17355	17355	12380







SELECCIONE LA CONFIGURACIÓN DE ALCANTARILLA A UTILIZAR

# Celdas	Luz (m)	Altura (m)	Relleno (m)
2	3.05	4.3	5

PULSE PARA CARGAR DATOS

Losa Superior				Losa Inferior				Paredes			
Pu (kg)	Mu ↑(kg-m)	Mu ↓(kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑(kg-m)	Mu ↓(kg-m)	Vu (kg)	Pu (kg)	Mu ↑(kg-m)	Mu ↓(kg-m)	Vu (kg)
3240	17700	12800	29400	7918	8600	21500	25620	70743	7119	7118	6767

Cálculo de losa Superior

MOMENTOS ABAJO DEL DIAGRAMA

Datos para diseño:

Espeor	26	cm
Recubrimiento:	7.5	cm
Luz	3.05	m
d:	18.5	cm
b:	100	cm
Fy (grado 60):	4200	kg/cm2
Fc:	280	kg/cm2

Diseño por flexión:

M inferior: 12800 Kg-m
Mu : 1280000.00 kg-cm

Supongo un ϕ :

$$\phi: 0.9$$

$$a: d - (d^2 - (2Mu/\phi * 0.85 * f_c * b))^{0.5}$$

$$a: 3.5756733$$

$$As: 0.85 * f_c * b * a / f_y$$

As: 20.2621487 cm2

Comprobar si necesito poner bastones en momentos máximos:

20.26214868 > 4.68 Poner bastones por flexión

As a utilizar en bastones:

As: 15.58

Ahora comprobar el ϕ : 0.9

Como el concreto es menor a 280 kg/cm2

β : 0.85

Ahora: $a = \beta * c$

Así C: 4.20667447

Y finalmente:

$C/d \leq 0.375$

C/d: 0.22738781 < 0.375

Sección
Controlada por
la Tensión

As-min:

14/fy x bd: 6 cm2

Por tanto el as a utilizar es:

As: 15.6 cm2

Para el numero de varillas:

As 1 #4: 1.27 cm2
As 1 #5: 1.98 cm2
As 1 #6: 2.85 cm2
As 1 #7: 3.88 cm2
As 1 #8: 5.07 cm2

Longiitud de baston:

Cantidad de celdas: 2

1.00 m (un baston).

Longitud de un tramo: 0.52 m

Varilla #		# Varillas	Separación
Varilla #	4	12.27	13
Varilla #	5	7.86977206	8
Varilla #	6	5.46742059	6
Varilla #	7	4.0160177	5
Varilla #	8	3.07340211	4

Cantidad de bastones por Flexión que se requieren : 6 Varillas # 6 a cada 17

Longitud total de bastones: 6.0 m **b**

MOMENTOS ARRIBA DEL DIAGRAMA

Datos para diseño:

Espeor	26	cm
Recubrimiento:	7.5	cm
luz	3.05	m
d:	18.5	cm
b:	100	cm
Fy (grado 60):	4200	kg/cm2
Fc:	280	kg/cm2

Diseño por flexión:

M superior: 17700 Kg-m
Mu : 1770000.00 kg-cm

Supongo un ϕ :

$$\phi: 0.9$$

$$a: d - (d^2 - (2Mu/\phi * 0.85 * f_c * b))^{0.5}$$

$$a: 5.19647064$$

$$As: (0.85 * f_c * b * a) / f_y$$

As: 29.4466669 cm2

Comprobar si necesito poner bastones en momentos máximos:

29.44666693 > 4.68 Poner bastones por flexión

As a utilizar en bastones:

As: 24.77

Ahora comprobar el ϕ : 0.9

Como el concreto es menor a 280 kg/cm2

β : 0.85

Ahora: $a = \beta * c$

Así C: 6.11349487

Y finalmente:

$C/d \leq 0.375$

C/d: 0.33045918 < 0.375

Sección
Controlada
por la

As-min:

14/fy x bd: 6.2 cm2

Por tanto el as a utilizar es:

As: 24.8 cm2

Para el numero de varillas:

As 1 #4: 1.27 cm2
As 1 #5: 1.98 cm2
As 1 #6: 2.85 cm2
As 1 #7: 3.88 cm2
As 1 #8: 5.07 cm2

Longiitud de baston:

Cantidad de celdas: 2

1.046 m (un baston).

Longitud de un esquinero: 0.22 m

Varilla #		# Varillas	Separación
Varilla #	4	19.50	20
Varilla #	5	12.5084176	13
Varilla #	6	8.69005857	9
Varilla #	7	6.38316158	7
Varilla #	8	4.88494417	5

Cantidad de bastones por Flexión que se requieren : 9 Varillas # 6 a cada 10 cm

Longitud total de bastones: 9.4 m **a**

Diseño por Cortante:

Cortante máximo obtenido de analisis estructural:

Vu: 29400.00 Kg

se tiene que el Vu que puede soportar solo el concreto es:

$$V_c = \phi_c \times 0.33 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d$$

ϕ_c : 0.75 para cortante

Vc: 12305 kg

Vu	>	Vc	No Cumple, Poner Acero por Cortante
29400		12305	

Por tanto el cortante que debe soportar el acero es :

$$V_s = Vu/\phi - V_c$$

Vs: 26895 kg

$$V_{s\max} = 2.2 \sqrt{f'_c} \times b \times d$$

Vs max: 68104 kg

Por tanto:

Vs ≤ Vs max
26895 < 68104 OK

Ahora:

Ramas: 20
Separación: 29 cm (sep acero transv. Temp)

Si uso varilla #3:

A var 3 0.71 cm²

vs: 20.64 kg/cm²
Vs: 38183.2 kg

Vs: 26895 < Vs 38183 OK

Si uso varilla #4:

A var 4 1.27 cm²

vs: 36.69 kg/cm²
Vs: 67881.3 kg

Vs: 26895 < Vs 67881 OK

Nota: los ganchos se colocan en los extremos de cada celda, específicamente en el primer y último 25% de cada celda, además los ganchos se colocan sobre el acero transversal por temperatura.

Finalmente.

Usar 1 gancho #3 @ 18.5 cm, osea 5 unidades en el sentido transversal y solo en los extremos de cada celda, separados a 29 cm, en el sentido longitudinal de la alcantarilla.

Usar 1 gancho #4 @ 18.5 cm, osea 5 unidades en el sentido transversal y solo en los extremos de cada celda, separados a 29 cm, en el sentido longitudinal de la alcantarilla.

Diseño por Compresión Pura:

La fuerza axial máxima obtenida de analisis estructural es:

Pu: 3240.00 Kg

se tiene que:

$$\phi P_n = \phi \times 0.80 \times 0.85 \times f'_c \times (A_g - A_s)$$

ϕ : 0.65

Pn: 319848 kg

Pu	<	Pn	Ok
3240		319848	

Diseño por temperatura:

Tipo de Acero a Utilizar:

fy: 4200.00 kg/cm²

Grado: G-60

se tiene que:

b: 100 cm
t: 26 cm

As: 4.68 cm² x metro

Por tanto:

As transversal: 2.34 (tanto en la maya superior como inferior)
As longitudinal: 14.274 (tanto en la maya superior como inferior)

Para el numero de varillas:

As 1 #3: 0.71 cm²
As 1 #4: 1.27 cm²
As 1 #5: 1.98 cm²
As 1 #6: 2.85 cm²
As 1 #7: 3.88 cm²
As 1 #8: 5.07 cm²

# varilla	Cantidad		Separación (cm)	
	Transversal	longitudinal	Transversal	longitudinal
3	4.00	21.00	28	32.8
4	2.00	12.00	85	59.5
5	2.00	8.00	85	93.6
6	1.00	6.00	# DIV/0	131.0
7	1.00	4.00	# DIV/0	218.3
8	1.00	3.00	# DIV/0	327.5

Por temperatura se requieren

transversal: 4 cantidad 3 Varillas # a cada 29 cm
longitudinal: 21 cantidad 3 a cada 33 cm

Longitud de acero por temperatura:

Long: 6.7 m (Un baston)

Longitud total de acero por temperatura

Acero Transversal: 53.6 m
Acero Longitudinal: 42.0 m

Cálculo de losa Inferior

MOMENTOS ABAJO DEL DIAGRAMA

MOMENTOS ARRIBA DEL DIAGRAMA

Datos para diseño:

Espesor:	28	cm
Recubrimiento:	7.5	cm
Luz:	3.05	m
d:	20.5	cm
b:	100	cm
Fy (grado 60):	4200	kg/cm2
f'c:	280	kg/cm2

Datos para diseño:

Espesor:	28	cm
Recubrimiento:	7.5	cm
luz:	3.05	m
d:	20.5	cm
b:	100	cm
Fy (grado 60):	4200	kg/cm2
f'c:	280	kg/cm2

Diseño por flexión:

M inferior: 21500 Kg-m
Mu : 2150000.00 kg-cm
 Supongo un ϕ :
 ϕ : 0.9
 $a: Mu/\phi*0.85*f'c*b)^{0.5}$
a: 5.6843652
 $As: .85*f'c*b*a)/fy$
As: 32.2114028 cm2

Comprobar si necesito poner bastones en momentos máximos:
32.2114028 > 5.04 Poner bastones por flexión

As a utilizar en bastones:
As: 27.17

Ahora comprobar el ϕ : 0.9

Como el concreto es menor a 280 kg/cm2

β : 0.85

Ahora: $a = \beta * c$

Así **C: 6.68748847**

Y finalmente:

$C/d <= 0.375$

C/d: 0.32621895 < 0.375 Sección Controlada por la Tensión

As-min: $14/fy \times bd$: 7 cm2

Por tanto el as a utilizar es:

As: 27.2 cm2

Para el numero de varillas:

As 1 #4: 1.27 cm2
 As 1 #5: 1.98 cm2
 As 1 #6: 2.85 cm2
 As 1 #7: 3.88 cm2
 As 1 #8: 5.07 cm2

Longitud de baston: Cantidad de celdas: 2

1.00 m (un baston).

Longitud de un esquinero:	0.35	m
Longitud de un tramo:	0.52	m

Varilla #		# Varillas	Separación
4	21.39	22	4
5	13.7229307	14	7
6	9.53382554	10	9
7	7.00293886	8	12
8	5.35925104	6	17

Cantidad de bastones por Flexión que se requieren : 8 Varillas # 7 a cada 12

Longitud total de bastones: 8.0 m **d**

Diseño por flexión:

M superior: 8600 Kg-m
Mu : 860000.00 kg-cm
 Supongo un ϕ :
 ϕ : 0.9
 $a: d^2-(2Mu/\phi*0.85*f'c*b))^{\wedge}$
a: 2.06223403
 $As: (0.85*f'c*b*a)/fy$
As: 11.6859929 cm2

Comprobar si necesito poner bastones en momentos máximos:
11.68599286 > 5.04 Poner bastones por flexión

As a utilizar en bastones:
As: 6.65

Ahora comprobar el ϕ : 0.9

Como el concreto es menor a 280 kg/cm2

β : 0.85

Ahora: $a = \beta * c$

Así **C: 2.42615769**

Y finalmente:

$C/d <= 0.375$

C/d: 0.11834916 < 0.375 Sección Controlada por la Tensión

As-min: $14/fy \times bd$: 7 cm2

Por tanto el as a utilizar es:

As: 6.8 cm2

Para el numero de varillas:

As 1 #4: 1.27 cm2
 As 1 #5: 1.98 cm2
 As 1 #6: 2.85 cm2
 As 1 #7: 3.88 cm2
 As 1 #8: 5.07 cm2

Longitud de baston: Cantidad de celdas: 2

1.046 m (un baston).

Longitud de un tramo:	0.52	m
-----------------------	------	---

Varilla #		# Varillas	Separación
4	5.38	6	17
5	3.45117845	4	28
6	2.39766082	3	43
7	1.76116838	2	85
8	1.3477975	2	85

Cantidad de bastones por Flexión que se requieren : 4 Varillas # 5 a cada 28 cm

Longitud total de bastones: 4.2 m **c**

Diseño por Cortante:

Cortante máximo obtenido de analisis estructural:

Vu: 25620.00 Kg

se tiene que:

$$V_c = \phi_c \times 0.53 \times \sqrt{f_c} \times b \times d$$

ϕ_c : 0.75 para cortante

Vc: 13635 kg

Vu > Vc No Cumple, Poner Acero por Cortante

Por tanto el cortante que debe soportar el acero es:

Vs: Vu/ ϕ - Vc

Vs: 20525 kg

$$V_{g \max} = 2.2 \times \sqrt{f_c} \times b \times d$$

Vs max: 75467 kg

Por tanto:

Vs ≤ Vs max
20525 < 75467 OK

Ahora:

Ramas: 20
Separación: 29 cm (sep acero trans. Temp)

Si uso varilla #3:

A var 3 0.71 cm²

vs: 20.64 kg/cm²

Vs: 42311.2 kg

Vs < Vs OK
20525 < 42311

Si uso varilla #4:

A var 4 1.27 cm²

vs: 36.69 kg/cm²

Vs: 75219.9 kg

Vs < Vs OK
20525 < 75220

Nota: los ganchos se colocan en los extremos de cada celda, específicamente en el primer y último 25% de cada celda, además los ganchos se colocan sobre el acero transversal por temperatura.

Finalmente.

Usar 1 gancho #3 @ 20.5 cm, osea 5 unidades en el sentido transversal y solo en los extremos de cada celda, separados a 29 cm, en el sentido longitudinal de la alcantarilla.

Usar 1 gancho #4 @ 20.5 cm, osea 5 unidades en el sentido transversal y solo en los extremos de cada celda, separados a 29 cm, en el sentido longitudinal de la alcantarilla.

Diseño por Compresión Pura:

La fuerza axial máxima obtenida de analisis estructural es:

Pu: 7918.00 Kg

se tiene que:

$$\phi P_n = \phi \times 0.80 \times 0.85 \times f_c \times (A_g - A_s)$$

ϕ : 0.65

Pn: 343165 kg

Pu < Pn Ok
7918 < 343165

Diseño por temperatura:

Tipo de Acero a Utilizar:

fy: 4200.00 kg/cm²

Grado: G-60

se tiene que:

b: 100 cm

t: 28 cm

As: 5.04

Por tanto:

As transversal: 2.52 (tanto en la maya superior como inferior)

As longitudinal: 15.372 (tanto en la maya superior como inferior)

Para el numero de varillas:

As 1 #3: 0.71 cm²

As 1 #4: 1.27 cm²

As 1 #5: 1.98 cm²

As 1 #6: 2.85 cm²

As 1 #7: 3.88 cm²

As 1 #8: 5.07 cm²

# varilla	Cantidad		Separación (cm)	
	Transversal	longitudinal	Transversal	longitudinal
3	4.00	22.00	28	31.2
4	2.00	13.00	85	54.6
5	2.00	8.00	85	93.6
6	1.00	6.00	# DIV/0	131.0
7	1.00	4.00	# DIV/0	218.3
8	1.00	4.00	# DIV/0	218.3

Por temperatura se requieren

Varillas #

transversal: 4 3 a cada 29 cm

longitudinal: 22 3 a cada 32 cm

Longitud de acero por temperatura:

Long: 6.7 m (Un baston)

Longitud total de acero por temperatura

Acero Transversal: 53.6 m

Acero Longitudinal: 44.0 m

Cálculo de Paredes

Si: **Pu (kg) 0.05 x f'c x Ag**
70743 > 28000 Realizar análisis Flexo-compresión

Datos para diseño:

Espesor	20	cm
Altura	4.3	m
Recubrimiento:	7.5	cm
d:	12.5	cm
b:	100	cm
Fy (grado 60):	4200	kg/cm2
f'c:	280	kg/cm2

Diseño por flexión:

M inferior: 7119 Kg-m
 Mu: 711900.00 kg-cm
 Supongo un ϕ :
 ϕ : 0.9
 $a: 2Mu / (\phi * 0.85 * f'c * b) * 0.5$
 a: 3.024800173
 $As: 0.85 * f'c * b * a / fy$
As: 17.14053431 cm2

Como el concreto es menor a 280 kg/cm2

β : 0.85

Ahora: $a = \beta * c$

Así C: 3.558588439

Y finalmente:

$C/d \leq 0.375$

C/d: 0.284687075 < 0.375

Sección
Controlada por
la Tensión

As-min: 14/fy x bd: 4 cm2

Por tanto el as a utilizar es:

As: 17.1 cm2

Para el numero de varillas:

As 1 #4: 1.27 cm2
 As 1 #5: 1.98 cm2
 As 1 #6: 2.85 cm2
 As 1 #7: 3.88 cm2
 As 1 #8: 5.07 cm2

Longitud de baston: 5.16 m Cantidad de celdas: 2 (un baston).

Varilla #		# Varillas	Separación(cm)
Varilla #	4	13.50	14
Varilla #	5	8.656835511	9
Varilla #	6	6.014222566	7
Varilla #	7	4.417663483	5
Varilla #	8	3.380775999	4

Por Flexión se requieren 7 Varillas # 6 a cada 15

Longitud total acero flexión: 72 ml

c

Diseño por Cortante:

Cortante máximo obtenido de analisis estructural:

Vu: 6767.00 Kg

se tiene que:

$$Vc = \phi_c \times 0.53 \times \sqrt{f'c} \times bw \times d$$

ϕ_c : 0.85 para cortante

Vc: 9423 kg

Vu < Vc Ok
 6767 < 9423

Por tanto el cortante que debe soportar el acero es :

Vs: Vu/ ϕ - Vc

Vs: 0 kg

$$Vs_{max} = 2.2 \sqrt{f'c} \times b \times d$$

Vs max: 46016 kg

Por tanto:

Vs ≤ Vs max OK
 0 < 46016

Ahora:

Ramas: 54
 Separación: 25 cm (sep acero trans. Temp)

Si uso varilla #3:

A var 3 0.71 cm2

vs: 64.64 kg/cm2
 Vs: 80804.0 kg

Vs: 0 < Vs 80804 OK

Si uso varilla #4:

A var 4 1.27 cm2

vs: 114.92 kg/cm2
 Vs: 143651.6 kg

Vs: 0 < Vs 143652 OK

Nota: los ganchos se colocan en los extremos de cada celda, específicamente en el primer y ultimo 25% de cada celda, además los ganchos se colocan sobre el acero transversal por temperatura.

Finalmente.

Usar 1 gancho #3 @ 12.5 cm, osea - unidades en el sentido longitudinal y solo en los extremos de cada celda, separados a - cm, en el sentido transversal de la alcantarilla.

Usar 1 gancho #4 @ 12.5 cm, osea - unidades en el sentido longitudinal y solo en los extremos de cada celda, separados a - cm, en el sentido transversal de la alcantarilla.

Diseño por Compresión Pura:

La fuerza axial máxima obtenida de analisis estructural es:

Pu: 70743.00 Kg

se tiene que:

$$\phi P_n = \phi \times 0.85 \times 0.85 \times f_c \times (A_g - A_s)$$

$$\phi = 0.65$$

Pn: 245399 kg

Pu	<	Pn	Ok
70743		245399	

Diseño por temperatura:

Tipo de Acero a Utilizar:

fy: 4200.00 kg/cm2
Grado: G-60

se tiene que:

b: 100 cm
t: 20 cm

As: 3.6 cm2 x metro

por tanto el As a utilizar es:

Para el numero de varillas:

As 1 #4: 1.27 cm2
As 1 #5: 1.98 cm2
As 1 #6: 2.85 cm2
As 1 #7: 3.88 cm2
As 1 #8: 5.07 cm2

Varilla #		# Varillas	Separación
Varilla # 4	17.29	18	24
Varilla # 5	11.09	12	38
Varilla # 6	7.71	8	59
Varilla # 7	5.66	6	83
Varilla # 8	4.33	5	104

	Varillas #		
Por Flexión se requieren	18	4 a cada	25
Mínimo a utilizar:	7	4 a cada	60
Por tanto utilizar:	18	4 a cada	25
Longitud de acero por temperatura:			
Long:		54	m

Diseño por Flexo-Compresión:

los valores de carga Axial y momento que debe soportar el pedestal, son:

Pu: 70743 kg
Mu: 7119 kg-m

DISEÑAR POR FLEXO-COMPRESION

DATOS		
f'c=	280	Kg/cm2
fy=	4200	Kg/cm3
d=	12.5	cm
Recubrimiento	7.5	cm
E=	2100000	
b=	100	cm
Espesor=	20	cm
ey=	0.0020	
Cb=	7.50	cm
B=	0.85	f'c < 280 kg/cm2
a=	6.38	
A's=	17.14	cm2
As=	17.14	cm2

varilla #8	Usar.	Area (cm2)	Cantidad	total		
	1	5.07	5	25.34	>	17.14

Pares:

Compresion Pura P kg M (kg-m)

$$P_u = 0.85 \times f_c \times b \times h \times \phi \times (A_g - A_s) = 518253.373$$

Falla Balanceada

	F(kg)	BP(cm)	M(kg-cm)
Concreto	151725	6.81	1033626.563
A's	0	2.5	0
As	-71990.2441	2.5	1799.756103
Pn=	79734.76	Mn=	1035426.32

Verificar si el acero fluye

A's	d'= 7.5	cm		
s=	0.00000	<	0.0020	Fluye
As	d= 12.5	cm		
s=	0.0020	=	0.0020	Fluye

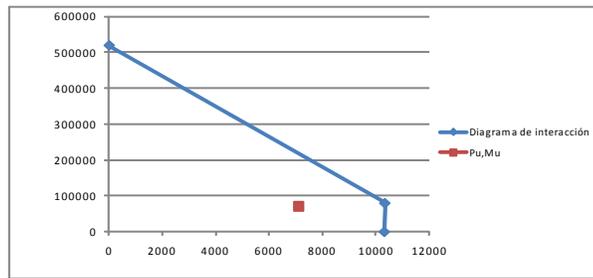
flexión Pura

Po (kg) 0 Mo (kg-cm) 1033626.563

$$M_o = 0.85 \times f_c \times a \times b \times \left(\frac{h-a}{2} \right) + A_s' \times f_s \times \left(\frac{h}{2} - d \right) + A_s \times f_s \times \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

Por tanto lo pares son

Pares	P (kg)	M (kg-m)
Comp. Pura	518253	0
F. balanceada	79735	10354
Flex. Pura	0	10336



De esta manera se puede comprobar que la pared si soporta las acciones impuestas por la estructura.

CANTIDADES DE MATERIALES DE LA ALCANTARILLA

#Celdas 2

				Volumen	Total (m3/M)
C o n c r e t o	losa superior	Longitud (m)	6.70	1.742	6.52
		Espesor (m)	0.26		
		Ancho (m)	1		
	losa inferior	Longitud (m)	6.7	1.876	
		Espesor (m)	0.28		
		Ancho (m)	1		
	Paredes	Longitud (m)	14.52	2.904	
		Espesor (m)	0.2		
		Ancho (m)	1		

6.522

y steel: 7800 kg/m3

				mL	# Varilla	Area varilla:	Area total:	Volumen:	Peso (kg)	
A C E R O	Losa superior	Acero temp.	Transversal	53.6	3	0.71	2.14	0.0115	89.3718	
			longitudinal	42	3	0.71	2.14	0.0090	70.0301	
		Acero ganchos			6.8	3	0.71	2.14	0.0014	11.2715
		Acero Bastones			15.42	6	2.85	17.10	0.0264	205.7354
		Losa inferior	Acero temp.	Transversal	53.6	3	0.71	2.14	0.0115	89.3718
				longitudinal	44	3	0.71	2.14	0.0094	73.3649
	Acero ganchos			7.28	3	0.71	2.14	0.0016	12.1386	
	Acero Bastones			12.20	5	1.98	9.90	0.0121	94.1716	
	Paredes	Acero Temp.			54	4	1.27	5.07	0.0274	213.4252
		Acero Flexión			72	6	2.85	17.10	0.1235	963.6147
		Acero ganchos			-	-	-	-	-	-
										1822 kg/m

DISEÑO HIDRÁULICO DE ALCANTARILLAS

Celdas	2.00	m
Luz (B)	3.05	m
Altura (H)	4.30	m
g:	9.81	m/s ²

Datos para calcular ecuación Cd:	
Y1/H	Cd
0.4	0.93
0.5	0.925
0.6	0.92
0.7	0.915
0.8	0.905
0.9	0.9
1	0.885
1.1	0.87
1.2	0.86
1.3	0.85
1.4	0.84

1) Area:

A: 26.23 m²

2) Calculo de caudal y tirante:

Altura máxima de tirante: 2.87 m

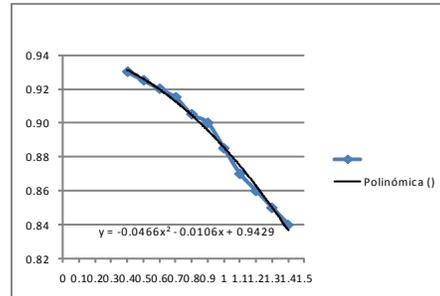
Perdidas por fricción concreto:

Supongo caudal e itero y1

caudal	y1	Y critica	Y1/H	Cd	caudal teórico
34.13	2.87	2.34	0.67	0.915122222	34.13

por tanto:

Y1	>	Ycritico	Compartamiento: Flujo Sub-Critico
2.87		2.34	
Q sup	<	Q real	Variación entre ambos Q (%)
34.13		34.13	0.01



Ycrit: 2.34 m
Area hid: 7.128 m²
P: 7.7241 m
Radio Hid: 0.9228 m

n (manning): 0.013

Por tanto:

Sc: 0.43 % pendiente máxima para mantener flujo sub-crítico

Q a usar: 68.26 m³

Celdas			2	
Luz (m)			3.05	
Altura (m)			4.3	
Máximo Relleno (m)			5	
Concreto	Losa superior T1 (cm)		26	
	Losa Inferior T2 (cm)		28	
	Paredes (cm)		20	
ACERO DE REFUERZO	L o s a s u p e r i o r	a	Varilla #	6
			espaciamiento (cm)	10
			longitud (cm)	52
		b	Varilla #	6
			espaciamiento (cm)	17
			longitud (cm)	52
		Acero por cortante	Varilla #	3
			Cantidad ganchos	5
			Esp. Transversal (cm)	18.5
	Temperatura	Transversal	Varilla #	3
			espaciamiento (cm)	29
			Cantidad	4
		Longitudinal	Varilla #	3
			espaciamiento (cm)	33
			Cantidad	21
	L o s a i n f e r i o r	c	Varilla #	5
			espaciamiento (cm)	28
			longitud (cm)	52
		d	Varilla #	7
			espaciamiento (cm)	12
			longitud (cm)	52
		e	Varilla #	7
			espaciamiento (cm)	28
			longitud (cm)	35
	Acero por cortante	Varilla #	3	
		Cantidad ganchos	5	
		Esp. Transversal (cm)	20.5	
	Temperatura	Transversal	Varilla #	3
			espaciamiento (cm)	29
			Cantidad	4
Longitudinal		Varilla #	3	
		espaciamiento (cm)	32	
		Cantidad	22	
P a r e d e s	f	Varilla #	6	
		espaciamiento (cm)	15	
		Cantidad	7	
		longitud (cm)	516	
	Acero por cortante	Varilla #	-	
		Cantidad ganchos	-	
		Esp. Transversal (cm)	-	
	Temperatura	Varilla #	4	
		Cantidad	18	
espaciamiento (cm)		25		
CANTIDAD	CONCRETO m3/ml		6.52	
	Acero kg/mL		1822	
CARACTERIS TICAS HIDRAULICAS	Area (m2)		26.23	
	Radio hidráulico (m)		0.92	
	Capacidad de descarga "Q" (m3/s)		68.26	
	Pendiente máxima a utilizar (%)		0.43	

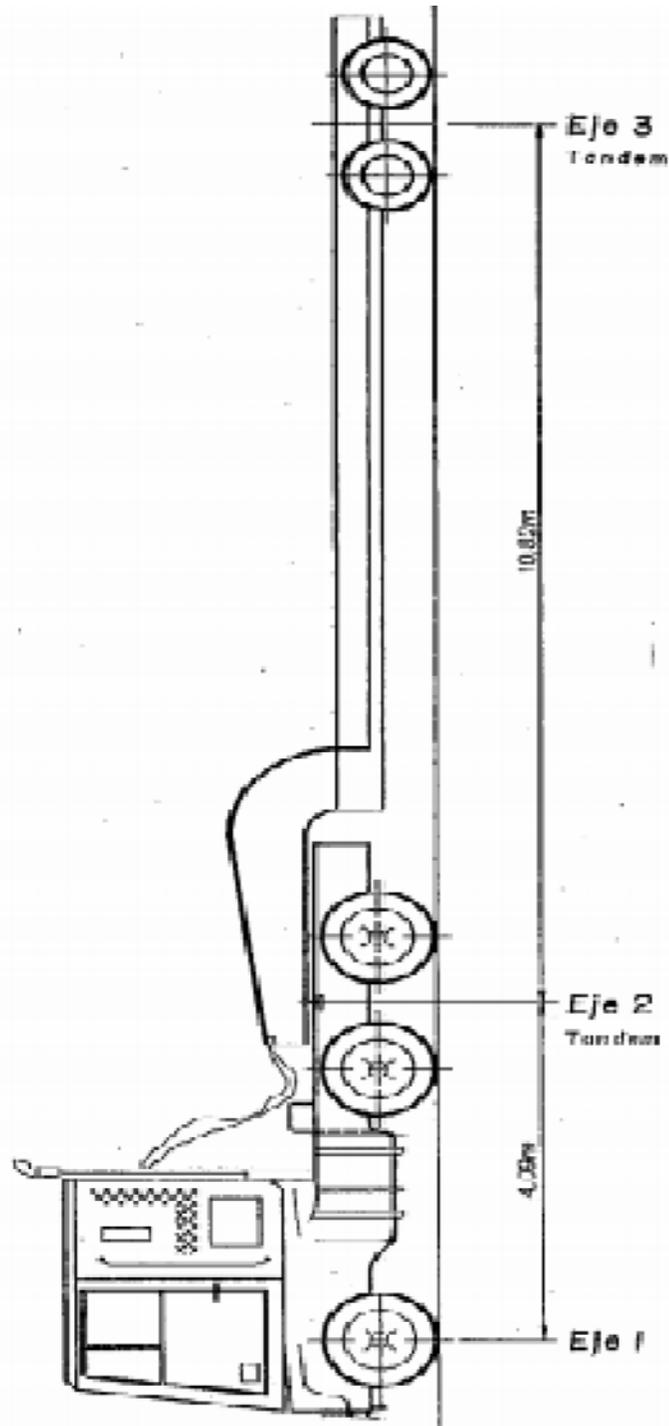
APENDICE 7

Planos Finales

Anexos

Los anexos presentados corresponden específicamente a:

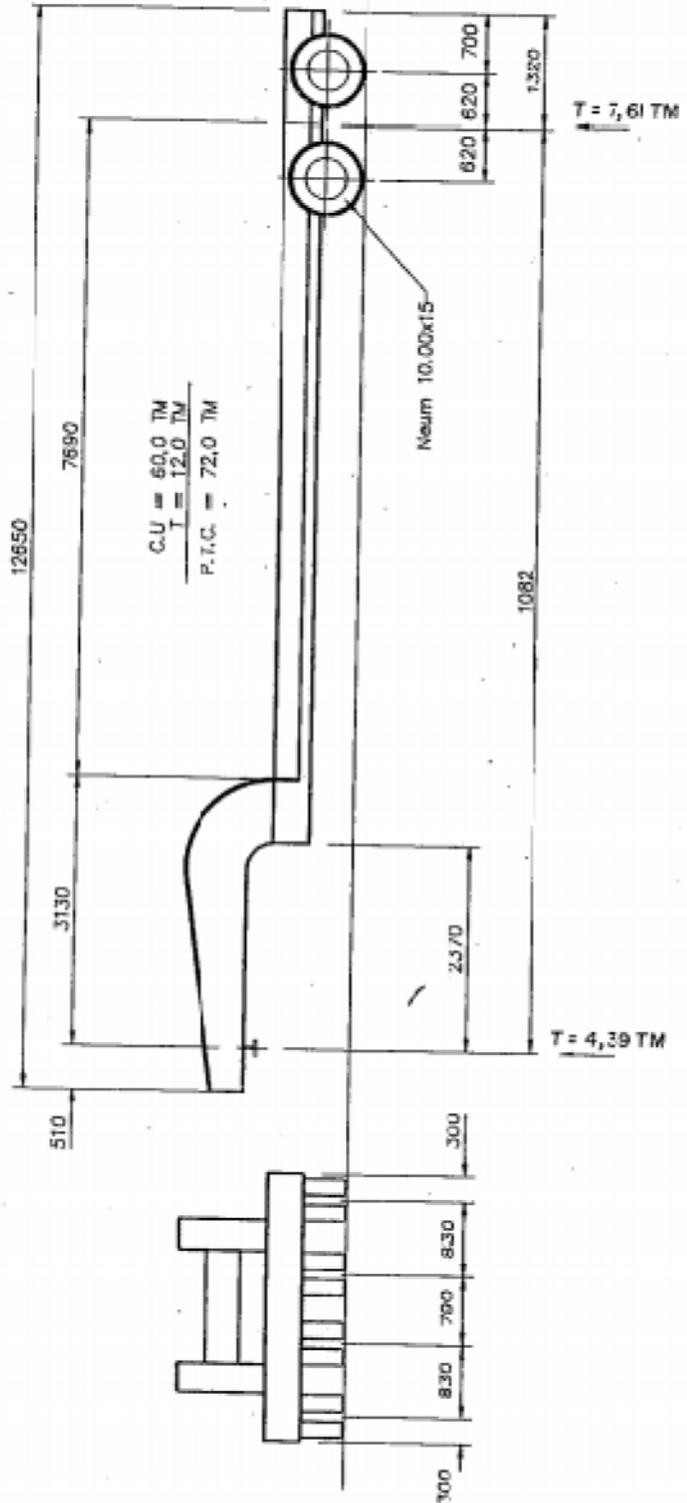
1. Modelos de los vehículos de diseño utilizados para el proyecto.(Tomados de J.Torre)
2. Cuadro de combinaciones de cargas para cargas móviles según el AASHTO LRFD.
3. Estaciones de análisis para diferentes casos de alcantarillas, según su tirante. (Tomado de R.French)



ESQUEMA DE CARGA PARA PUENTES

SEMI - REMOLQUE DORSEY MT - 35

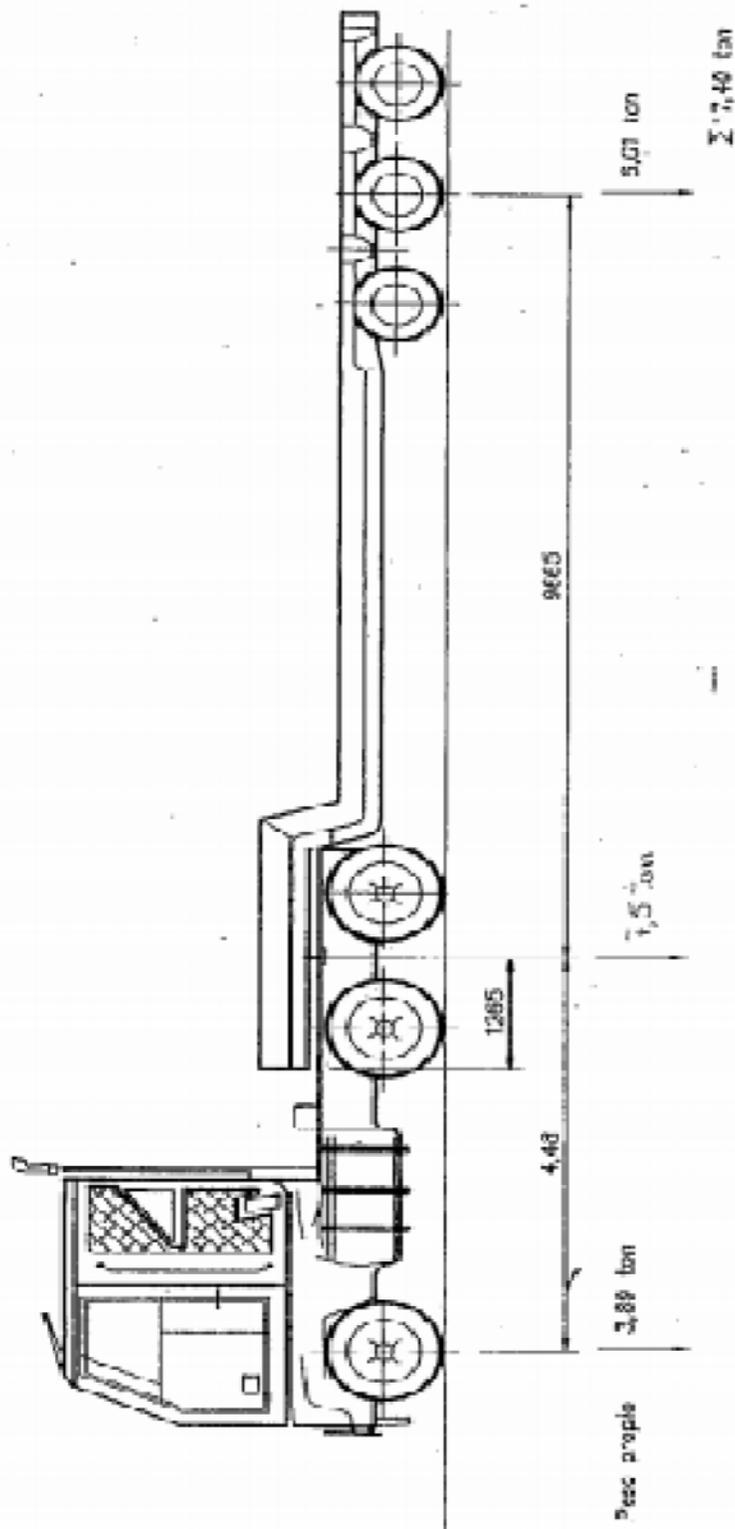
Escala 1 : 75



GEOMETRIA DE CARRETA

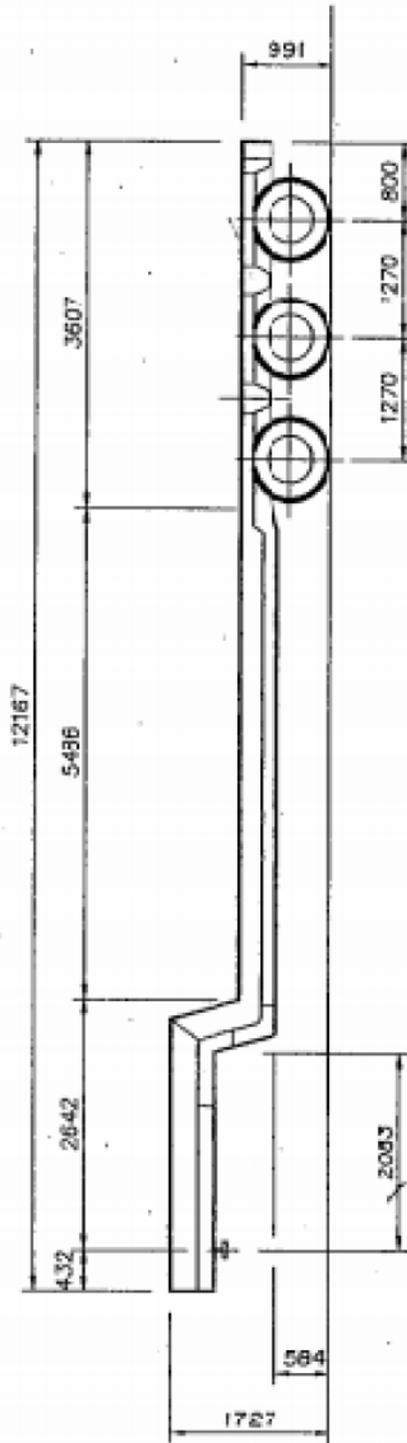
DORSEY MT 35

Escola 1; 75



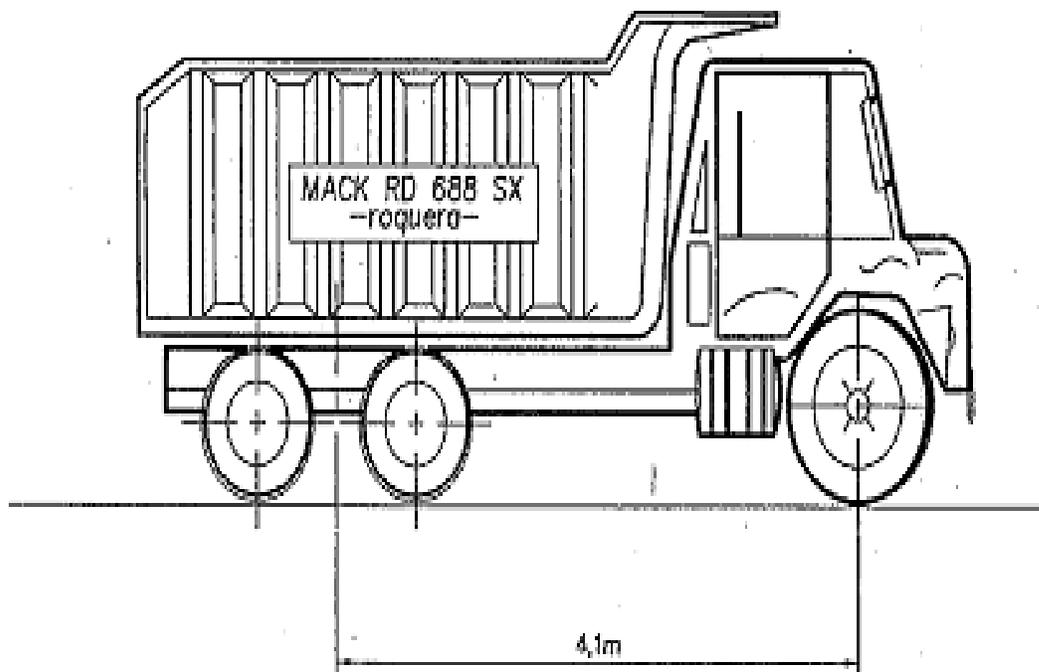
CARGAS POR EJE EN CARRETA SLB

Escala 1 : 75



GEOMETRIA DE CARRETA SLB

Escola 1 : 75

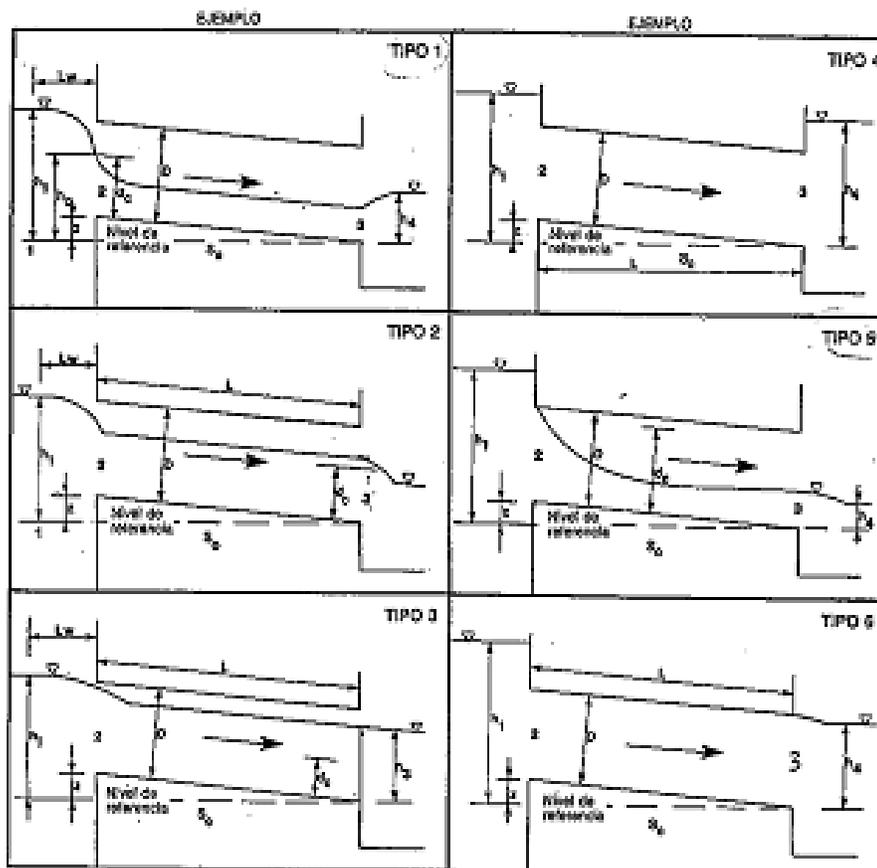


W material =	20 ton	7,45 ton
W vacía =	9,2 ton	2,3 ton
W tot =	29,2 ton	9,8 ton

$$W = 39 \text{ ton}$$

VAGONETA.

Escala 1 : 50



Tipo de flujo de alcantarilla

Ecuación de gasto

Tipo 1. Tirante crítico a la entrada

$$(h_1 - z)/D < 1.5$$

$$h_0/h_c < 1.0$$

$$S_0 > S_c$$

$$Q = C_D A_c \sqrt{2g \left(h_2 - z + a_1 \frac{V^2}{2g} - y_c - h_{f12} \right)}$$

Tipo 2. Tirante crítico a la salida

$$(h_1 - z)/D < 1.5$$

$$h_0/h_1 < 1.0$$

$$S_0 \geq S_c$$

$$Q = C_D A_c \sqrt{2g \left(h_1 + a_1 \frac{V^2}{2g} - y_c - h_{f12} - h_{f23} \right)}$$

Tipo 3. Flujo subcrítico en toda la alcantarilla

$$(h_1 - z)/D < 1.5$$

$$h_0/h_c \leq 1.0$$

$$h_0/h_1 > 1.0$$

$$Q = C_D A_0 \sqrt{2g \left(h_1 + a_1 \frac{V^2}{2g} - h_0 - h_{f12} - h_{f23} \right)}$$

Tipo 4. Salida ahogada

$$(h_1 - z)/D > 1.0$$

$$h_0/D > 1.0$$

$$Q = C_D A_0 \left[\frac{2g(h_1 - h_0)}{1 + (29C_D^2 n^2 L / R_0^{4/3})} \right]^{1/2}$$

Tipo 5. Flujo supercrítico a la entrada

$$(h_1 - z)/D \geq 1.5$$

$$h_0/D \leq 1.0$$

$$Q = C_D A_0 \sqrt{2g(h_1 - z)}$$

Tipo 6. Flujo lleno a la salida

$$(h_1 - z)/D \geq 1.5$$

$$h_0/D \leq 1.0$$

$$Q = C_D A_0 \sqrt{2g(h_1 - h_0 - h_{f23})}$$

Referencias

1. http://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_geot%C3%A9cnica
2. http://web2.ucsc.cl/~mpoblete/geotecnia/INC_4102/Unidad%203/Clase%202%20Relaciones%20entre%20las%20fases%20del%20suelo%20II.pdf
3. <http://www.argemto.com.ar/9%20construccion.htm>
4. B. Das. 1999. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. Estados Unidos. Internacional Thomson editores. pag 293.
5. Braja pag 293. Presión lateral de tierra
6. Leoni. A. *Apunte sobre el coeficiente de balasto*. Facultad de ingeniería U.N.L.P .3p.
7. AASHTO. 2005. *LRFD Bridge Design Specification*. Estados Unidos. AASHTO. Sección 3. 3.32p
8. AASHTO. 1996. *LRFD Bridge Design Specification*. Estados Unidos. AASHTO. Sección 6. 153p.
9. Nielson .A.1999 “*Estructuras de Concreto*”, Estados Unidos. Mc Graw Hill. 11 edición. sección 12.1.
10. Chow.V.1994” *Hidráulica de canales abiertos*”. Estados Unidos . Mc Graw Hill. 6p
11. French. R.1988” *Hidráulica de canales abiertos*”. Estados Unidos. Mc Graw Hill. 374,378.p.
12. Torre.J. 1995. “*Informe sobre el estudio de capacidad de puentes P:H Angostura*”. Costa Rica. ICE, a2-a6.p
13. Villalaz.C. 2004. “*Mecánica de suelos y cimentaciones*”. Mexico. Editorial LIMUSA.