



UNIVERSIDAD DE ESPECIALIDADES ESPÍRITU SANTO

FACULTAD DE: Arquitectura e Ingeniería Civil

TÍTULO: Estudio Teórico-Experimental del Diseño de Conexiones
Columna-Zapata con Elementos Prefabricados de Hormigón.

**TRABAJO DE TITULACIÓN QUE SE PRESENTA COMO
REQUISITO PREVIO A OPTAR EL GRADO DE:**
Ingeniera Civil

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:
Alejandra del Rocío Trujillo Muñoz

NOMBRE DEL TUTOR:
Ing. Alex Villacrés

SAMBORONDÓN, SEPTIEMBRE, 2019

CERTIFICACIÓN FINAL DE APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor de la estudiante Alejandra del Rocío Trujillo Muñoz, que cursa estudios en la escuela de Ingeniería Civil, dictado en la Facultad de Arquitectura e Ingeniería civil de la UEES.

CERTIFICO:

Que he revisado el trabajo de tesis con el título: ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DEL DISEÑO DE CONEXIONES COLUMNA-ZAPATA CON ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN, presentado por la estudiante Alejandra del Rocío Trujillo Muñoz con cédula de ciudadanía N°. 0925314387, como requisito previo para optar por el Grado Académico de Ingeniera Civil, y considero que dicho trabajo investigativo ha incorporado y corregido las sugerencias y observaciones solicitadas por los miembros del tribunal, por lo tanto, reúne los requisitos y méritos suficientes necesarios de carácter académico y científico, para presentarse a la Sustentación Final.

Tutor: Ing. Alex Villacrés Sánchez, M.Sc.

Samborondón, Enero 2019

DEDICATORIA

Mi trabajo de titulación, se lo dedico especialmente a mi papá, porque él nunca dudó de mis habilidades, siempre supo que mi vocación era estudiar ingeniería civil desde que yo era muy pequeña; porque a pesar de los altos y bajos que tenemos en la vida, siempre ha sido un padre tan orgulloso de su hija, que cada vez habla refiriéndose a mí, pone la frente en alto mencionando todos mis logros. También va dedicado a mi mamá, quien siempre me apoyó incondicionalmente en todas mis decisiones, y luchó todos estos años de mi vida para que nunca me falte nada.

AGRADECIMIENTO

Quiero utilizar este espacio para agradecer a Dios y La Virgen por todas sus bendiciones y protección; a mis padres, Iván y Rocío, que han sabido darme su ejemplo de trabajo, honradez y por creer en mí siempre; a toda mi familia y amigos por brindarme su cariño incondicional; a todos mis profesores de la carrera de Ingeniería Civil, en especial a mi tutor, el Ing. Álex Villacrés, por haber sido un excelente docente al momento de enseñar y haberme guiado en mi trabajo de titulación; al Director de Carrera, el Ing. Urbano Caicedo, quien en un principio me ayudó a decidirme por esta carrera; a la Universidad de Especialidades Espíritu Santo, que me dio la oportunidad de adquirir tanto mis conocimientos de ingeniera civil, como valores de vida en un ambiente cómodo y amigable; al Dr. Rafael Pezo y equipo de trabajo de Mavisa S.A., por el gran apoyo y contingente para el desarrollo y éxito de esta investigación; a las personas encargadas del Laboratorio de Estructuras CEINVES, quienes hicieron posible la realización ensayo experimental de laboratorio.

***“Toda historia tiene un final, pero en la vida,
cada final anuncia un nuevo comienzo”.***

-Christian Bobin

ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DEL DISEÑO DE CONEXIONES COLUMNA-ZAPATA SIENDO ESTOS ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

¹ Universidad de Especialidades Espíritu Santo, Ecuador, Km 2,5 vía Samborondón

Alejandra Trujillo (aletrujillo@uees.edu.ec)¹

Resumen

El presente trabajo teórico-experimental tiene como propósito promover la construcción de edificaciones de manera industrializada, es decir que sus elementos estructurales sean prefabricados de hormigón. Para ello, primero se señalan las ventajas que posee esta metodología constructiva y se da a conocer su problema controversial basado en las conexiones de los componentes estructurales, debido a la falta de normativas que las sustenten en el Ecuador. Entonces, para iniciar el estudio de las conexiones mencionadas creando confiabilidad en cuanto a su seguridad, este trabajo de investigación se basó en el análisis de la unión columna-zapata, escogiendo dos tipos de conexión llamados: “Conexión con Barras de Proyección” y “Conexión con Zapata Tipo Candelero”. Por lo tanto, para un estudio efectivo, primero se realizó un análisis teórico y analítico, luego se hizo un modelo de elementos finitos en SAP200, después se efectuó un ensayo experimental mediante un pull-out test en el Centro de Investigación en Estructuras (CEINVES); y por último, por medio del análisis de resultados se obtienen fórmulas y criterios de diseño, para llevar a cabo estos tipos de conexiones de forma óptima y segura.

Palabras clave: construcción, industrializada, prefabricados, hormigón, elementos, estructurales, edificaciones, metodología constructiva, conexiones, columna-zapata, normativas, confiabilidad, seguridad, estudio, teórico-analítico, modelado, experimental, fórmulas.

Abstract

The purpose of this theoretical-experimental work is to promote the construction of buildings in an industrialized way, which is to say that their structural elements are precast concrete. To do this, the advantages of this constructive methodology are first pointed out. Then the controversial problem based on the connections of the structural components due to the lack of regulations that support them in Ecuador was mentioned. So, to start the study of the connections connecting creating reliability in terms of security, this research work is based on the analysis of the column-foundation connection, choosing two types of connection called: "Connection with Projection Bars" and "Socket Foundation Connection". Therefore, for an effective study, a theoretical and analytical analysis was first performed. Then a finite element model was made in SAP200, then an experimental trial was carried out by means of an extraction test at the Center of Structural Research (CEINVES); and finally, through the analysis of results, the formulas and design criteria are used to carry out these types of connections in an optimal and safe way.

Keywords: construction, industrialized, precast, concrete, elements, structural, buildings, construction methodology, connections, column-foundation, regulations, reliability, safety, study, theoretical-analytical, modeling, experimental, formulas.

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Problema de Investigación	5
1.3. Delimitación del Tema	8
1.4. Formulación del Problema	9
1.5. Objetivo General	10
1.6. Objetivos Específicos	10
1.7. Justificación	10
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	13
2.1. La cimentación	13
2.2. Tipos de cimentaciones superficiales	13
2.2.1. Zapatas Aisladas.....	13
2.2.2. Zapatas Combinadas	13
2.2.3. Zapatas Corridas	13
2.3. Conexiones Zapata-columna	14
2.4. Conexión con Barras de Proyección	14
2.5. Conexión Tipo Candelero	16
CAPÍTULO 3: CONEXIÓN TIPO CANDELERO	19
3.1. Fundamentación Teórica-Experimental	19
3.1.1. Ensayo Experimental.....	19
3.2. Aplicación	22
3.2.1. Estructura a Estudiar	22
3.2.2. Datos Obtenidos	25
3.2.3. Pre-dimensionamiento de la zapata	27
3.2.4. Verificación por corte.....	30
3.2.5. Verificación por punzonamiento.....	33
3.2.6. Armado de las paredes del candelero	34
3.2.7. Armado de la base del cabezal (Sentido X).....	36
3.2.8. Armado de la base del cabezal (Sentido Y)	40
3.2.9. Acero por temperatura	40
3.2.10. Diseño por corte en la base del cabezal.....	41
3.3. Modelado en SAP2000	43
3.4. Análisis de Costos	45

CAPÍTULO 4: CONEXIÓN CON BARRAS DE PROYECCIÓN	46
4.1. Fundamentación Teórica	46
4.2. Discusión de la Teoría	49
4.3. Ensayo experimental	52
4.3.1. <i>Planteamiento del Experimento.....</i>	52
4.3.2. <i>Diseño del Experimento.....</i>	53
4.3.3. <i>Hipótesis</i>	58
4.3.4. <i>Materiales a utilizar</i>	59
4.3.5. <i>Procedimiento.....</i>	63
4.4. Resultados	70
4.4.1. <i>Curvas de Resistencia $f'c$</i>	70
4.4.2. <i>Resultados del Ensayo Experimental.....</i>	71
4.5. Análisis de Resultados	72
4.5.1. <i>Análisis del Ensayo Experimental</i>	72
4.5.2. <i>Reformulación.....</i>	73
4.6. Modelado en SAP2000	77
4.7. Aplicación.....	78
4.8. Análisis de Costos	82
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
5.1. Conexión Tipo Candelero	84
5.2. Conexión con Barras de Proyección	84
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS.....	86
CAPÍTULO 7: ANEXOS.....	88

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Condominio de la Urbanización San Antonio II construido con elementos prefabricados de hormigón	5
Figura 2: Colapso de edificio por falla en las conexiones entre los elementos estructurales en Izmit-Turquía (1999)	7
Figura 3: Tipos de elementos prefabricados de hormigón principales para la estructura de un edificio	8
Figura 4: Tipos de conexión entre elementos prefabricados de hormigón columna-zapata	14
Figura 5: Conexión columna-zapata con barras de proyección	15
Figura 6: Conexión con barras de proyección con ductos embebidos con grout en la zapata	16
Figura 7: Conexión columna-zapata tipo candelero	17
Figura 8: Conexión columna-zapata tipo candelero con foso interno y foso externo.....	18
Figura 9: Tipos de interacciones en conexión del candelero. Superficies lisas, rugosas y con llaves	18
Figura 10: Prototipo de puente en México	20
Figura 11: Cuantía de acero del prototipo de puente en México	20
Figura 12: Ilustración del Modelo de ensayo experimental	21
Figura 13: Espécimen observado después de ser sometido a ensayo	21
Figura 14: Centro Comercial Bambú Park	23
Figura 15: Modelado en SAP200 del Centro Comercial Bambú Park	24
Figura 16: Formas de Candeleros con Vista 3D	24
Figura 17: Vista en planta del dimensionamiento inicial de la zapata. Fuente del autor	28
Figura 18: Vista en planta y frontal del dimensionamiento de la zapata	29
Figura 19: Vista en 3D del dimensionamiento de la zapata	29
Figura 20: Sección crítica de la zapata representada en el corte a-a	30
Figura 21: Ilustración de la distancia “x” en la zapata	31
Figura 22: Cortante (V_u) del pilote	31
Figura 23: Acciones en las paredes del candelero	35
Figura 24: Armado de la zapata tipo candelero en el corte A-A'	42
Figura 25: Armado de la zapata tipo candelero en el corte B-B'	43

Figura 26: Resultados del modelado en SAP2000 de la zapata calculada con vista en 3D	44
Figura 27: Resultados del modelado en SAP2000 de la zapata calculada con vista en planta	44
Figura 28: Longitud de empotramiento en la conexión con barras de proyección	47
Figura 29: Modelo de ensayo experimental del tipo de conexión con Barras de Proyección	53
Figura 30: BLOQUE 1A. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 35cm; tubo liso	55
Figura 31: BLOQUE 1B. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 50cm; tubo liso	56
Figura 32: BLOQUE 2A. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 35cm; tubo corrugado c/5cm	56
Figura 33: BLOQUE 2B. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 50cm; tubo corrugado c/5cm	57
Figura 34: BLOQUE 3A. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 35cm; tubo corrugado c/2.5cm	57
Figura 35: BLOQUE 3B. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 50cm; tubo corrugado c/2.5cm	58
Figura 36: Varilla de empotramiento ϕ25mm	60
Figura 37: Máquina de ensayo a la compresión del concreto	62
Figura 38: Máquina de ensayo a la tensión Controls C810/CZ	62
Figura 39: Tipos de ductos de acero a utilizar para el ensayo experimental	63
Figura 40: Armado de los bloques de ensayo	64
Figura 41: Hormigonado de bloques de ensayo	64
Figura 42: Obtención de testigos del hormigón de los bloques en cilindros ..	65
Figura 43: Colocación de la varilla de empotramiento	66
Figura 44: Dosificación y elaboración del mortero tipo grout	66
Figura 45: Colocación del mortero tipo grout	67
Figura 46: Obtención de testigos del grout en cilindros	67
Figura 47: Rotura de cilindros de hormigón	68
Figura 48: Rotura de cilindros de grout	68
Figura 49: Foto de los especímenes en la planta de prefabricados Mavisa S.A. elaborados para los ensayos de extracción	69

Figura 50: Foto del ensayo experimental realizado en el laboratorio de estructuras CEINVES	69
Figura 51: Modelado de elementos finitos de un bloque de ensayo en el programa SAP2000	78
Figura 52: Vista en planta y frontal del dimensionamiento de la zapata	80
Figura 53: Armado de la zapata en el corte A-A'	81
Figura 54: Armado de la zapata en el corte B-B'	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Demanda de cargas en la base de la columna P30	26
Tabla 2: Datos iniciales para el cálculo de la zapata tipo candelero	26
Tabla 3: Datos requeridos para calcular el armado de las paredes del candelero	35
Tabla 4: Datos requeridos para diseñar el armado por corte en las paredes del candelero	36
Tabla 5: Datos requeridos para diseñar el armado en la sección X del candelero	38
Tabla 6: Método de iteraciones para hallar los valores de “As” y “a”	39
Tabla 7: Datos requeridos para calcular el acero por temperatura	40
Tabla 8: Datos requeridos para diseñar el armado por corte del cabezal	41
Tabla 9: Volumen total de hormigón a utilizar en la zapata tipo candelero ..	45
Tabla 10: Planilla de acero de la zapata tipo candelero	45
Tabla 11: Costo total de la zapata tipo candelero	45
Tabla 12: Codificación y datos de cada bloque de ensayo. Contiene la descripción de cada bloque, tipo de tubo, empotramiento de la varilla y diámetro	54
Tabla 13: Especificaciones técnicas varillas Novacero	61
Tabla 14: Cantidad de cada material para dosificar el grout.....	61
Tabla 15: Datos obtenidos el día del ensayo Pull-out test	71
Tabla 16: Resultados de fuerza de falla y modo de falla en el experimento Pull-out test	71
Tabla 17: Relación de fuerzas de Falla entre los bloques tipo 1 con los bloques tipo 2 y 3.....	73
Tabla 18: Cálculo del coeficiente de fricción estático [μ_s] de los diferentes ensayos de conexión	74
Tabla 19: Longitud de empotramiento de la varilla de anclaje. El factor de seguridad está dado con respecto a su caso y nivel de riesgo sísmico	79
Tabla 20: Datos requeridos para calcular el diámetro y número de varillas de conexión.....	79
Tabla 21: Método de iteraciones para hallar los valores de “As” y “a”. Fuente del autor	83
Tabla 22: Volumen total de hormigón a utilizar en la zapata	83
Tabla 23: Planilla de acero de la zapata	83

Tabla 24: Costo total de la zapata77

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Porcentaje PIB utilizado en el sector de la construcción en el Ecuador	1
Gráfico 2: Inversión de construcción en el Ecuador representado en miles de millones de dólares	2
Gráfico 3: Número de permisos de construcción entregados en los últimos años	3
Gráfico 4: Especificaciones técnicas varillas Novacero	61
Gráfico 5: Curva de Resistencia de los testigos del hormigón utilizado en todos los bloques a los 2, 7 y 14 días	70
Gráfico 6: Curva de resistencia de los testigos del utilizado en todos los ductos de los bloques de ensayo a los 2,7 y 14 días.....	70
Gráfico 7: Fuerzas alcanzadas antes de la falla.....	72
Gráfico 8: Longitud mínima de la varilla de empotramiento vs. El diámetro de la varilla en función con el f'_{cg} del grout, utilizando ductos con rugosidad cada 5cm.....	76

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En la actualidad, el sector de la construcción comprende un rol muy importante entre los indicadores de desarrollo económico del Ecuador. Según el Banco Central del Ecuador (2019), la construcción aportó con el 8,62% al total del PIB (Producto Interno Bruto) en el año 2018, con un valor de 9,34 miles de millones de dólares invertidos en obras civiles tanto públicas como privadas, ubicándose en el quinto puesto de los sectores que más aportan al PIB.

A continuación en el gráfico 1 se muestra el sector de la construcción como porcentaje de Producto Interno Bruto a través de los diez últimos años (2007 al 2017) y en el gráfico 2, la inversión utilizada en la construcción representada en miles de millones de dólares.

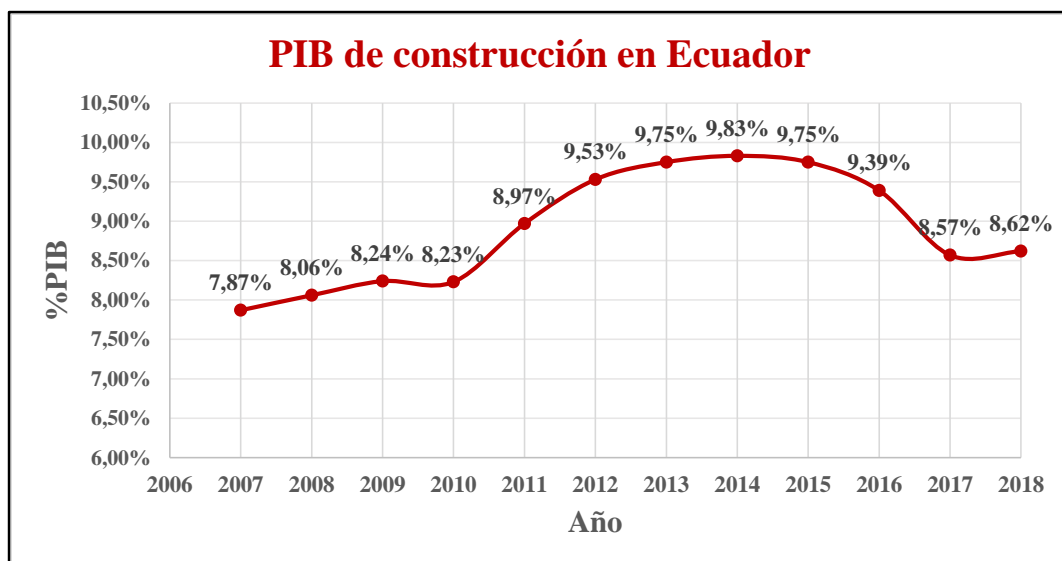


Gráfico 1. Porcentaje PIB utilizado en el sector de la construcción en el Ecuador.

Fuente: (Banco Central del Ecuador, 2019).

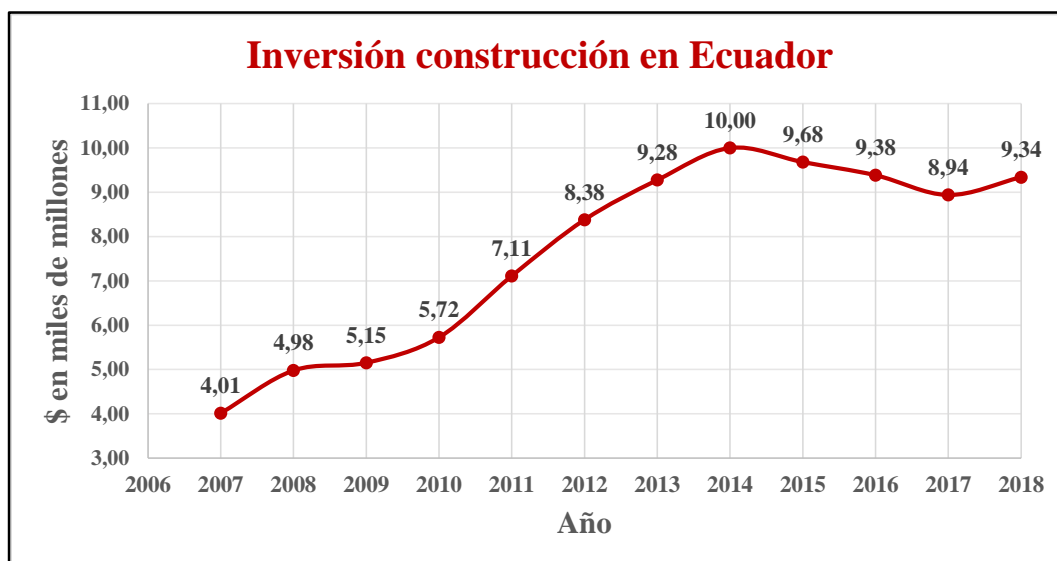


Gráfico 2. Inversión de construcción en el Ecuador representado en miles de millones de dólares. Fuente: (Banco Central del Ecuador, 2019).

En cuanto a los permisos de construcción entregados en Ecuador en los últimos años (2003-2017), estos han ido incrementando debido a que el índice de dichos permisos en el año 2017 (contando con 33.717 permisos de construcción) con relación al 2016 (29.785 permisos) aumentó en un 13% y; en contraste con el 2014 (27.199 permisos) un 24% (INEC, 2018).

Una forma muy conveniente de ejecutar un proyecto de construcción civil (ya sean obras residenciales, comerciales, industriales, institucionales u horizontales) es utilizando el método de construcción industrializado, es decir empleando elementos prefabricados de hormigón. Este método está basado en que los componentes estructurales de una edificación son manufacturados previamente en una fábrica de hormigonados para luego ser ensamblados y conectados de manera lógica y segura en obra (Escrig Pérez, 2010).



Gráfico 3. Número de permisos de construcción entregados en los últimos años.

Fuente: (INEC, 2018).

El principal atributo que sostiene la prefabricación de hormigonados es que se posee un riguroso control al momento de planificar un proyecto de construcción. Al poseer rutinas de producción repetitivas, con ayuda de la tecnología y mano de obra capacitada en planta, se logra adquirir los elementos estructurales prefabricados en un corto tiempo, con mejor calidad en los materiales y acabados, y con una probabilidad muy baja de falla en fabricación, ya que pasan por un estricto proceso de control de calidad (Escrig Pérez, 2010).

Con el uso de maquinarias controladas por operadores y sus respectivos oficiales, especializados en montaje de elementos prefabricados, se logra optimizar el tiempo de ejecución de la obra. Esto ocasiona que exista ahorro en costo de encofrado y se reduzca lo siguiente: el espacio de acopio para materiales, los residuos o desechos constructivos en obra y por ende la contaminación al medio ambiente (Bull & Park, 1987).

Desde otra perspectiva, hay una gran diferencia entre un obrero de una industria de prefabricados con otro dedicado a trabajos de construcción en sitio. El primero tiene todas las condiciones y la experiencia para la producción de los elementos prefabricados de concreto con las especificaciones requeridas. En cambio el obrero común pertenece a cuadrillas, muchas veces improvisadas, con condiciones menos favorables, por lo que a veces se generan accidentes laborales de los trabajadores y resultados no deseados (Escrig Pérez, 2010). Por el lado de la sustentabilidad ambiental, las construcciones de edificaciones con elementos prefabricados de hormigón reducen la contaminación a causa de que no se generan desechos comunes de construcción y también disminuye el impacto acústico en el sitio de la obra (Durán, 2017).

Actualmente, a nivel nacional, existen tres empresas encargadas de elaborar elementos prefabricados de hormigón las cuales son: Mavisa S.A., Ditelme y Titandol. Pezo (2019), propietario de la empresa de hormigonados y pretensados Mavisa S.A., menciona que: “Los primeros edificios construidos con estructura completamente prefabricada de hormigón en la ciudad de Guayaquil fueron los condominios de la Urbanización San Antonio I, II, y III en la Av. Juan Tanca Marengo, Km 5.5.” Hoy en día estos edificios mencionados se encuentran en perfecto estado (Véase en la figura 1).

Es importante recalcar que, de los 33717 permisos de construcción entregados en el año 2017, el 88.4% se dio para nuevas construcciones de las cuales, en el 90.1% se utilizó el hormigón como material principal de construcción contando con 26855 permisos. Del total de las construcciones con estructuras de hormigón el 29.1% fue dado para la construcción de edificios ya

sean: condominios para tres o más familias, edificios de uso comercial o mixtos; siendo una cantidad de 7815 permisos de los cuales a nivel del cantón Guayaquil fueron 1492 permisos (INEC, 2018). Pezo (2019), indica que: “Mavisa S.A. solo elabora elementos estructurales prefabricados de hormigón (vigas, columnas, zapatas y pilotes) para uno o dos edificios al año.



Figura 1. Condominio de la Urbanización San Antonio II construido con elementos prefabricados de hormigón. Fuente del Autor.

1.2. Problema de Investigación

Hoy en día, se puede comprobar que en el Ecuador el porcentaje de edificios cuyas estructuras fueron elaboradas con elementos prefabricados de hormigón es mínima (menor al 1%). No obstante, ese porcentaje mínimo de construcciones industrializadas de edificios, se ha dado por la falta de conocimiento de las ventajas que posee este tipo de metodología de construcción y, la razón más importante, es la duda que se genera con respecto al

funcionamiento mecánico de la conexión entre los componentes estructurales en el sitio de una obra (Pezo, 2019).

Las conexiones entre elementos prefabricados de concreto deben ser juntas que permitan dar continuidad a los elementos estructurales comportándose de manera monolítica, en otras palabras, simulando una unión de elementos estructurales fundidos en sitio (Publins Canessa, 2008). Esta observación conlleva a que han existido opiniones controversiales entre diseñadores estructurales y fiscalizadores de obra con respecto al funcionamiento correcto de las uniones de los prefabricados de hormigón, dado a la carencia de parámetros para su diseño provenientes de las normas de construcción en las que estas personas se rigen.

En base a la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), y en paralelo con el American Concrete Institute (ACI-318) se puede verificar que, en el capítulo 16.6 perteneciente a la sección de diseño de conexiones y apoyos de concreto prefabricado, no se encuentran criterios de diseño en donde se especifique de manera detallada la forma de diseñar conexiones monolíticas con prefabricados de hormigón para estructuras de edificios. En cambio, para estructuras coladas en sitio, sí se encuentran especificaciones técnicas para diseñar sus conexiones (Pezo, 2019).

A causa de, la falta de normativas que sustente la construcción industrializada, existe la inquietud de que por un mal diseño y funcionamiento de los nudos que conectan los elementos prefabricados de hormigón, al recibir cargas estructurales (ya sean estáticas, repetitivas o de impacto) estos presenten fallas en las juntas permitiendo el colapso de la edificación como se muestra en la figura 2 (Publins Canessa, 2008).



Figura 2. Colapso de edificio por falla en las conexiones entre los elementos estructurales en Izmit-Turquía (1999). Fuente: (Publins Canessa, 2008).

Las estructuras con elementos prefabricados de hormigón se han utilizado en varios países que han desarrollado diferentes métodos de conexión entre los componentes estructurales, generando productividad e innovación cimentada en los prefabricados de concreto en la industria de la construcción (Escrig Pérez, 2010).

En el Ecuador se debería apuntar a elevar el porcentaje de construcción de bienes tales como los edificios de uso residencial, comercial o mixto; contruidos con prefabricados de hormigón en las estructuras, en vista de sus distinguidas ventajas, estableciendo parámetros de diseño en la Norma Ecuatoriana de la Construcción; no solo de los componentes estructurales de concreto, de los cuales ya existen, sino también para las conexiones entre los prefabricados de modo que

se garantice su seguridad. Para ello, será necesario que en Ecuador se comience a estudiar las conexiones entre los diferentes tipos de elementos prefabricados comprobando que estos lleguen a ser uniones fuertes, rígidas.

1.3.Delimitación del Tema

Existen varios tipos de elementos prefabricados de hormigón para formar la estructura de un edificio tales como se muestran en la figura 3. En este trabajo de investigación se va a analizar la conexión entre los componentes estructurales prefabricados de concreto columna-zapata de manera en que esta se comporte monolíticamente haciendo funcionar estos elementos como uno solo, y al momento de ser sometido a cargas estructurales nunca exista el fallo de la junta.

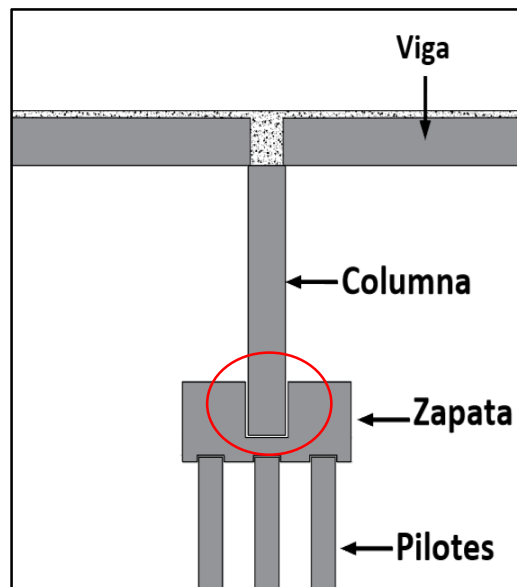


Figura 3. Tipos de elementos prefabricados de hormigón principales para la estructura de un edificio. Se señala con rojo el tipo de conexión a estudiar. Fuente del autor.

El diseño de la junta que conecta la columna con la zapata en una estructura de hormigón es muy importante, ya que si el elemento junta llega a fallar, este es difícil de reparar y puede conducir a un catastrófico colapso de la edificación al momento de recibir cargas de impacto. A parte de que la estructura colapse, esta también tiende a desplazarse de tal manera que pone en peligro el estado de las estructuras vecinas (Publins Canessa, 2008).

Existen dos clases de uniones de elementos estructurales prefabricados de hormigón: emulativos y no emulativos. Las uniones emulativas simulan los anclajes de los componentes estructurales monolíticamente, dicho de otro modo, como si estos fueran fundidos en sitio, en contraste con las uniones no emulativas que no simulan el comportamiento estructural mencionado. Este trabajo busca orientarse en el estudio de dos tipos de conexiones columna-zapata monolíticas llamadas: “Conexión con Barras de Proyección” y “Conexión con zapata Tipo Candelero”.

El tipo de columna que será utilizado para el estudio es la de sección cuadrada por lo que debido a su sección, la fabricación es más sencilla al momento de colocar los moldes en la planta de prefabricados. Por lo tanto con ella se complementarán los elementos que aplican a este trabajo.

1.4. Formulación del problema

¿Cómo calcular y diseñar de manera óptima y segura, dos tipos de conexiones emulativas entre elementos prefabricados de hormigón columna-zapata comprobando su resistencia ante la recepción de cargas estructurales y evitando fallas en la junta?

1.5.Objetivo General

Estudiar de manera teórica y experimental, el diseño y comportamiento resistente ante cargas estructurales, de dos tipos de conexión entre elementos prefabricados de hormigón columna-zapata.

1.6.Objetivos Específicos

- Identificar en teoría las características de diseño para los elementos prefabricados columna y zapata, con sus dos tipos de conexión a estudiar, mediante un análisis numérico demostrando su efectividad.
- Modelar la conexión columna-zapata con barras de proyección con ayuda del programa para modelado de elementos finitos SAP2000.
- Comprobar el comportamiento de la conexión columna-zapata con barras de proyección sometándolo a un ensayo experimental en el laboratorio de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil.
- Realizar el cálculo de una conexión columna-zapata tipo candelero de una edificación real en donde se pueda comprobar su comportamiento mediante el uso del programa de modelado de elementos finitos SAP2000.
- Elaborar criterios de diseño de conexiones columna-zapata para futuras edificaciones que se construyan con elementos prefabricados de hormigón.

1.7.Justificación

Si bien la industria de la construcción en el Ecuador es uno de los sectores más importantes que aporta al Producto Interno Bruto del país, cabe recalcar que no hay que simplemente limitarse a construir más obras civiles tanto públicas como

privadas mediante los métodos tradicionales, sino que se debe implementar otro método, como la construcción industrializada, para la optimización de costo, tiempo y recursos constructivos.

El uso de elementos prefabricados de hormigón en la construcción de edificios, como se mencionó con anterioridad, posee una serie de características ventajosas y como consecuencia, esto hace que las edificaciones construidas con elementos prefabricados de hormigón sean muy eficientes en relación al costo, tiempo de ejecución y recursos de una obra en la industria de la construcción, aparte de reducir la contaminación al medio ambiente.

Mediante este trabajo de investigación, se tiene como propósito aportar al sector de la construcción del Ecuador con criterios de diseño, para los futuros proyectos a plantearse con elementos prefabricados de hormigón, en cuanto a las conexiones que dan continuidad a un componente con otro simulando una unión monolítica entre los componentes estructurales. En el Ecuador se debe comenzar con el estudio de las conexiones entre los componentes estructurales prefabricados para edificaciones.

De esta manera, se logrará comprobar que las conexiones entre elementos prefabricados de hormigón son fuertes, rígidas y seguras. Así, al aportar con criterios de diseño en conexiones de elementos prefabricados de hormigón en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), los diseñadores estructurales y fiscalizadores de obra cuenten un manual de donde guiarse al momento de diseñar o auditar un proyecto de construcción.

Con varios criterios de diseño en las conexiones de elementos prefabricados de hormigón en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), habrá más

confiabilidad y conocimiento en las construcciones industrializadas, se apuntará a elevar el porcentaje de construcciones realizadas con esta metodología constructiva y por ende, habrá un desarrollo considerable en el sector de la construcción.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. La cimentación

La cimentación es la parte de la infraestructura de una edificación que sirve para difundir las cargas generadas en la estructura al suelo (López García & López Perales, 2015). Existen dos clases de cimentaciones:

- *Cimentaciones superficiales*: Son aquellas cimentaciones (zapatas) que se encuentran ubicadas entre 0,5m y 4m de profundidad que permiten apoyar la estructura al suelo (Penagos Congote, 2017).
- *Cimentaciones profundas*: Son aquellas cimentaciones que con ayuda de pilotes, ayudan a transmitir la carga de la estructura al estrato de suelo resistente (Penagos Congote, 2017).

2.2. Tipos de Cimentaciones Superficiales

2.2.1. Zapatas Aisladas

Los cimientos aislados o zapatas son un tipo de cimentación superficial que son diseñadas con geometría sencilla que puede ser cuadrada o rectangular, según la demanda de carga que esta vaya a soportar, siendo parte del extremo inferior de la columna que sirve como base de apoyo hacia ella (Penagos Congote, 2017).

2.2.2. Zapatas Combinadas

Los cimientos combinados se dan cuando la geometría de dos zapatas aisladas se superpone generando una sola cimentación superficial para la demanda de dos columnas muy cercanas (Penagos Congote, 2017).

2.2.3. Zapatas Corridas

Este caso se da cuando hay una superposición de las zapatas demandadas por una fila de más de dos columnas generando una sola zapata para todas estas columnas (Penagos Congote, 2017).

2.3. Conexiones Columna-zapata

Existen diferentes tipos de uniones de prefabricados de hormigón columna-zapata: emulativos y no emulativos es decir; unos que simulan los anclajes de los componentes estructurales fundidos en sitio y otros que no (véase la figura 4).

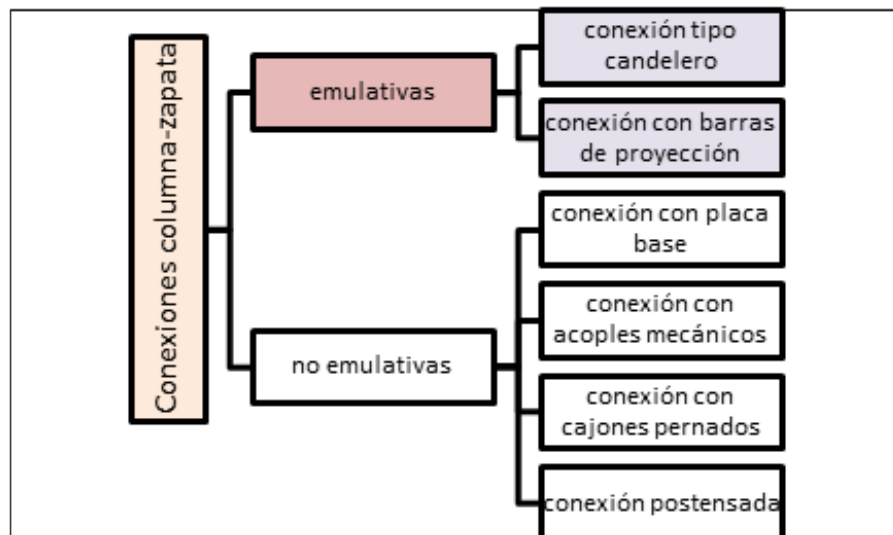


Figura 4. Tipos de conexión entre elementos prefabricados de hormigón columna-zapata. Se señala con amarillo los dos tipos de conexión a estudiar. Fuente del autor.

2.4. Conexión con barras de Proyección

La conexión columna-zapata con barras de proyección (como se muestra en la figura 5) consiste en que estos componentes estructurales prefabricados se unen monolíticamente por medio de barras de acero de refuerzo que sobresalen de la columna a una longitud determinada, y se insertan en la zapata la cual contiene unos ductos que se embeben con mortero fluido tipo grout generando un traslapo

del acero de refuerzo. Este tipo de conexión ocasiona que la junta sea resistente a cargas axiales, cortantes y momentos flectores haciendo que esta sea muy segura para edificios de alturas considerables (Negro & Toniolo, 2012).

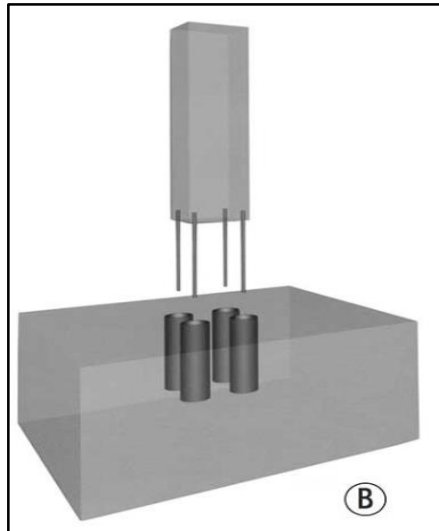


Figura 5. Conexión columna-zapata con barras de proyección. Fuente: (Penagos Congote, 2017).

Este tipo de conexión se puede realizar de dos maneras diferentes: la primera (ya mencionada) es que los ductos se encuentren en la zapata y las barras de proyección en la columna; y la segunda es que los ductos se encuentren en la columna y las barras de proyección en la zapata (Penagos Congote, 2017). La forma de conectar que será objeto de estudio a analizar por facilidad en metodología constructiva de instalación en el sitio de la obra será la primera (figura 6).

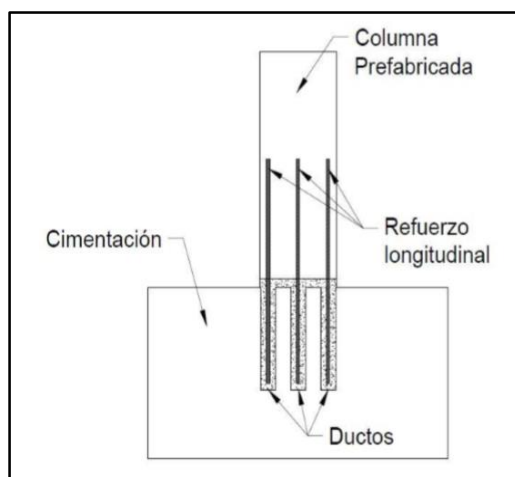


Figura 6. Conexión con barras de proyección con ductos embebidos con grout en la zapata. Tipología de conexión con barras de proyección escogida para su estudio.

Fuente: (Penagos Congote, 2017).

Existen dos formas en que los ductos pueden ser utilizados para la conexión: corrugados o lisos. Una característica esencial de los ductos corrugados es que hacen que el grout tenga una mejor adherencia al elemento en comparación con los lisos, y por ende el corrugado posee mayor fricción en el área de contacto con el hormigón de la zapata y el grout. De esta manera la fricción genera una carga contraria -de la conexión- a una carga axial de tensión que pueda generarse en la columna prefabricada o en la zapata (Negro & Toniolo, 2012).

2.5. Conexión Tipo Candelero

La conexión tipo candelero es una forma de unir componentes estructurales columna-zapata de manera monolítica, consistiendo en que la columna se encaje dentro de la zapata de la misma manera que una vela en un candelabro como se muestra en la figura 7 (Penagos Congote, 2017).

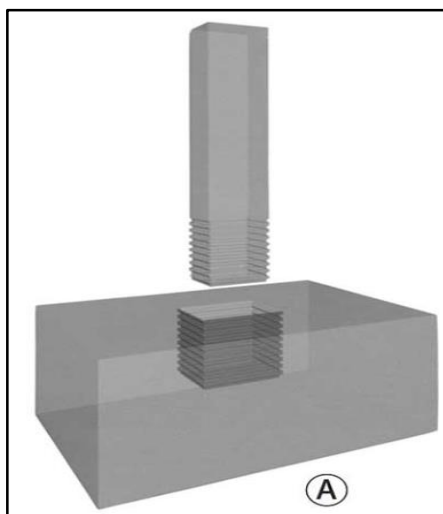


Figura 7. Conexión columna-zapata tipo candelero. Fuente: (Penagos Congote, 2017).

Esta unión se basa en que la zapata posee una depresión ya sea interna o externa llamada foso, en donde la columna se inserta dentro de dicho foso (figura 8) y con ayuda de apoyos provisionales que pueden ser cuñas de madera se acomodan correctamente los elementos y se deja un espaciamiento para luego con ayuda un mortero tipo grout unirlos (Negro & Toniolo, 2012).

Para las dos opciones de conexión hay tres formas en la que, tanto las paredes del foso y la parte de la columna que constituye la unión, interactúan entre sí generando diferentes coeficientes de fricción y adherencia; estas interacciones son: lisas, rugosas y llaves de cortante (véase la figura 9) (Penagos Congote, 2017).

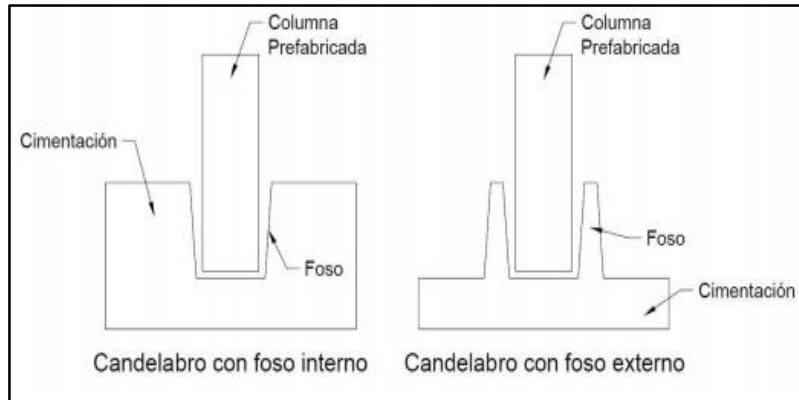


Figura 8. Conexión columna-zapata tipo candelero con foso interno y foso externo.

Fuente: (Penagos Congote, 2017).

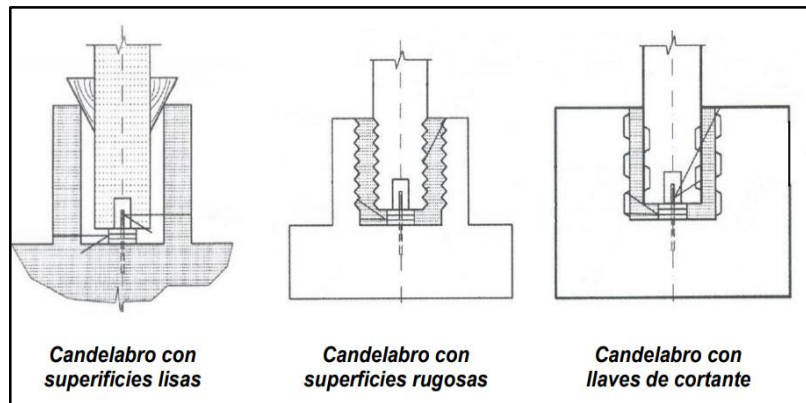


Figura 9. Tipos de interacciones en conexión del candelero. Superficies lisas, rugosas y con llaves. Fuente: (Penagos Congote, 2017).

CAPÍTULO 3: CONEXIÓN TIPO CANDELERO

3.1. Fundamentación Teórica-Experimental

A pesar de que la conexión de la base de la columna a través del candelero se usa comúnmente en estructuras de hormigón prefabricadas en varios países, todavía no se comprende bien su comportamiento, especialmente el de la base de la columna (Campos, Canha, & El Debs, 2011).

En zonas con alto grado de amenaza sísmica, el comportamiento de la cimentación es de gran importancia, por lo que, es necesario que esta sea fuerte y segura. El estudio de efectividad de la cimentación tipo candelero en zonas sísmicas ha sido escaso; por lo tanto, se requiere de mayor indagación para obtener y corroborar recomendaciones, en cuanto a criterios fiables de cálculo estructural, que sirvan para diseñar este tipo de cabezales de manera sismo resistente (Torres Matos & Rodríguez, 2014).

3.1.1. *Ensayo Experimental*

Torres Matos & Rodríguez (2014), llevaron a cabo un ensayo experimental en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este ensayo experimental consistió en cuatro réplicas a escala 1/2.5 de un prototipo de sub-estructura de los puentes construidos en México. La cimentación estudiada, en donde se empotraba una columna de forma ovalada, era de tipo candelero con dimensiones especificadas en la figura 10, cuya cuantía de acero fue calculada basándose en los parámetros de diseño de las normas AASHTO (2004) y ACI318-11(2011). Véase la figura 11.

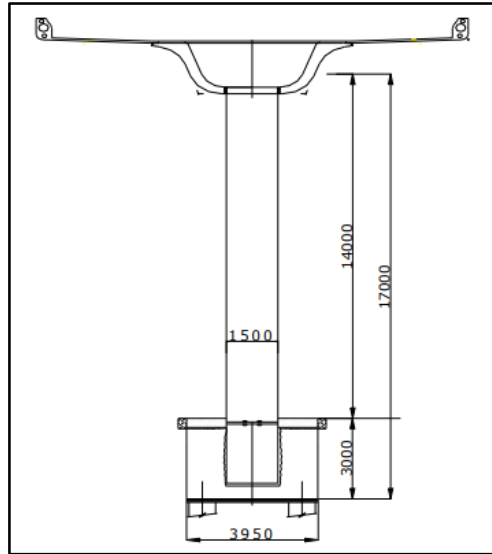


Figura 10. Prototipo de puente en México. Fuente: (Torres Matos & Rodríguez, 2014).

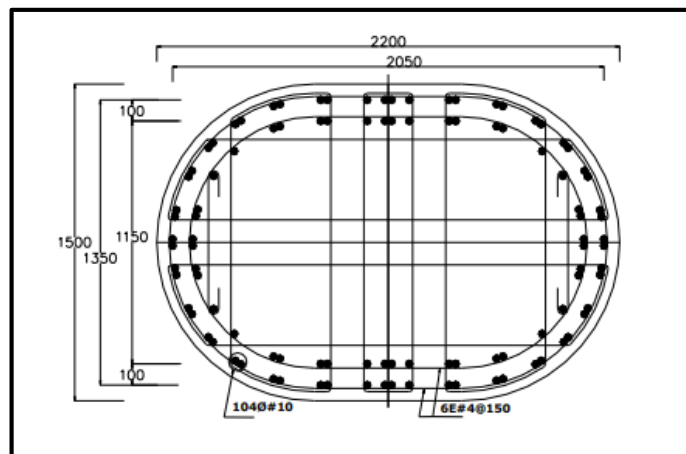


Figura 11. Cuantía de acero del prototipo de puente en México. Fuente: (Torres Matos & Rodríguez, 2014).

En el ensayo experimental, con los especímenes dimensionados a una escala 1/2.5 del prototipo de puente (véase la figura 12), se le aplicaron las cargas con ayuda actuadores, simulando fuerzas de corte y momentos flectores, como en un evento sísmico.

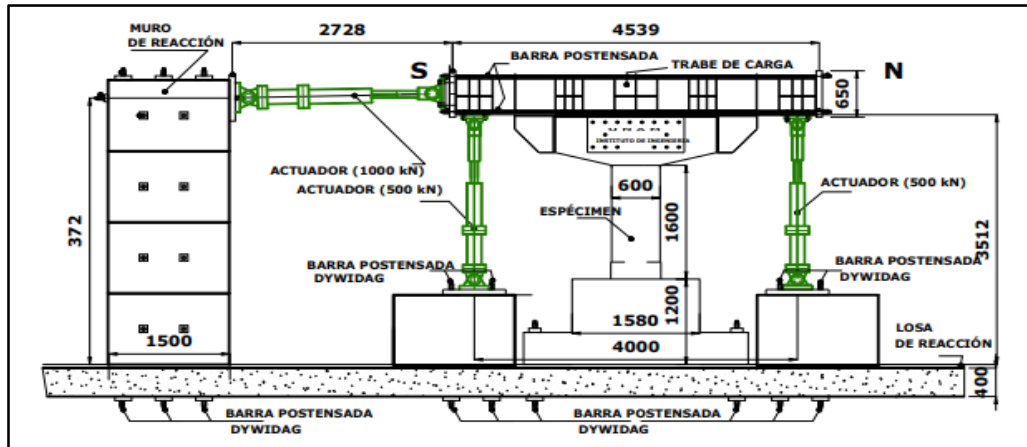


Figura 12. Ilustración del Modelo de ensayo experimental. Fuente: (Torres Matos & Rodríguez, 2014).

Luego de someter la estructura a cargas P, M y V, se pudo observar que hubo daños considerables en la columna, más no en la conexión de la cimentación, por lo tanto, se pudo concluir que este tipo de diseño resultó ser aceptable (figura 13). Gracias a este experimento, se pudo recomendar que la profundidad del foso del candelero sea 1.5 veces más el lado mayor de la columna, y hay que darle rugosidad al hormigón en la zona de conexión para que haya mayor adherencia. (Torres Matos & Rodríguez, 2014).



Figura 13. Especimen observado después de ser sometido a ensayo. Fuente: (Torres Matos & Rodríguez, 2014).

La norma AASHTO (2014) hace referencia que, el coeficiente de fricción “ μ ” para hormigón nuevo sobre hormigón endurecido de densidad normal, y dándole una rugosidad intencional de 6mm, es igual a 1. De esta manera se puede deducir que, al poseer un coeficiente de adherencia muy alto, hay menor riesgo de desprendimiento de la columna en la cimentación; y por ende sí simula una unión monolítica entre los elementos estructurales.

3.2. Aplicación

Para complementar el estudio de la cimentación tipo candelero, el autor ha decidido realizar el análisis y diseño de una zapata, para la cimentación de un Centro Comercial a construir, en donde se empotre y reciba las cargas de una columna escogida para su diseño. Después de calcular el componente estructural, se modelará en el programa SAP2000, de manera en que se le apliquen las cargas mayoradas y se pueda revisar su comportamiento.

3.2.1. Estructura a Estudiar

El Centro Comercial Bambú Park (figura 14), será un edificio ubicado en el km 2.5 de la Avenida Samborondón, Ecuador; en el terreno en donde antes se localizaba el famoso restaurante “La Parrillada del Ñato” y el parque infantil “Tierra Diversión” cuyas estructuras, hoy en día, ya fueron demolidas para proceder con este proyecto innovador (GeoBienes, 2019).

El edificio de tipo comercial, contará con una fachada sensacional revestida de bambú y un concepto estructural ultramoderno, llegando a ser un lugar placentero en donde las personas que lo visiten, disfruten de una gran experiencia a la hora de ir a pasear, realizar compras o comer (GeoBienes, 2019).



Figura 14. Centro Comercial Bambú Park. Fuente: (GeoBienes, 2019).

A partir del modelado de la estructura del Centro comercial Bambú en el programa SAP2000 (figura 15), con el dimensionamiento de la estructura y las combinaciones de carga ya ingresadas, se puede calcular la cimentación que será requerida para cada Columna. Para la parte aplicativa de este trabajo de investigación, se decidió analizar la cimentación en la base de la columna que posea la mayor demanda de cargas. En este caso, se escogió la columna codificada como P30 encontrada en una zona central del Centro comercial.

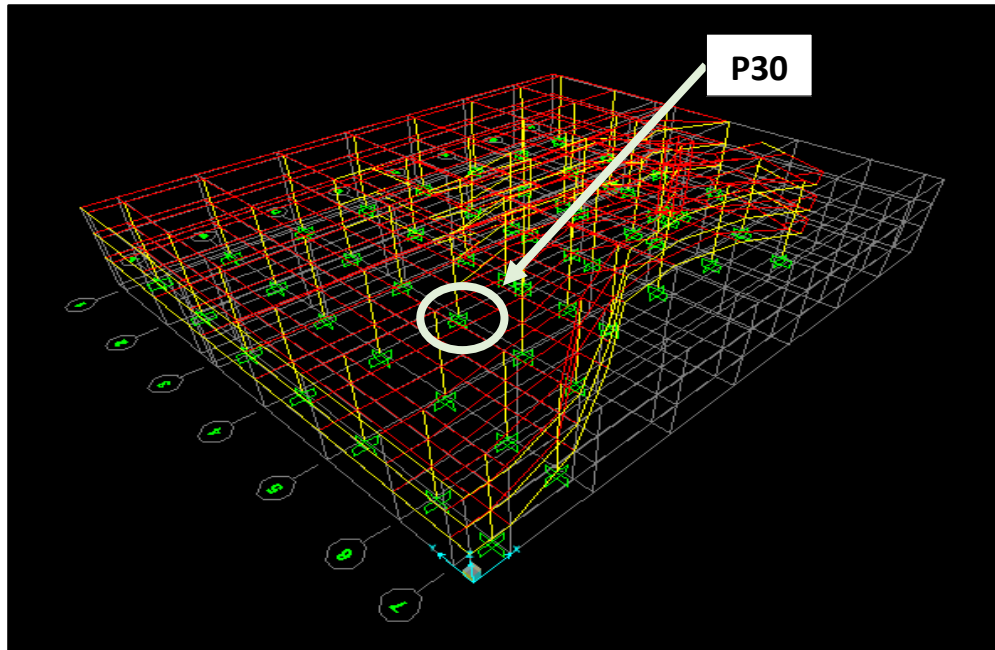


Figura 15. Modelado en SAP200 del Centro Comercial Bambú Park. Se señala con una flecha la zona en donde se va a diseñar la cimentación. Fuente obtenida en la Consultora Andina (COA).

Hay tres formas de calcular una zapata tipo candelero: con foso interno, foso externo y con foso de altura variable (figura 16).

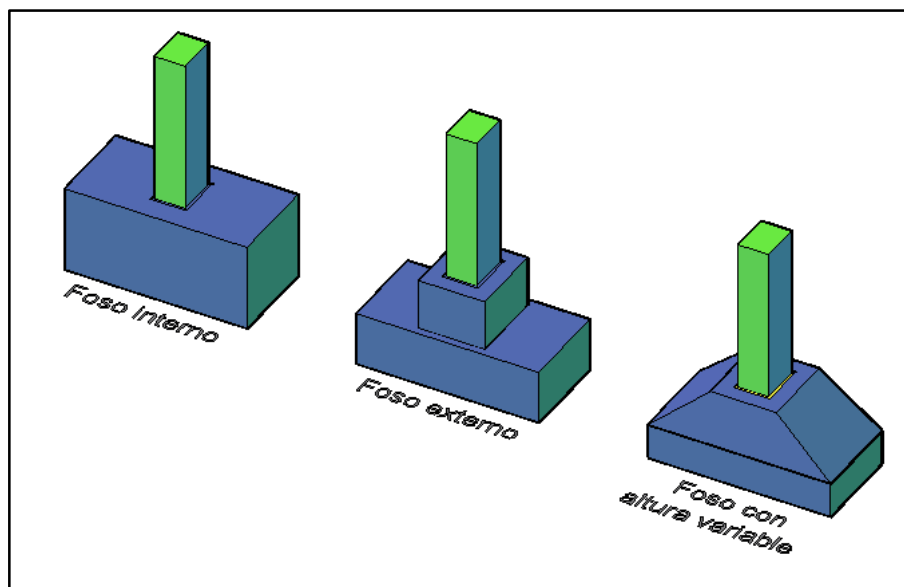


Figura 16. Formas de Candeleros con Vista 3D. Fuente del Autor.

Los candeleros con foso interno tienen la ventaja de ser muy seguros y resistentes por su geometría; pero al momento de evaluarlo por el punzonamiento de la columna, requiere mayor peralte efectivo (d) y llegan a utilizar una gran cantidad de volumen de hormigón (Penagos Congote, 2017).

Los candeleros de foso con longitud variable, son muy convenientes en cuestión de dimensionamiento, teniendo un menor volumen de hormigón a utilizar comparado con los candeleros de foso interno, cumple con los requerimientos de evaluación por cortante y punzonamiento. La desventaja de este tipo de geometría es la dificultad del encofrado si se decide que esta zapata vaya a ser fundida en el sitio de la obra (Pezo, 2019).

Los candeleros con foso externo, al cumplir con las condiciones de corte y punzonamiento, requieren de un menor volumen de hormigón a utilizar, en comparación con los candeleros de foso interno; y la manera de encofrado en el sitio de la obra es menos complicada que la de los candeleros con foso de altura variable (Pezo, 2019). Por lo tanto, para el análisis de la cimentación en la base de la columna P30 del Centro Comercial Bambú Park, se decidió utilizar una zapata tipo candelero con foso externo.

3.2.2. Datos Obtenidos

La demanda de cargas que posee la base de la columna P30 considerando la envolvente de todas las combinaciones de cargas aplicadas es la siguiente:

Demanda de cargas P30		
Descripción	Valor	Unidades
Pu=	544,7	Ton
Vx=	28,1	Ton
Vy=	43,9	Ton
M2 =	152,4	Ton-m
M3 =	83,6	Ton-m
Torsión=	1,5	Ton-m

Tabla 1. Demanda de cargas en la base de la columna P30. Fuente del autor.

Para el diseño de esta cimentación se tomará en cuenta una zapata aislada tipo candelero con foso externo. Por motivo de que la cimentación requerirá pilotes prefabricados, se decidió que la zapata sea fundida en el sitio de la obra con un hormigón de $f'c = 350\text{kg/cm}^2$, para que después no hayan problemas de que los pilotes queden o no en una cota calculada para conectar una zapata prefabricada en obra. Una vez fundida en sitio la zapata aislada tipo candelero, se procederá a empotrar una columna prefabricada.

Para la cimentación profunda con pilotes prefabricados, se ha previsto utilizar 2 pilotes cuadrados de 50cmx50cm, por debajo de cada zapata aislada con una capacidad portante de 210Ton cada uno. A continuación, en la Tabla 2 se muestran los datos iniciales para el cálculo estructural de la zapata tipo candelero.

Datos		
f'c=	350	kg/cm ²
fy=	4200	kg/cm ²
PD=	246	Ton
PL=	156	Ton
(1,2PD + 1,6PL) Pu=	544,7	Ton
(Carga de Servicio) Puservicio=	402	Ton
#Pilotes=	2	
Cap. Admisible por Pilote=	210	Ton
Secciones de la columna	a=	60 cm
	b=	80 cm

Tabla 2. Datos iniciales para el cálculo de la zapata tipo candelero. Fuente del autor.

3.2.3. Pre-dimensionamiento de la zapata

Para un pre-dimensionamiento de la zapata, se debe tomar en cuenta que la separación mínima (S) de los 2 pilotes debe ser igual a 2.5 veces el lado del pilote (D) (Cabrera Cabrera, 2003).

$$S = 2.5 * D$$

Tomando en cuenta que el pilote es de sección 50cmx50cm, al reemplazar la fórmula se tiene que:

$$S = 2.5 * 50cm = 125cm \approx \mathbf{130cm}$$

Dejando 30cm libres desde la cara de cada pilote, hasta el lado paralelo de la zapata, se puede hallar el valor del lado B (en x) de la siguiente forma:

$$B = S + 2D + (2 * 30cm)$$

$$B = (130cm) + (2 * 50cm) + (2 * 30cm) = \mathbf{290cm}$$

En donde B sería el lado mayor de la zapata debido a que resiste el momento y el cortante proveniente de los pilotes. Ahora se puede encontrar el valor de la dimensión L (en y) de manera que guarde relación con el dimensionamiento de la columna de modo que:

$$\frac{a}{b} : \frac{L}{B}$$

En donde en la parte superior van los lados mayores, y en la inferior los lados menores. Al reemplazar los valores se obtiene lo siguiente:

$$\frac{60cm}{80cm} : \frac{L}{290cm}$$

$$L = 217.5cm \approx \mathbf{220cm}$$

A continuación, en la figura 17 se ilustra el dimensionamiento inicial de la zapata (B x L).

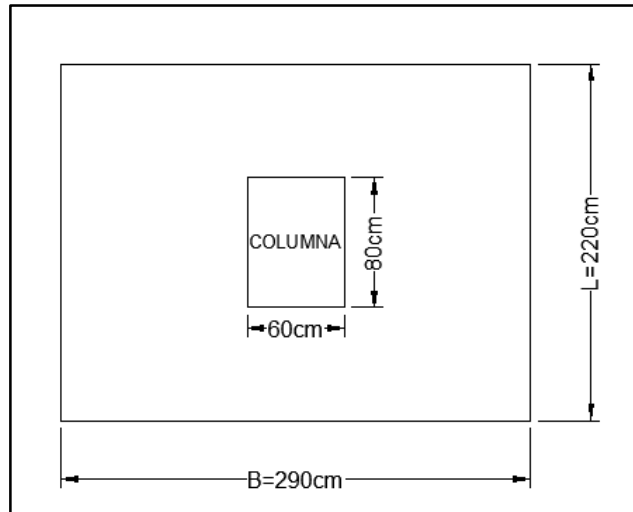


Figura 17. Vista en planta del dimensionamiento inicial de la zapata. Fuente del autor.

Para hallar la medida de las paredes del candelero, Drago (2017) basándose en diversos autores, propone las siguientes fórmulas:

$$1. \quad H = 1.5 * b$$

$$2. \quad t = 1/3 * b$$

En donde:

- H: Profundidad del foso del candelero.
- t: Espesor de la pared del candelero
- b: lado mayor de la columna

Reemplazando los valores en las fórmulas se obtiene que el valor de la profundidad del foso del candelero (H) es:

$$H = 1.5 * 80cm = \mathbf{120cm}$$

Y el valor del espesor de las paredes del candelero (t) es:

$$t = \frac{1}{3} * 80cm = 26.7cm \approx \mathbf{30cm}$$

Para obtener el espesor de la zapata (h_c) se asume el valor del peralte efectivo ($d=80\text{cm}$). Pezo (2019) recomienda que, el hormigón de los pilotes descabezados, se empotran de 10cm a 15cm, en la parte inferior de la zapata; entonces al tomar un valor de empotramiento de los pilotes de 15cm y 5 cm más para ubicar el armado inferior de la zapata, el espesor (h_c) sería el siguiente:

$$h_c = d + 15\text{cm} + 5\text{cm} = 80\text{cm} + 20\text{cm} = \mathbf{100\text{cm}}$$

En las figuras 18 y 19 se ilustra todo el dimensionamiento de la zapata.

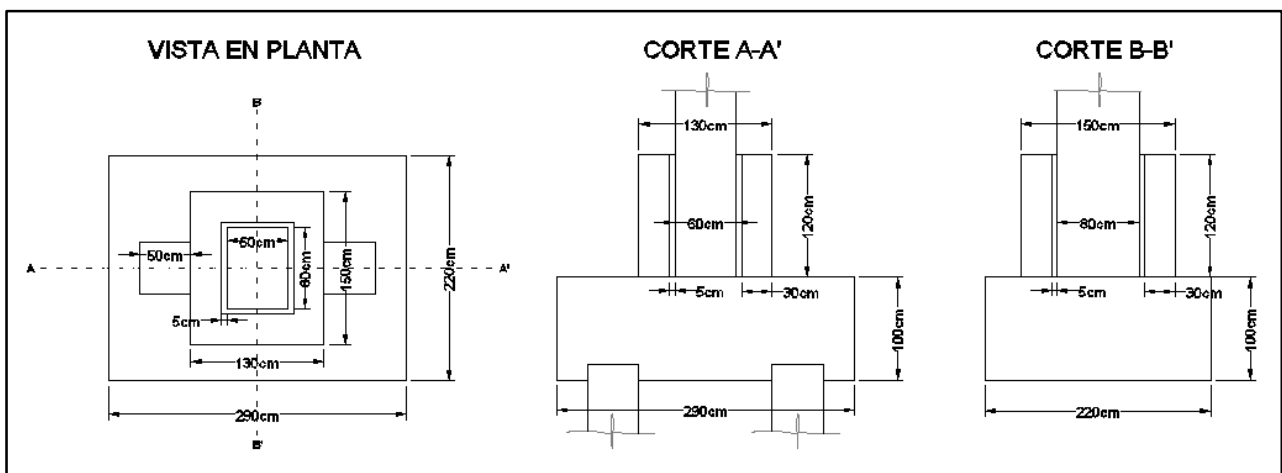


Figura 18. Vista en planta y frontal del dimensionamiento de la zapata. Fuente del autor.

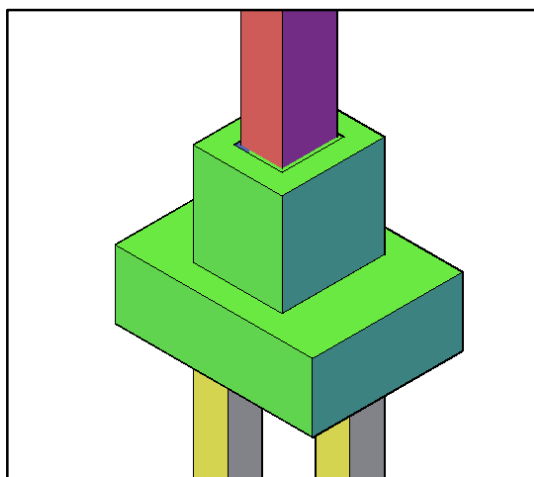


Figura 19. Vista en 3D del dimensionamiento de la zapata. Fuente del autor.

Ahora se procede a verificar las dimensiones predichas evaluando estos valores en resistencia al corte y punzonamiento, por medio de las ecuaciones del ACI 318-14.

3.2.4. Verificación por Corte

Debido a que se tiene una zapata con pilote ubicados a lo largo del sentido “X”, el ACI-318 (2014) aclara que el cortante (V_u) mayorado que se genere para este caso con pilotes debe cumplir con una de estas tres afirmaciones:

1. Si $c \geq D/2$; “ V_u ” es igual a cero.
2. Si $c = D/2$; “ V_u ” es igual a la reacción mayorada del pilote.
3. Si $c < D/2$; “ V_u ” debe basarse en una interpolación lineal.

El valor de c se da en valor absoluto y se halla restando el valor de la distancia (x), menos el peralte efectivo (d), en donde “ x ” se mide desde la sección crítica hasta el centro del pilote más cercano. A continuación en la figura 20 se ilustra a sección crítica a-a para diferentes casos.

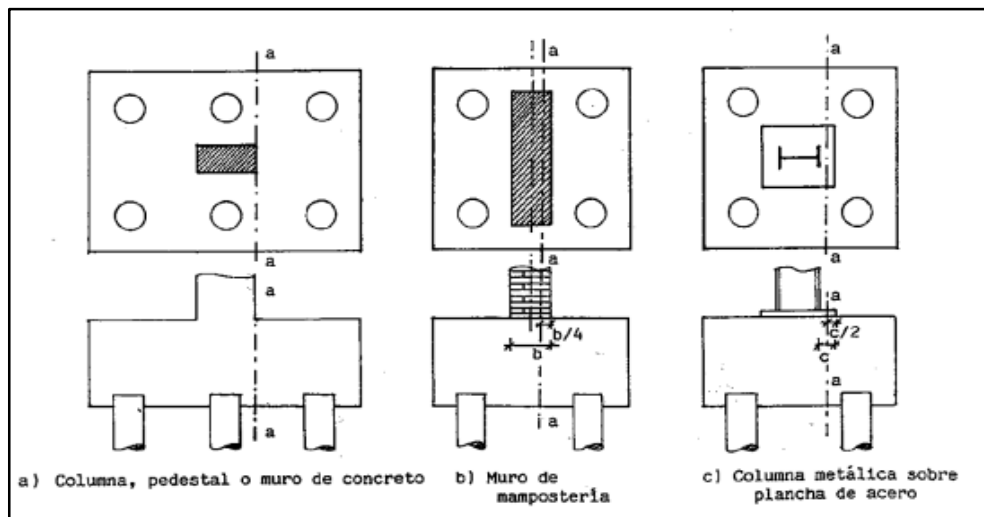


Figura 20. Sección crítica de la zapata representada en el corte a-a. Fuente: (ACI-318, 2014).

Por mayor seguridad, el plano crítico para realizar la revisión por corte se tomará desde la cara de la columna, ya que se asume que las paredes del candelero no realizan una función de pedestal. En la figura 21 se ilustra la distancia “x”.

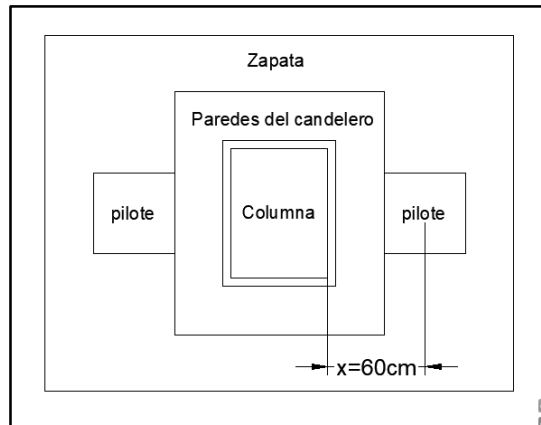


Figura 21. Ilustración de la distancia “x” en la zapata. Fuente del autor

Ya con “x” encontrado se halla en valor de “c” con la siguiente fórmula:

$$c = |x - d| = |60\text{cm} - 80\text{cm}| = \mathbf{20\text{cm}}$$

Siendo el lado del pilote $D=50\text{cm}$, se tiene que $D/2=25\text{cm}$ dando como resultado que “c” sea menor que “D/2”, ocasionando que para hallar el cortante generado por el pilote tocará interpolar. En la figura 22 se muestra el caso, en donde “ $V_{u_{max}}$ ” es la reacción del pilote mayorada con un factor de seguridad de 1.5; y el cortante “ V_{u_x} ” se halla por un método de relación de triángulos.

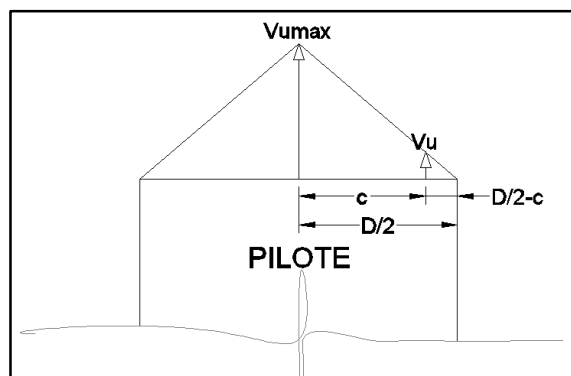


Figura 22. Cortante (V_u) del pilote. Fuente del autor.

Resolviendo:

$$Vu_{xmax} = 1.5 * \frac{Pu_{servicio}}{\# \text{ de Pilotes}} = 1.5 * \frac{402Ton}{2} = 302Ton$$

Por relación de triángulos el cortante último “ Vu_x ” se da de la siguiente manera:

$$\frac{Vu_{max}}{D/2} = \frac{Vu_x}{D/2 - c}$$

$$Vu_x = \frac{(D/2 - c) * (Vu_{max})}{(D/2)} = \frac{((50cm/2) - 20cm) * (302Ton)}{(50cm/2)} = 61Ton$$

Se debe cumplir que la estructura resista el esfuerzo cortante solo con la resistencia del concreto, es decir sin refuerzo con varilla. Por eso el ACI-3018-14 menciona la siguiente condición:

$$\phi Vc = \phi * 0,53 * \sqrt{f'c} * bw * d \geq Vu$$

En donde $\phi = 0,75$ y “bw” es el ancho de la sección crítica en el cual, dado el análisis en el sentido “X”, el valor del ese ancho de la sección es “L”, entonces resolviendo la inecuación se comprueba que:

$$\phi Vc_x = \phi * 0,53 * \sqrt{f'c} * L * d \geq Vu_x$$

$$\phi Vc_x = 0,75 * 0,53 * \sqrt{350 \text{ kg/cm}^2} * 220cm * 80cm \geq Vu_x$$

$$\phi Vc_x = 131Ton \geq Vu_x = 61Ton \text{ (Sí cumple)}$$

Dado el caso, que en el sentido “Y” los pilotes se encuentran alineados en el mismo plano de la columna, estos por ende no generan cortante, o sea $Vu_y=0Ton$; en consecuencia se confirma que:

$$\phi Vc_y = \phi * 0,53 * \sqrt{f'c} * B * d \geq Vu_y$$

$$\phi Vc_y = 0,75 * 0,53 * \sqrt{350 \text{ kg/cm}^2} * 290cm * 80cm \geq Vu_y$$

$$\phi Vc_x = 173Ton \geq Vu_x = 0Ton \text{ (Sí cumple)}$$

3.2.5. Verificación por Punzonamiento

Se debe verificar la capacidad de resistencia del concreto de la zapata ante los cortes por punzonamiento “ Vcp_{col} ” y “ Vcp_{pilote} ” generados por la columna y los pilotes que llegan al cabezal. El corte por punzonamiento de la columna (Vcp_{col}) está dado por la carga “ $Pu_{servicio}$ ” mayorada con un factor de seguridad de 1.5.

$$Vcp_{col} = 1.5 * Pu_{servicio} = 1.5 * 402Ton = \mathbf{603Ton}$$

El corte por punzonamiento del pilote (Vcp_{pilote}) es la reacción de un pilote mayorado también con el factor de seguridad de 1.5.

$$Vcp_{pilote} = 1.5 * \frac{Pu_{servicio}}{\# \text{ de Pilotes}} = 1.5 * \frac{402Ton}{2} = \mathbf{302Ton}$$

Para corroborar que el hormigón de la zapata resista el punzonamiento, se dan las siguientes condiciones:

1. $0,27 * (2 + \frac{4}{\beta c}) * \sqrt{f'c} * b_{ocol} * d \geq Vcp_{col}$
2. $0,27 * (2 + \frac{\alpha * d}{b_{ocol}}) * \sqrt{f'c} * b_{ocol} * d \geq Vcp_{col}$
3. $1,1 * \sqrt{f'c} * b_{ocol} * d \geq Vcp_{col}$
4. $1,1 * \sqrt{f'c} * b_{opilote} * d \geq Vcp_{pilote}$

Donde:

- βc : relación entre el lado mayor y lado menor de la columna.

$$\beta c = \frac{b \text{ (lado mayor)}}{a \text{ (lado menor)}} = \frac{80cm}{60cm} = \mathbf{1,33}$$

- α : parámetro igual a 40 para columnas interiores.

$$\alpha = \mathbf{40}$$

- b_{ocol} : perímetro de la sección crítica de la columna.

$$b_{ocol} = 2(a + d) + a(b + d) = 2(60cm + 80cm) + 2(80cm + 80cm) = \mathbf{600cm}$$

- $b_{0pilote}$: perímetro de la sección crítica del pilote.

$$b_{0pilote} = 4 * (D + d) = 4 * (50cm + 80cm) = 520cm$$

Reemplazando todos estos valores encontrados en las condiciones dadas, se comprueba que:

$$1. \quad 0.27 * (2 + \frac{4}{1,33}) * \sqrt{350 kg/cm^2} * 600cm * 80cm \geq Vcp_{col}$$

$$1213Ton > 603Ton \text{ (Sí cumple)}$$

$$2. \quad 0.27 * (2 + \frac{40*80cm}{600cm}) * \sqrt{350 kg/cm^2} * 600cm * 80cm \geq Vcp_{col}$$

$$1778Ton > 603Ton \text{ (Sí cumple)}$$

$$3. \quad 1.1 * \sqrt{350 kg/cm^2} * 600cm * 80cm \geq Vcp_{col}$$

$$988Ton > 603Ton \text{ (Sí cumple)}$$

$$4. \quad 1.1 * \sqrt{350 kg/cm^2} * 520cm * 80cm \geq Vcp_{pilote}$$

$$856Ton > 603Ton \text{ (Sí cumple)}$$

3.2.6. Armado de las paredes del Candelero

La fórmula recomendada por Drago (2010), para calcular el armado de las paredes del candelero, toma en cuenta todos los momento en la base de la columna ($Tu * z$), a partir de las reacciones “Pu”, “Vu” y “Mu” mayoradas. Para ser más conservadores en el diseño, se calcula con un coeficiente de fricción “ μ ” igual a cero; pero para mayor seguridad se sugiere darle rugosidad al área de contacto cimentación-columna. Esta fórmula es la siguiente:

$$Tu * z = Mu + (Vu * H) + (Pu * \frac{\max(a, b)}{6})$$

A continuación en la figura 23, se ilustran todas las acciones en las paredes del candelero para así proceder con el cálculo

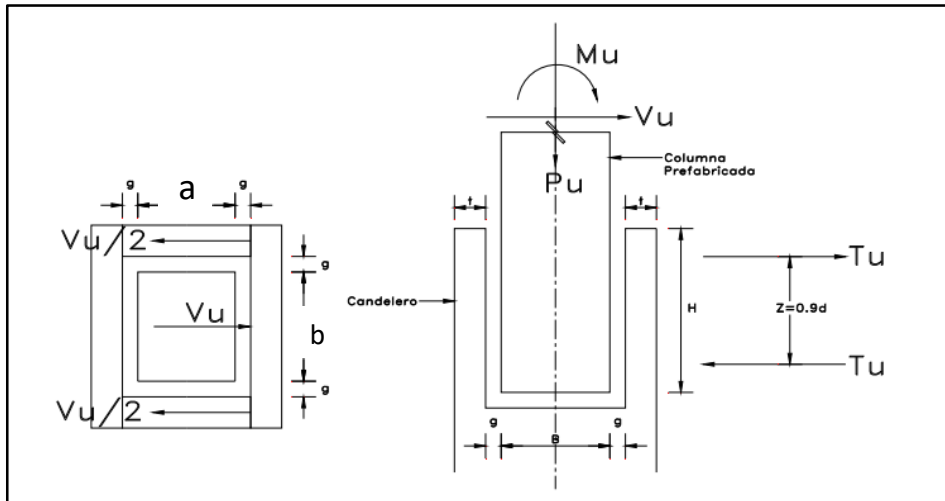


Figura 23. Acciones en las paredes del candelero. Fuente: (Drago, 2010).

Para reemplazar los valores en la fórmula, se obtuvieron los siguientes datos representados en la Tabla 3, en donde las reacciones que me mencionaron en la Tabla 1, fueron mayoradas con el factor de seguridad de 1.5.

Datos					
En el eje X			En el eje Y		
Descripción	Valor	Unidades	Descripción	Valor	Unidades
Pu=	603	Ton	Pu=	603	Ton
Vux=	42	Ton	Vuy=	66	Ton
Mux=	125	Ton-m	Muy=	229	Ton-m
a=	60	cm	a=	60	cm
b=	80	cm	b=	80	cm
g=	5	cm	g=	5	cm
H=	120	cm	H=	120	cm
t=	30	cm	t=	30	cm
f'c=	350	kg/cm ²	f'c=	350	kg/cm ²
fy=	4200	kg/cm ²	fy=	4200	kg/cm ²
d=	110	cm	d=	110	cm

Tabla 3. Datos requeridos para calcular el armado de las paredes del candelero.

Fuente del autor.

Para proceder con el cálculo del armado, se escogieron los valores de las reacciones del eje Y resaltadas en la tabla 2, ya que poseen mayor magnitud.

Resolviendo:

$$z = 0.9 * d = 0.9 * 110\text{cm} = \mathbf{99\text{cm}}$$

$$Tu * 0.99\text{m} = 229\text{Ton} + (66\text{Ton} * 1.2\text{m}) + (603\text{Ton} * \frac{0.8\text{m}}{6})$$

$$\mathbf{Tu = 392\text{Ton}}$$

$$As = \frac{Tu}{fy} = \frac{392000\text{kg}}{4200\text{ kg/cm}^2} = \mathbf{93.3\text{cm}^2}$$

En cada pared se requerirá un área de acero de:

$$\mathbf{As\ por\ cada\ pared = \frac{93.3\text{cm}^2}{2} = 46.7\text{cm}^2}$$

Usar Estribos $\phi 16\text{mm}$ c/10cm

En el diseño por corte de las paredes del candelero, se calcula con el cortante más crítico que es “Vuy”. En la figura 20 se puede apreciar que el cortante se divide en 2, ya que se reparte para cada pared del candelero. Este diseño cuenta con los siguientes datos:

Datos		
Descripción	Valor	Unidades
Vuy=	66	Ton
bw=t=	30	cm
d=(t*2)+b	145	cm
f'c=	350	kg/cm ²
fy=	4200	kg/cm ²
S=	15	cm
ϕ de corte =	0.75	

Tabla 4. Datos requeridos para diseñar el armado por corte en las paredes del candelero. Fuente del autor.

Resolviendo mediante las normas del ACI-318-14, se obtiene que:

$$V_u = \frac{V_{uy}}{2} = \frac{66\text{Ton}}{2} = 33\text{Ton}$$

$$V_n = \frac{V_u}{\phi} = \frac{33\text{Ton}}{0,75} = 44\text{Ton}$$

$$V_c = 0.53 * \sqrt{f'c} * bw * d = 0.53 * \sqrt{350 \text{ kg/cm}^2} * 30\text{cm} * 145\text{cm} = 43\text{Ton}$$

$$V_s = V_n - V_c = 44\text{Ton} - 43\text{Ton} = 1\text{Ton}$$

Como el cortante “Vs” es muy pequeño, se requiere acero resistente a corte mínimo “ $A_{v_{min}}$ ”.

$$A_{v_{min}} = 3.5 * \frac{bw * s}{f_y} = 3.5 * \frac{30\text{cm} * 15\text{cm}}{4200 \text{ kg/cm}^2} = 0.375\text{cm}^2$$

El área del acero mínimo requerido es muy pequeño, pero igual se recomienda que alrededor de las 4 paredes del candelero:

Usar 2 Estribos $\phi 10\text{mm}$ c/15cm

3.2.7. Armado de la base del Cabezal (Sentido X)

- Acero Inferior:

Los pilotes debajo del cabezal, generan un momento último “ M_{ux} ” de volcado con respecto a la cara de la columna. Es decir que este momento último se genera con la reacción del pilote “ $V_{u_{pilite}}$ ” por la distancia del centro del pilote hasta la cara de la columna “x”. Este momento último mayorado con el factor de seguridad de 1.5 es el siguiente:

$$Mux = Vu_{pilite} * x * 1.5 = 201Ton * 0.60m * 1.5 = 181Ton - m$$

Dado este caso se utilizan los siguientes datos:

Datos		
Descripción	Valor	Unidades
Mux=	66	Ton
∅ =	0,90	cm
b=	220	cm
d=	80	cm
f'c=	350	kg/cm ²
fy=	4200	kg/cm ²

Tabla 5. Datos requeridos para diseñar el armado en la sección X del candelero.

Fuente del autor.

Para hallar el acero requerido (A_s) en la parte inferior de la zapata, se tiene la esta fórmula:

$$A_s = \frac{Mux}{\emptyset * fy * \left(d - \frac{a}{2}\right)}$$

Como entre los datos no se encuentra el valor de “a”, se resuelve un sistema de ecuaciones de las dos variables “ A_s ” y “a” por el método de iteraciones.

$$a = \frac{A_s * fy}{0.85 * f'c * b}$$

Al iterar estas dos ecuaciones se obtiene que:

$a_{\text{asumido}} \text{ (cm)}$	$A_s \text{ calculado (cm}^2\text{)}$	$a_{\text{calculado}} \text{ (cm)}$
30,0000	73,6209	4,7243
4,7243	61,6369	3,9553
3,9553	61,3332	3,9358
3,9358	61,3255	3,9353
3,9353	61,3253	3,9353

Tabla 6. Método de iteraciones para hallar los valores de “As” y “a”. Fuente del autor.

Para un $A_s = 61.3 \text{ cm}^2$, el cuál es el área del acero requerido para la parte inferior de la zapata es necesario:

Usar varillas $\varnothing 25 \text{ mm c}/15 \text{ cm}$

- Acero Superior:

El área de acero requerido para la parte superior de la zapata es la del acero mínimo “ $A_{s_{min}}$ ” es cual es:

$$A_{s_{min}} = \rho_{min} * b * d$$

En donde el “ ρ_{min} ” para calcular zapatas según el ACI-318-15, es igual a 0.0018. Resolviendo se tiene que:

$$A_{s_{min}} = 0.0018 * 220 \text{ cm} * 80 \text{ cm} = \mathbf{31.7 \text{ cm}^2}$$

Por lo tanto se debe:

Usar varillas $\varnothing 18 \text{ mm c}/15 \text{ cm}$

3.2.8. Armado de la base del Cabezal (Sentido Y)

Como los pilotes debajo del cabezal, no generan un momento último en el sentido Y, se decide utilizar un acero mínimo calculado para la parte superior e inferior de la zapata es cual es:

$$A_{s_{min}} = \rho_{min} * b * d$$

En donde el “ ρ_{min} ” es igual a 0.0018; y el lado “b” para el sentido “Y” es igual a 290cm. Resolviendo se tiene que:

$$A_{s_{min}} = 0.0018 * 290cm * 80cm = 41.76cm^2$$

Por lo tanto se debe:

Usar varillas $\varnothing 18mm$ c/15cm

3.2.9. Acero por Temperatura

Para calcular el acero por temperatura del cabezal se utiliza la siguiente fórmula con los datos más críticos referenciados en la tabla 7.

$$A_{s_{temp}} = \frac{0.18 * b * h}{2 * (b + h)}$$

Datos		
Descripción	Valor	Unidades
b=	290	cm
h=	100	cm

Tabla 7. Datos requeridos para calcular el acero por temperatura. Fuente del autor.

Resolviendo:

$$A_{S_{temp}} = \frac{0.18 * 290cm * 100cm}{2 * (290cm + 100cm)} = 6,69cm^2$$

Por lo que se recomienda:

Usar varillas $\varnothing 10mm$ c/60cm

3.2.10. Diseño por corte en la base del cabezal

El diseño por corte del cabezal, se calculó con el cortante último generado por la reacción del pilote “Vu”. Este diseño cuenta con los siguientes datos:

Datos		
Descripción	Valor	Unidades
Vu=	201	Ton
bw=	220	cm
d=	80	cm
f'c=	350	kg/cm ²
fy=	4200	kg/cm ²
S=	30	cm
\varnothing de corte =	0.75	

Tabla 8. Datos requeridos para diseñar el armado por corte del cabezal. Fuente del autor.

Resolviendo mediante las normas del ACI-318-14, se obtiene que:

$$V_n = \frac{V_u}{\varnothing} = \frac{201Ton}{0,75} = 268Ton$$

$$V_c = 0.53 * \sqrt{f'c} * bw * d = 0.53 * \sqrt{350 kg/cm^2} * 220cm * 80cm = 175Ton$$

$$V_s = V_n - V_c = 268Ton - 43Ton = 93Ton$$

Como el cortante “Vn” es mayor a “Vc”, el acero requerido se calcula con la siguiente fórmula.

$$A_v = \frac{S * V_s}{f_y * d} = \frac{30cm * 93000Kg}{4200 kg/cm^2 * 80cm} = 8.35cm^2$$

Para el área del acero de corte requerido, repartiéndolo en toda la zapata, se recomienda:

Usar Ganchos $\varnothing 14mm$ c/30cm

A continuación en las figuras 24 y 25 se ilustra el armado calculado para todo el candelero.

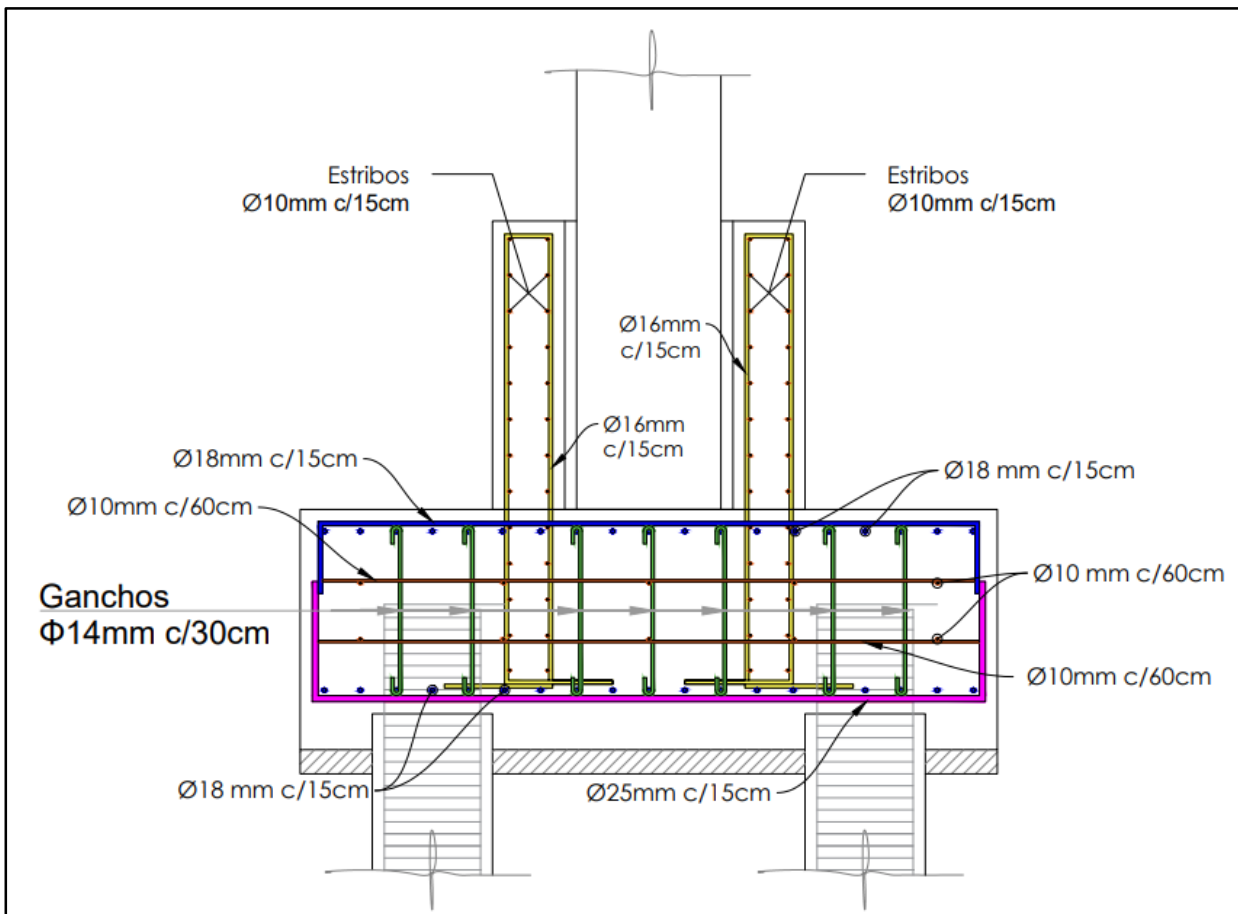


Figura 24. Armado de la zapata tipo candelero en el corte A-A'. Referente a la figura 18. Fuente del autor.

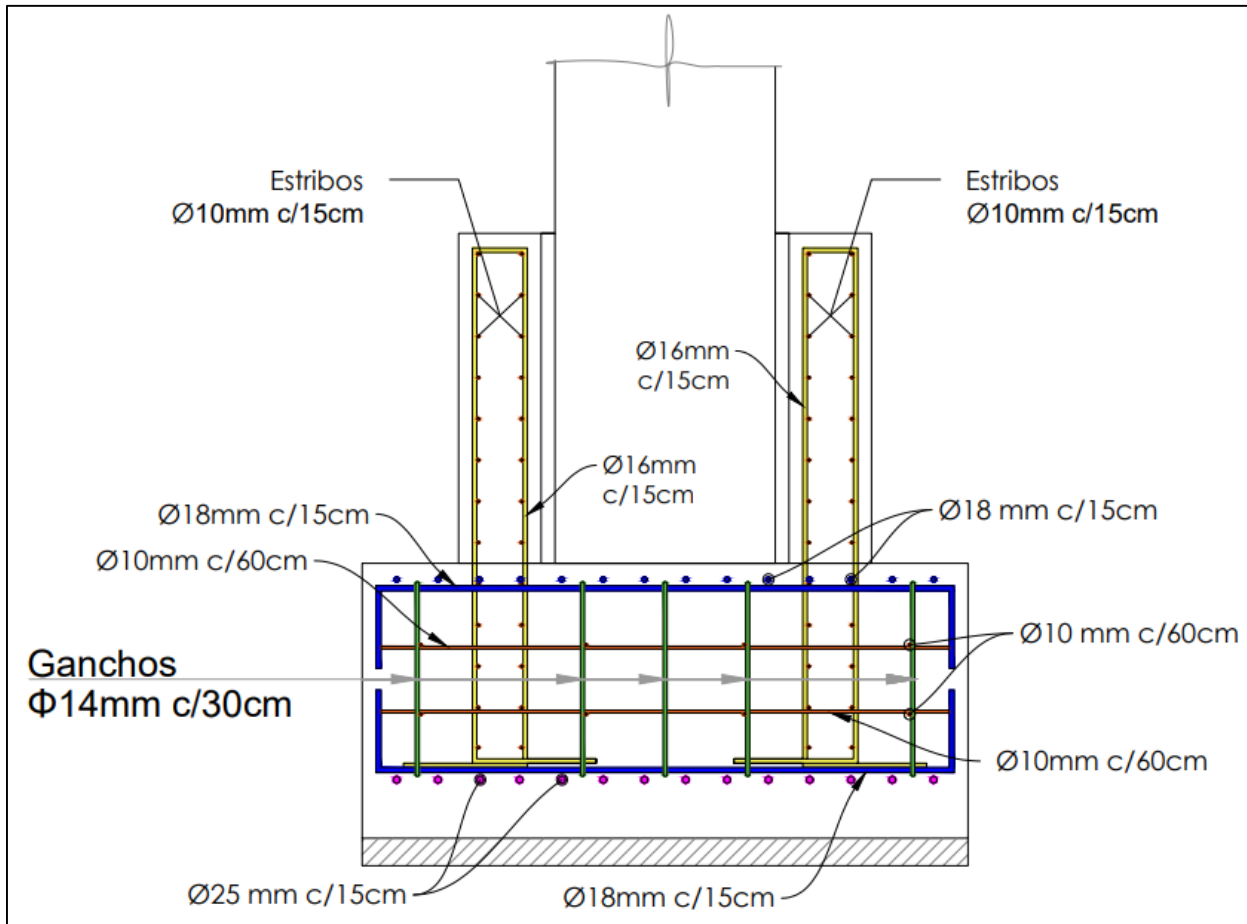


Figura 25. Armado de la zapata tipo candelero en el corte B-B'. Referente a la figura 18. Fuente del autor.

3.3 Modelado en SAP2000

Para complementar el estudio de la conexión tipo candelero con foso externo, se realizó un modelado de elementos finitos con componentes tipo Shell de la estructura calculada, con ayuda del programa SAP2000, en donde se ingresaron los datos de dimensionamiento y cargas actuantes (P_u ; V_{ux} ; V_{uy} ; M_{ux} y M_{uy}). El modelado (ilustrado en las figura 26 y 27) en el programa SAP2000 demostró que en el análisis y diseño de las secciones que recibe las cargas actuantes,

sí son soportadas por el concreto del cabezal, lo cual resulta que la conexión es válida.

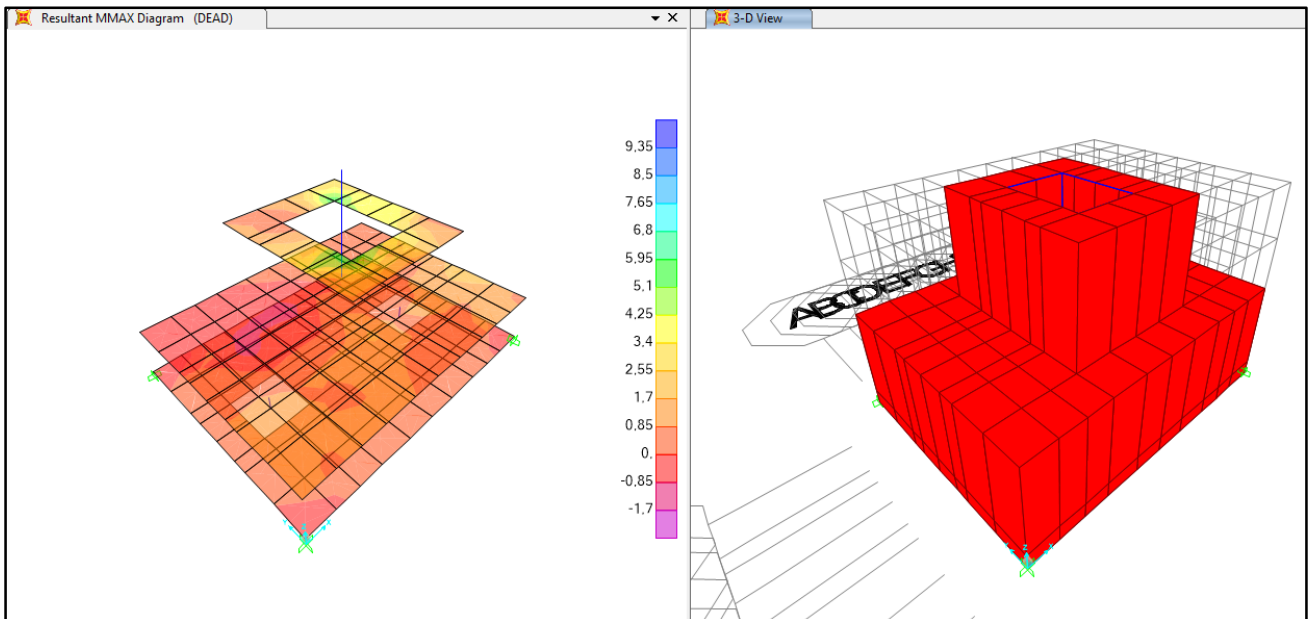


Figura 26. Resultados del modelado en SAP2000 de la zapata calculada con vista en 3D. Fuente del autor.

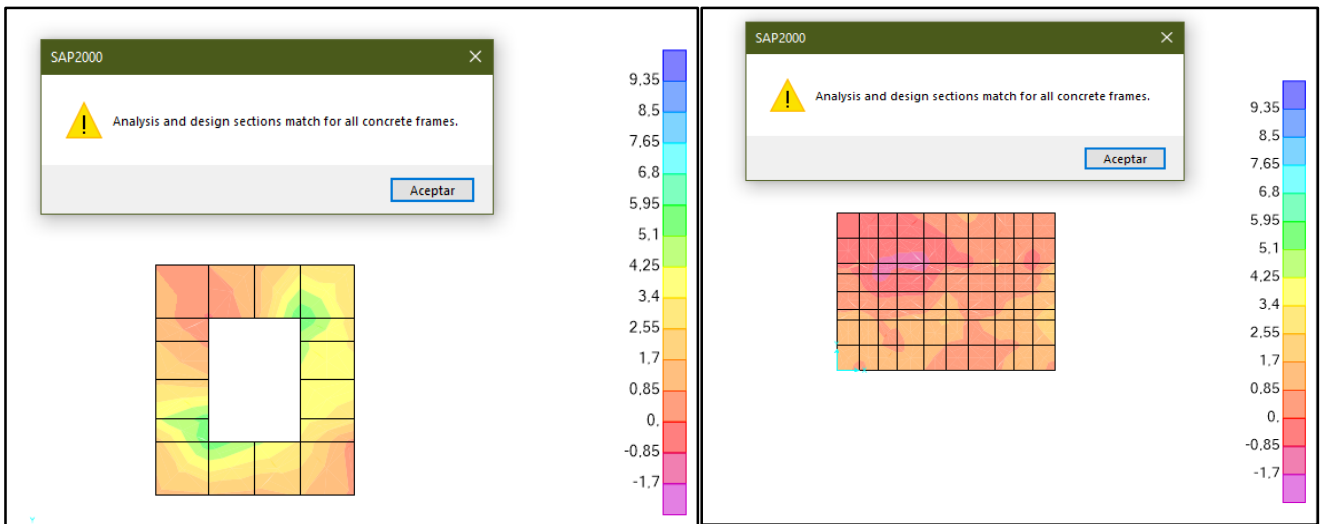


Figura 27. Resultados del modelado en SAP2000 de la zapata calculada con vista en planta. Fuente del autor.

3.4. Análisis de Costos

A continuación, en la Tabla 9 se presenta el volumen total de hormigón y grout a utilizar en la zapata calculada; luego en la Tabla 10 se calcula en kg el total de varillas de acero requerido; para por último, en la Tabla 11, obtener el costo total de la zapata tipo candelero calculada.

VOLUMEN TOTAL DE LA ZAPATA TIPO CANDELERO (m^3)					
Elemento	Largo	Ancho	Altura	Cantidad	Volumen
Base	2,20	2,90	1,00	1,00	6,38
Paredes	1,50	1,30	1,20	1,00	2,34
Columna	0,60	0,80	1,20	1,00	0,58
Pilotes	0,50	0,50	0,30	2,00	0,15
Grout	0,75	0,05	1,20	4,00	0,18
Volumen Total de la zapata=					7,81

Tabla 9. Volumen total de hormigón a utilizar en la zapata tipo candelero. Fuente del autor.

PLANILLA DE ACERO DE ZAPATAS TIPO CANDELERO											
Descripcion Ømm	Cantidad	Dimensiones (m)					Longitu (m)		Peso		Observaciones
		a	b	c	d	e	Unitario	Total	Unitario (Kg/m)	Total (Kg)	
25	14	2,80	0,50	0,50	0,00	0,00	3,80	53,20	3,853	204,98	Acero Inferior
18	14	2,75	0,30	0,30	0,00	0,00	3,35	46,90	1,998	93,71	Acero Superior
18	38	2,10	0,30	0,30	0,00	0,00	2,70	102,60	1,998	204,99	Acero Mínimo
10	8	2,73	0,00	0,00	0,00	0,00	2,73	21,86	0,617	13,49	Acero por Temperatura
10	10	2,06	0,00	0,00	0,00	0,00	2,06	20,64	0,617	12,73	
16	30	1,87	1,89	0,20	0,45	0,45	4,86	145,86	1,578	230,17	Acero de la Pared del Candelero
10	13	1,17	1,17	1,37	1,37	0,00	5,07	65,93	0,617	40,68	
10	13	0,85	0,85	1,21	1,21	0,00	4,12	53,62	0,617	33,08	
10	35	0,71	0,08	0,08	0,00	0,00	0,86	30,00	0,617	18,51	Ganchos
PESO DE ACERO EN LA ZAPATA (Kg)=										852,34	Total

Tabla 10. Planilla de acero de la zapata tipo candelero. Fuente del autor.

COSTO DE LA ZAPATA TIPO CANDELERO				
Material	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Hormigón Zapata	m^3	7,81	\$ 322,43	\$ 2.519,47
Acero	kg	852,34	\$ 2,04	\$ 1.738,77
Grout	m^3	0,18	\$ 1.085,70	\$ 195,43
COSTO TOTAL=				\$ 4.453,67

Tabla 11. Costo total de la zapata tipo candelero. Fuente del autor.

CAPÍTULO 4: CONEXIÓN CON BARRAS DE PROYECCIÓN

4.1.Fundamentación Teórica

Para que una conexión entre elementos prefabricados de hormigón sea segura, esta debe de cumplir que se comporte como un nudo fuerte y rígido haciendo que sea dúctil en un rango plástico. La conexión en ninguna circunstancia debe fallar, ya que si los elementos estructurales llegasen a desprenderse de la junta al recibir cargas ya sean de impacto, cíclicas o repetitivas; la estructura tenderá a colapsar y a desplazarse (Corres Peiretti, 2015).

Existen dos tipos de falla de conexión entre componentes estructurales de hormigón: falla por arrancamiento (pull-out) y por desgarramiento (splitting). La falla por arrancamiento consiste el desprendimiento de la varilla de refuerzo en la conexión, generando un área de corte y por ende el fallo de la interface. Esto se da netamente por la resistencia que posee el hormigón y la rugosidad de la varilla de refuerzo en una conexión, capaz de desarrollar un coeficiente de hormigón-varilla evitando su desprendimiento (Durán, 2017).

Por otro lado la falla por desgarramiento se da por fisuras longitudinales ocasionadas por poco recubrimiento de las varillas. A darse esta situación, hay menor área de resistencia del hormigón ante el estrés que se da por el rozamiento una varilla de refuerzo, cuando la estructura en la que se encuentra es sometida a cargas tanto estructurales como sísmicas (Durán, 2017).

Al fisurarse el hormigón, se pierde la adherencia hormigón-varilla produciendo también una falla por arrancamiento. Para comprobar que una conexión entre elementos prefabricados de hormigón sea segura, se ha planteado

una fórmula para que no se generen fallas por arrancamiento ni desprendimiento en un tipo de conexión llamada “Conexión con barras de proyección”.

Como se mencionó con anterioridad, esta conexión consiste en una unión monolítica en donde el acero de refuerzo sobresale de un elemento estructural, permitiendo que este se inserte en otro elemento con una longitud de empotramiento adecuada (Penagos Congote, 2017).

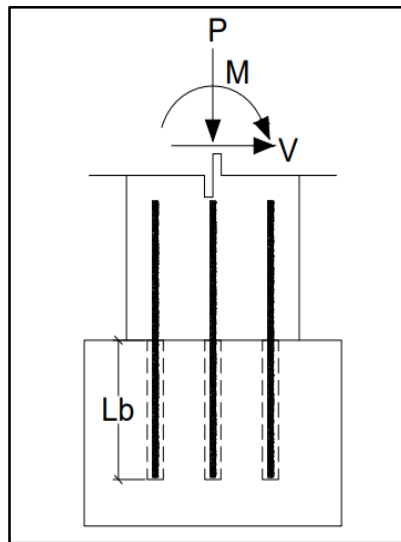


Figura 28. Longitud de empotramiento en la conexión con barras de proyección.

Fuente del autor.

Entonces dicha fórmula se plantea de manera en que se pueda calcular una longitud de empotramiento óptima de una varilla de refuerzo para evitar un pull-out. En teoría, según Negro & Toniolo (2012), la fórmula para calcular la longitud de empotramiento de la varilla de refuerzo (que sobresale de un elemento estructural prefabricado, y que va anclada a otro elemento estructural mediante ductos corrugados embebidos con mortero tipo grout) es la siguiente:

$$l_b * \mu * f_{bd} \geq \gamma_R * A_s * f_{ym}$$

En donde:

$$f_{bd} = 0.45 * f'c$$

$$f_{ym} = 1.08 * f_{yk}$$

Descripción:

l_b : longitud de anclaje de la varilla de acero

u : perímetro de la varilla

f_{bd} : fuerza de adherencia definitiva

$f'c_g$: resistencia a la compresión del mortero

A_s : area de la sección de la varilla de acero

f_{ym} : fluencia media de la varilla de acero

f_{yk} : fluencia característica de la varilla de acero

El valor de γ_R está dado por las siguientes recomendaciones:

- $\gamma_R = 1.0$ para conexiones DMI
- $\gamma_R = 1.2$ para conexiones DMO
- $\gamma_R = 1.5$ para conexiones DES

La Norma Colombiana Sismo Resistente (NSR-10) última versión realizada en el 2010, establece los grados de disipación de energía según el grado de amenaza sísmica que posee la zona en la que se va a elaborar un proyecto de construcción.

El sistema DMI es para lugares en donde hay capacidad de disipación de energía mínima y una zona de amenaza sísmica baja, DMO para capacidad de disipación de energía moderada y una zona de amenaza sísmica media y DES para

capacidad de disipación de energía especial y una zona de amenaza sísmica alta (NSR, 2010).

4.2. Discusión de la teoría

Para que la longitud de empotramiento de la varilla sea la adecuada con el fin de que la conexión entre elementos prefabricados de hormigón sea fuerte, segura y resistente; esta debe depender de que la fuerza resistente de adherencia hormigón-varilla [F_R] sea mayor a la fuerza de fluencia o resistencia última de la varilla de anclaje [F_V].

$$F_R > F_V$$

La fuerza de adherencia hormigón (que en este caso es tipo grout que va embebido en los tubos corrugados que contiene el componente estructural a ser anclado) con varilla [F_R], se obtiene de la resistencia a la compresión del mortero [$f'c_g$], por el área de contacto del grout con la varilla, que es el perímetro de la sección de la varilla [u], por la longitud de empotramiento de dicho refuerzo [l_b]; y por un coeficiente de fricción estático que determina la adherencia entre los dos materiales.

$$F_R = f'c_g * \mu * l_b * 0.45$$

Según el cálculo analítico de Negro & Toniolo (2012) el coeficiente de fricción estático entre hormigón y varilla es de 0.45; pero para mayor seguridad el autor recomendará utilizar 0.30.

$$F_R = f'c_g * \mu * l_b * 0.30$$

La fuerza de resistencia última de la varilla de acero [F_V] se obtiene de la multiplicación del área de la sección de la varilla [A_s], por el esfuerzo último [f_u].

$$F_V = A_s * f_u$$

Para hallar el esfuerzo de una varilla de acero [f_u], se multiplica la fluencia característica o mínima [f_{y_k}], por un factor de mayoración de 1.08, según Negro & Toniolo (2012), para llegar a la fluencia media [f_{y_m}] y por el factor [γ_R] utilizado para sistemas de conexiones DES de alto grado de sismicidad para mayor seguridad.

$$f_u = f_{y_m} * \gamma_R$$

$$f_u = f_{y_k} * 1.08 * \gamma_R$$

Como en las especificaciones técnicas de las varillas de acero, provenientes de la firma Novacero en Ecuador, se detalla que, la fluencia mínima de la varilla es de $4200\text{kg}/\text{cm}^2$ y la máxima es de $5400\text{kg}/\text{cm}^2$, se determinó que la fluencia media es de $4800\text{kg}/\text{cm}^2$ haciendo que el factor de mayoración de la fluencia característica para llegar a la fluencia media es de 1.14 resultado de dividir los $4800\text{kg}/\text{cm}^2$ para la fluencia mínima $f_{y_k} = 4200\text{kg}/\text{cm}^2$.

$$f_u = f_{y_k} * 1.14 * \gamma_R$$

Como la fluencia de la varilla puede variar desde $4200\text{kg}/\text{cm}^2$ hasta $5400\text{kg}/\text{cm}^2$ el autor, para mayor seguridad en el cálculo analítico, decidió no utilizar el factor de mayoración para llegar a la fluencia media, sino para llegar a la fluencia máxima. Con esta aclaración, al dividir la fluencia máxima de $5400\text{kg}/\text{cm}^2$ para $f_{y_k} = 4200\text{kg}/\text{cm}^2$ se obtiene un factor de mayoración de 1.29 redondeado a 1.3.

$$f_u = f_{y_k} * 1.3 * \gamma_R$$

Calculado el esfuerzo último de una varilla de acero [f_u], la fuerza de resistencia última [F_V] queda de la siguiente manera:

$$F_V = A_s * f_{y_k} * 1.3 * \gamma_R$$

Ya analizado el comportamiento de la conexión con barras de proyección se procede a desglosar la fórmula para calcular, en teoría la longitud de empotramiento de la varilla de acero en la junta de la siguiente manera:

$$F_R > F_V$$

$$f'c_g * \mu * l_b * 0.30 > A_s * f_{y_k} * 1.3 * \gamma_R$$

$$f'c_g * (\pi * \phi_b) * l_b * 0.30 > \left(\frac{\pi * \phi_b^2}{4}\right) * f_{y_k} * 1.3 * \gamma_R$$

$$l_b > \frac{1.3 * \gamma_R * f_{y_k} * \phi_b}{4 * 0.30 * f'c_g}$$

Descripción:

l_b : longitud de anclaje de la varilla de acero

f_{y_k} : fluencia característica de la varilla de acero = 4200kg/cm²

ϕ_b : diámetro de la varilla de acero

$f'c_g$: resistencia a la compresión del mortero

$\gamma_R = 1.5$ para conexiones DES

1.3 = Factor de fluencia máxima

0.30 = Coeficiente de fricción estático.

Entonces reduciendo la fórmula a su mínima expresión, dicha ecuación final en teoría para calcular la longitud de anclaje de la varilla de acero es la siguiente:

$$l_b > \frac{6825 * \phi_b}{f'c_g}$$

A partir de esta expresión se deduce que:

- A mayor diámetro de la varilla (ϕ_b), mayor es la longitud de empotramiento (l_b) requerida.
- A mayor resistencia ($f'c_g$), menor es la longitud de empotramiento (l_b) requerida.

4.3. Ensayo Experimental

4.3.1. Planteamiento del Experimento

Se planteó un ensayo experimental de esta conexión en el laboratorio del Centro de Investigación en Estructuras (CEINVES) ubicado en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (UCSG). Este experimento fue financiado por la empresa Mavisa S.A. y fue planteado de la siguiente manera:

Este modelo de ensayo escogido consta de un bloque de hormigón como se muestra en la Fig.29. Dentro del bloque se ubica un ducto de 7.5mm de diámetro que permitirá verter el grout dentro de él e insertar la varilla de acero. Luego, mediante una máquina de ensayo Controls C810/CZ, se ingresará el bloque dentro de ella simulando su empotramiento, y la varilla será sometida a una carga de tensión provocando estrés a la conexión. Las secciones del bloque deben ser de (40cm x 40cm x 50cm) ya que con esas medidas entra perfectamente en la máquina de ensayo.

Para este ensayo experimental se decidió utilizar una varilla de 25mm marca Novacero y se estimó utilizar un mortero tipo grout con un $f'c = 500kg/cm^2$. Entonces se procede a calcular la longitud de empotramiento de la varilla con la fórmula ya establecida en teoría.

$$l_b > \frac{6825 * \phi_b}{f'c}$$

$$l_b > \frac{6825 * 2.5(cm)}{500(kg/cm^2)}$$

$$l_b > 34.13cm$$

Como la longitud de anclaje de la varilla debe de ser mayor a 34.13cm. Se decidió ensayar la conexión con una longitud de empotramiento de **35cm**.

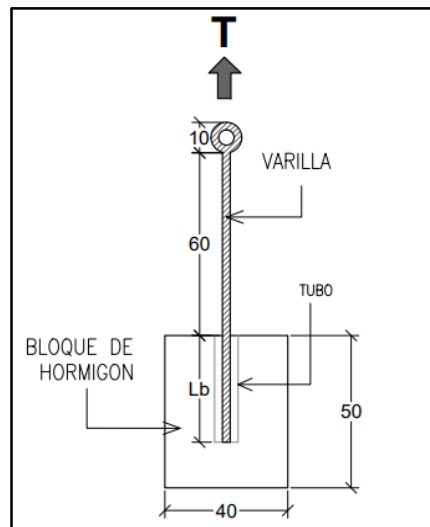


Figura 29. Modelo de ensayo experimental del tipo de conexión con Barras de Proyección. Fuente del autor.

4.3.2. Diseño del Experimento

Ya calculada la longitud de empotramiento de la varilla de anclaje, se planteó elaborar seis bloques de ensayo con las siguientes características: tres

bloques con la longitud de empotramiento calculada de 35cm y los demás tres con una longitud de 50cm. Estos se codificaron de manera en que los bloques tipo 1 poseen el ducto liso, los tipo 2 tienen el ducto con rugosidad dada cada 5cm (que es el que normalmente se utiliza en Mavisa S.A.), y los tipo 3 con rugosidad dada cada 2.5cm; es decir con doble rugosidad. Los bloques con la varilla empotrada a 35cm son los tipos A y los que poseen la varilla a 50cm son los tipos B.

Datos de cada bloque de ensayo			
Descripción	Tipo de tubo	Lb (cm)	ϕ_b (mm)
Tipo 1A	Liso	35	25
Tipo 1B	Liso	50	25
Tipo 2A	Con rugosidad c/ 5 cm	35	25
Tipo 2B	Con rugosidad c/ 5 cm	50	25
Tipo 3A	Con rugosidad c/ 2,5cm	35	25
Tipo 3B	Con rugosidad c/ 2,5cm	50	25

Tabla 12. Codificación y datos de cada bloque de ensayo. Contiene la descripción de cada bloque, tipo de tubo, empotramiento de la varilla y diámetro. Fuente del autor.

Las características dadas de los seis modelos de ensayo se dieron por estrategia de autor. Al comparar la resistencia que aporta el tubo liso con el tubo corrugado y doblemente corrugado, se podrá comprobar la importancia de la rugosidad de los ductos para mayor seguridad de la conexión. A parte se puede hallar el coeficiente de fricción estático de un tubo liso con el hormigón que, de por sí, va a ser mucho menor al de un tubo corrugado; pero puede servir para calcular una longitud de anclaje en conexiones en donde, dado cualquier caso, no se le pueda dar rugosidad a la conexión.

Al emplear los ductos corrugados cada 5cm y cada 2.5cm se podrá diagnosticar si el coeficiente de fricción estático entre los ductos con dichas

rugosidades dadas y el hormigón de los bloques superan el coeficiente de fricción estático varilla-grout. Con esta aclaración se podrá comprobar si los ductos necesitarán mayor rugosidad o se encuentran en perfectas condiciones con ese tipo de rugosidad.

Por otro lado, se decidió ensayar con la longitud de anclaje de 35cm calculada con la fórmula en teoría. En caso de que de esa longitud de anclaje no se obtengan los resultados esperados, es decir, que la varilla no alcance su fluencia $[f_y]$ o esfuerzo último $[f_u]$; también se ensaya con una longitud de anclaje de 50cm, es decir con toda la profundidad del bloque para posiblemente los resultados esperados. A continuación en las Figuras 30, 31, 32, 33, 34 y 35; se ilustra cada bloque de ensayo con sus respectivas características.

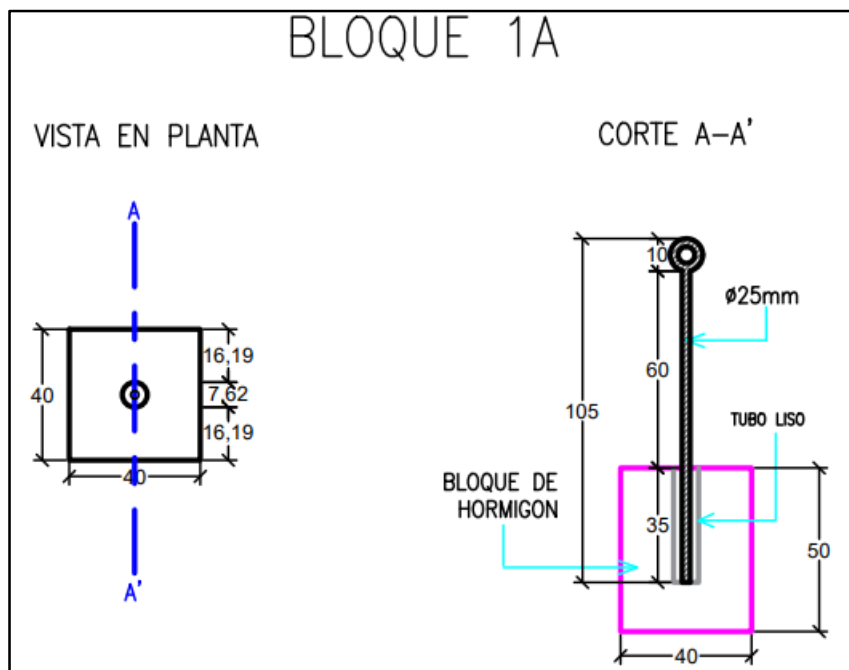


Figura 30. BLOQUE 1A. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 35cm; tubo liso. Fuente del autor.

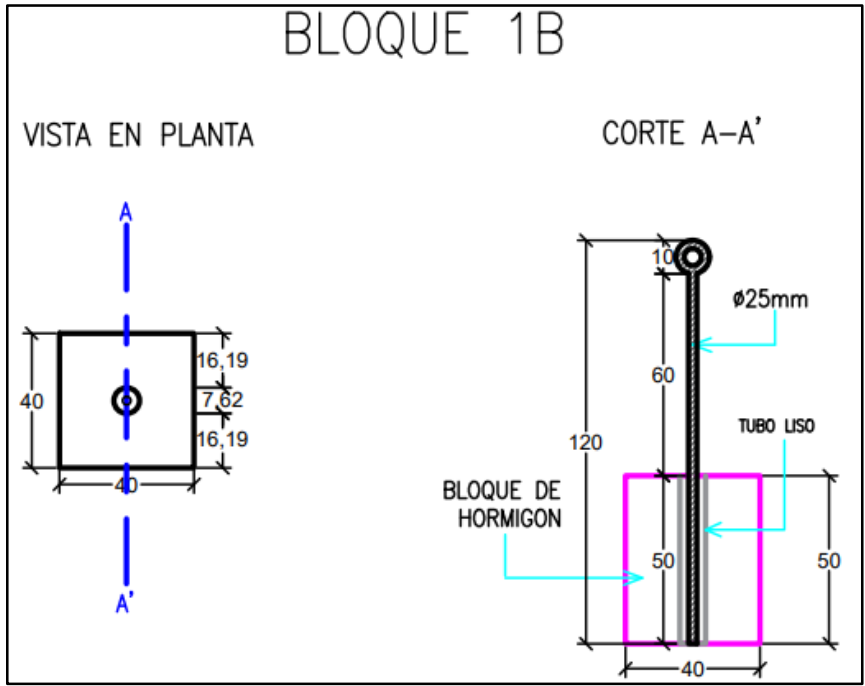


Figura 31. BLOQUE 1B. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 50cm; tubo liso. Fuente del autor.

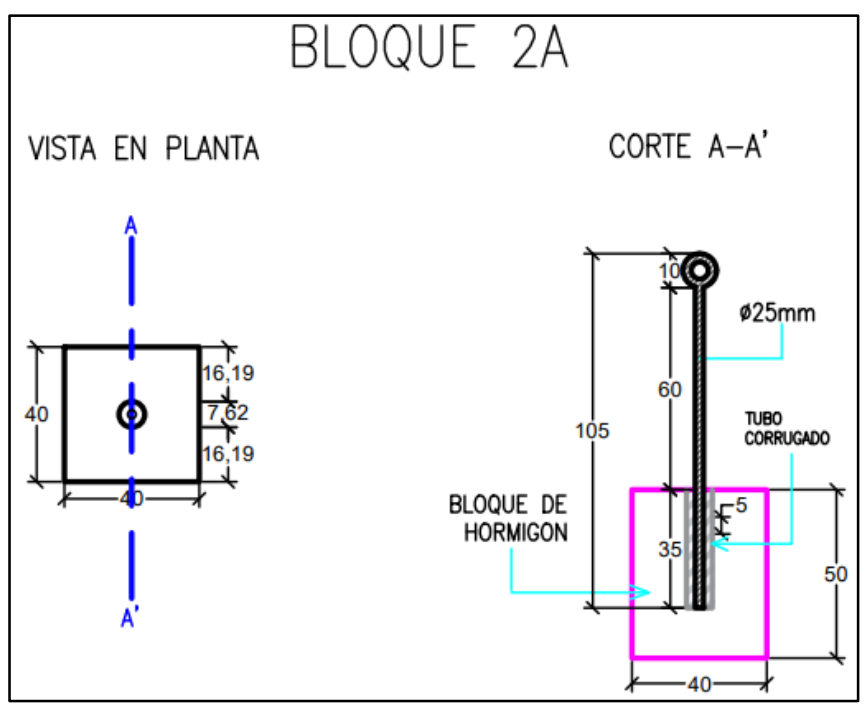


Figura 32. BLOQUE 2A. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 35cm; tubo corrugado c/5cm. Fuente del autor.

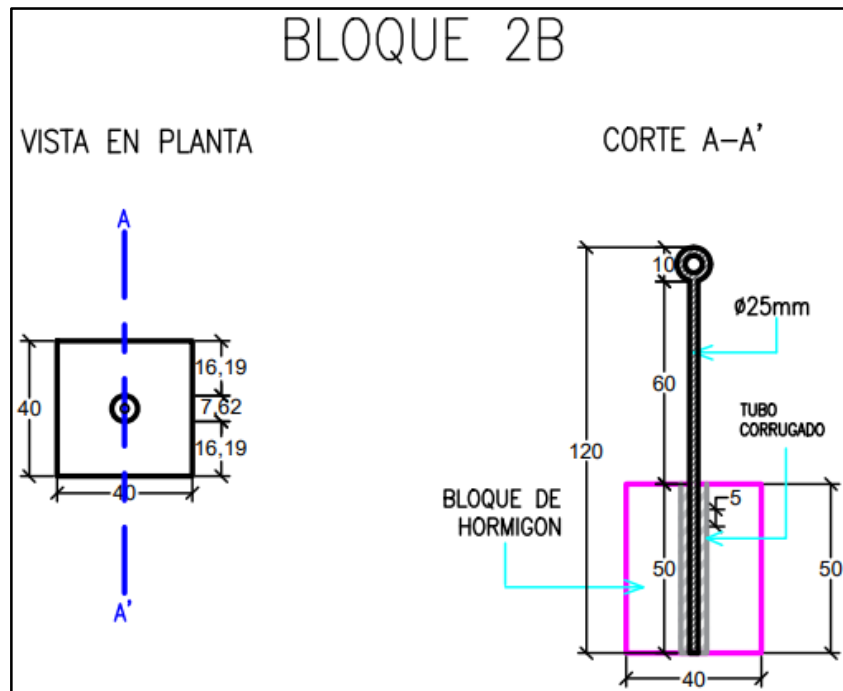


Figura 33. BLOQUE 2B. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 50cm; tubo corrugado $c/5$ cm. Fuente del autor.

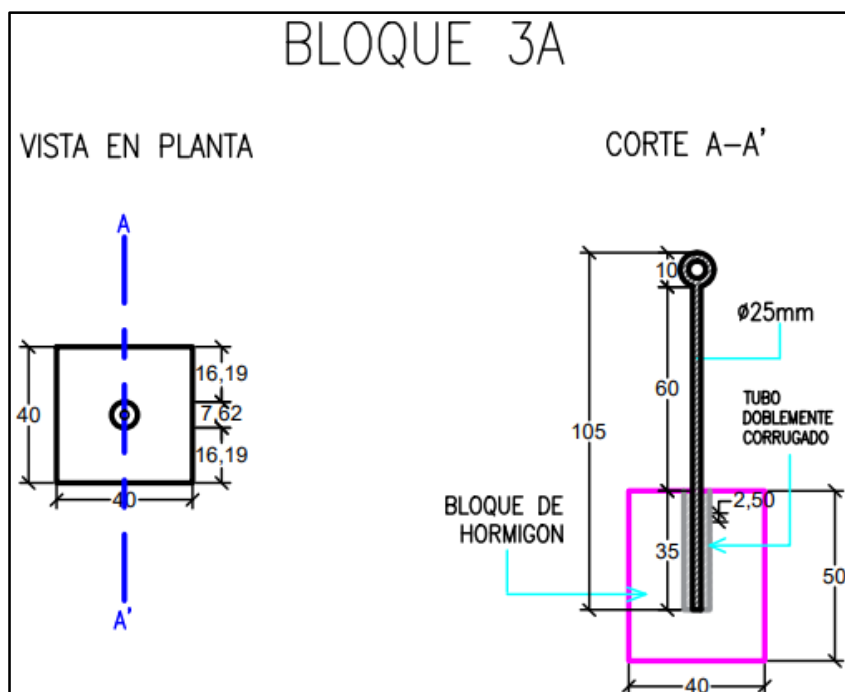


Figura 34. BLOQUE 3A. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 35cm; tubo corrugado $c/2.5$ cm. Fuente del autor.

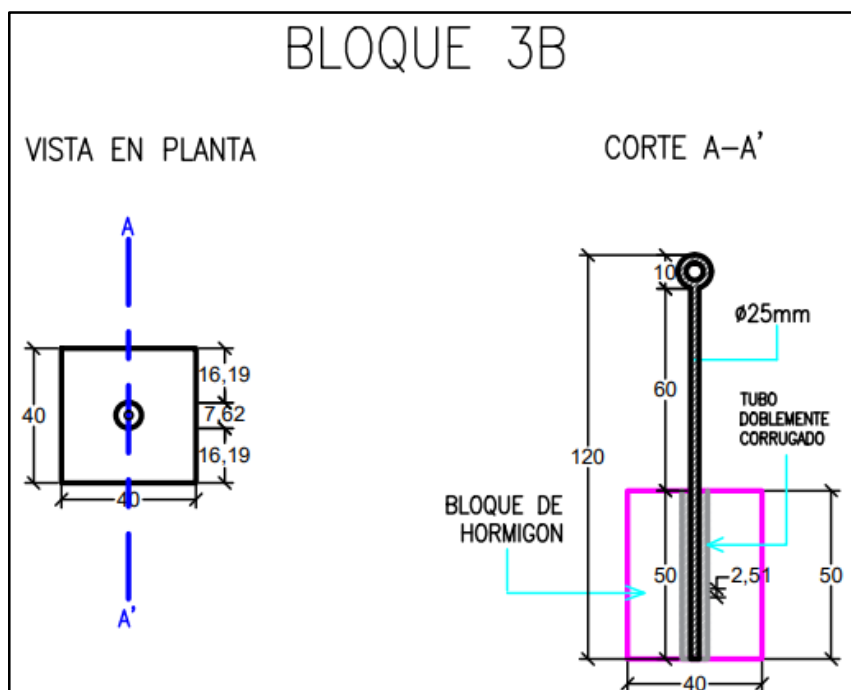


Figura 35. BLOQUE 3B. Diámetro de la varilla = 25mm; longitud de empotramiento = 50cm; tubo corrugado c/2.5cm. Fuente del autor.

4.3.3. Hipótesis

Para comprobar que este tipo de conexión es fuerte, esta debe comportarse de tal manera en que la fuerza resistente de la conexión [F_R] debe ser mayor a la fuerza de fluencia o resistencia última de la varilla de acero [F_V]. Vale decir que para que la conexión con barras de proyección sea segura, en ningún momento esta debe fallar, ya sea por agrietamiento o desprendimiento de la varilla de acero de cualquier estructura de hormigón antes de su fluencia [f_y]. Entonces al someter la varilla empotrada en el bloque a una carga de tensión con la máquina de ensayo Controls C810/CZ, pueden darse los siguientes sucesos:

- 1) Fluencia de la varilla de acero.
- 2) Falla total de la varilla de acero.

- 3) Desprendimiento de la varilla de acero.
- 4) Desprendimiento del ducto junto con la varilla de acero y el grout.
- 5) Agrietamiento del grout dentro del ducto.
- 6) Agrietamiento del bloque de hormigón.

Al cumplirse los ítems 1 o 2 la conexión con barras de acero de continuidad es segura ante cargas estructurales y cumple con los requerimientos de diseño. En cambio al cumplirse uno de los ítems 3, 4, 5 y 6, la longitud de empotramiento de la varilla no es la adecuada y habría que hacer un re-diseño de la conexión para que se pueda usar de forma segura en futuras edificaciones.

4.3.4. *Materiales a utilizar*

- 1) Ductos de acero de 7.5mm de diámetro con las siguientes características:
 - 2 Lisos (L=35 y 50cm).
 - 2 Con rugosidad cada 5cm (L=35 y 50cm).
 - 2 Con rugosidad cada 2.5cm (L=35 y 50cm).
- 2) Varillas de refuerzo para el armado de los bloques de ensayo. Para cada bloque se requirió:
 - 8 ϕ 12mm como refuerzo longitudinal.
 - Estribos ϕ 10mm c/10cm.
- 3) Para los bloques se requiere aproximadamente 0.5 m³ de hormigón de alta resistencia cuya mezcla utilizada por la empresa Mavisa S.A. es la siguiente:
 - **Cemento:** Tipo HE. Proveedor: Holcim Ecuador S.A.
 - **Agua:** Potable.

- **Relación a/c:** 0.30-0.31.
- **Agregado fino:** Arena lavada/tamizada. Proveedor: Sr. Peralta.
- **Agregado grueso:** Piedra azul $\frac{3}{4}$ ". Proveedor: Canteras sector Daule.

4) Varillas de anclaje \varnothing 25mm suministradas por la empresa Novacero.

- Para los bloques tipo A, L=60cm + 35cm.
- Para los bloques tipo A, L=60cm + 50cm.



Figura 36. Varilla de empotramiento \varnothing 25mm. Fuente del autor.

En la Tabla 13, se muestran las especificaciones técnicas de las varillas del proveedor Novacero, dando a conocer el rango de fluencia [f_y] de las varillas de acero que va desde 4200 kg/cm^2 hasta 5400 kg/cm^2 ; y también indica la resistencia a la tracción [f_u] mínima que es el valor de 5500 kg/cm^2 . Estos esfuerzos mencionados se encuentran ilustrados en la gráfico 4.

PROPIEDADES		UNIDADES	VALOR
Límite de Fluencia (Fy)	Min	MPa (kgf/cm ²)	420 (4200)
	Max	MPa (kgf/cm ²)	540 (5400)
Resistencia a la Tracción (Fu)	Min	MPa (kgf/cm ²)	550 (5500)
Alargamiento mínimo en L ₀ =200 mm	d ≤ 20	%	14
	22 ≤ d ≤ 36		12
	d > 40		10
(Fu' / Fy' ≥ 1.25)		La resistencia a la tracción real debe ser igual o mayor a 1,25 veces el límite de fluencia real registrado en el ensayo de la probeta.	

Tabla 13. Especificaciones técnicas varillas Novacero. Fuente (Novacero, 2017).

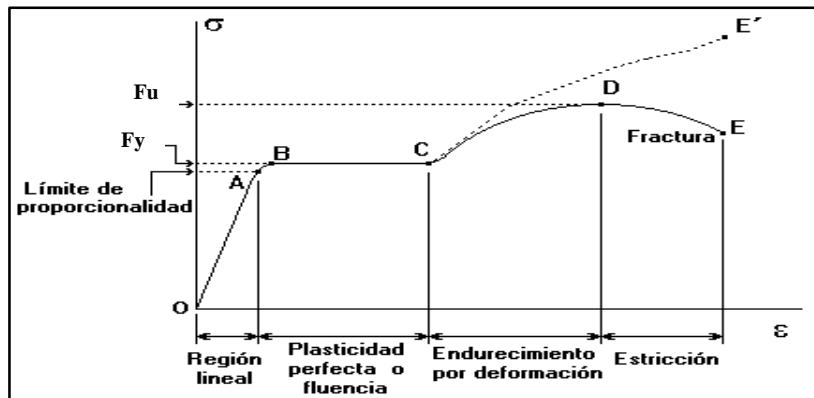


Gráfico 4. Curva de esfuerzo vs deformación de la varilla de acero.

- 5) Para los ductos se requiere aproximadamente 0.023m³ de grout cuya dosificación utilizada por la empresa Mavisa S.A.

Dosificación Grout Mavisa S.A.	
Descripción	Valor
Volumen (m ³)	0,0228
Cemento (kg)	33,06
Carbonato de calcio (kg)	1,32
Microsílice (kg)	1,32
Agua (litr)	11,94
Rheobuild (litr)	0,51

Tabla 14. Cantidad de cada material para dosificar el grout. Fuente del autor.

- 6) Cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura como se ilustra en las figuras 47 y 48.
- 6 cilindros para tomar las muestras de hormigón de los bloques.
 - 6 cilindros para tomar las muestras de grout de los ductos.
- 7) Máquina de ensayo a la compresión para obtener la resistencia de los cilindros tanto de hormigón como de grout.



Figura 37. Máquina de ensayo a la compresión del concreto. Fuente del autor.

- 8) Máquina de ensayo a tensión para varillas de acero Controls C810/CZ.



Figura 38. Máquina de ensayo a la tensión Controls C810/CZ. Fuente del autor y (Controls Group, 2015).

4.3.5. Procedimiento

- 1) *Selección y corte de ductos*: Una vez seleccionados los tubos a utilizar (2 completamente lisos, 2 corrugados c/5cm y corrugados c/2.5cm), se los corta a la medida en las que se va a empotrar la varilla de anclaje. Es decir 35cm y 50cm que fueron las medidas propuestas para este ensayo experimental.



Figura 39. Tipos de ductos de acero a utilizar para el ensayo experimental. Fuente del autor.

- 2) *Armado de los bloques de ensayo*: En la planta de hormigonados y pretensados perteneciente a la empresa Mavisa S.A., se elaboraron seis armados para los seis bloques de ensayo. Cada armado tenía 8 varillas $\varnothing 12\text{mm}$ como refuerzo longitudinal y 6 estribos $\varnothing 10\text{mm}$ con un recubrimiento de 5cm. Una vez ya elaborado el armado de cada bloque se procede a ubicar los respectivos moldes para cada uno y se colocan los ductos escogidos en el centro de cada armado.



Figura 40. Armado de los bloques de ensayo. Fuente del autor.

- 3) *Hormigonado de los bloques de ensayo*: Al hormigonar los cubos de ensayo, se le aplica el vibrado para que no queden espacios vacíos dentro de ellos y a parte se los enlucen de manera adecuada para que no quede rugoso en la parte superior y se vean estéticamente presentables. Luego del proceso de verter el hormigón a los bloques, se realiza el curado a dichos elementos con un producto especial llamado “Antisol”, proveniente de la empresa Sika, que sirve para evitar el agrietamiento de estructuras de hormigón expuestas al medio ambiente.

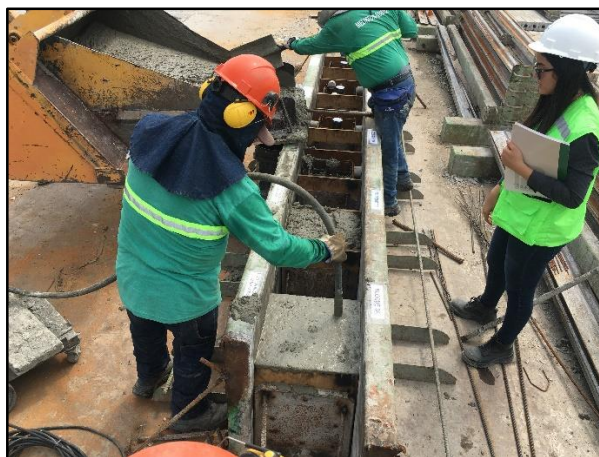


Figura 41. Hormigonado de bloques de ensayo. Fuente del autor.

- 4) *Obtención de testigos en cilindros*: mientras se realizaba el hormigonado de los bloques de ensayo, se tomaron muestras del concreto utilizado en forma de cilindros de 10cm de diámetro y 20cm de altura, para así después poder evaluar la resistencia a la compresión ($f'c$) de los elementos. Al elaborar los cilindros, se les hizo el martillado y varillado requerido, para sacar el aire del hormigón y evitar los espacios vacíos que después a la hora la rotura, puedan dar resultados erróneos.



Figura 42. Obtención de testigos del hormigón de los bloques en cilindros. Fuente del autor.

- 5) *Colocación de la varilla de empotramiento*: Una vez ya fraguado el hormigón de los cubos, se coloca en el centro de los ductos la varilla de anclaje de manera en que quede totalmente recta verticalmente.



Figura 43. Colocación de la varilla de empotramiento. Fuente del autor.

- 6) *Dosificación y elaboración del mortero tipo grout:* Antes de mezclar los ingredientes para la elaboración del mortero tipo grout, la cantidad de cada material fue calculada para el volumen de grout a utilizar en los tubos, y pesada en el laboratorio de control de calidad de Mavisa. Después en una mezcladora, se vertieron todos los ingredientes, generando un mortero fluido apto para ser introducido en los ductos.



Figura 44. Dosificación y elaboración del mortero tipo grout. Fuente del autor.

- 7) *Colocación del mortero tipo grout*: Se vertió de manera cautelosa el grout dentro de los ductos de manera en que no haya desperdicio del material.



Figura 45. Colocación del mortero tipo grout. Fuente del autor.

- 8) *Obtención de testigos para evaluar el $f'c$ del mortero*: Se realizó el mismo procedimiento de toma de muestras en cilindros que se hizo para el concreto de los bloques, con el mortero tipo grout.



Figura 46. Obtención de testigos del grout en cilindros. Fuente del autor.

- 9) *Ensayo de testigos del hormigón de los bloques*: Las muestras del concreto, que fue utilizado en los bloques, tomadas en forma de cilindros,

se sometieron a rotura para obtener la resistencia a la compresión (f'_c) a los 2, 7 y 14 días.

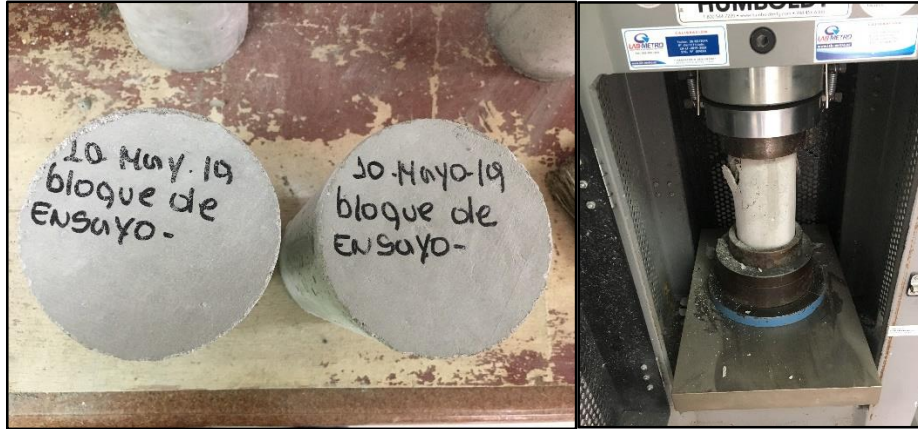


Figura 47. Rotura de cilindros de hormigón. Fuente del autor.

10) *Ensayo de testigos del mortero tipo grout*: Las muestras del grout, con el que fueron llenados los ductos de acero, al igual que los testigos del hormigón de los bloques, se sometieron a rotura para obtener la resistencia a la compresión (f'_c_g) a los 2, 7 y 14 días.



Figura 48. Rotura de cilindros de grout. Fuente del autor.



Figura 49. Foto de los especímenes en la planta de prefabricados Mavisa S.A. elaborados para los ensayos de extracción. Fuente del autor.

11) Ensayo en el laboratorio CEINVES: El día 31 de Mayo del año 2019, en el laboratorio CEINVES perteneciente a la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, se procedió a ensayar la efectividad de la conexión con barras de proyección de los 6 bloques, con ayuda de la máquina de ensayo Controls C810/CZ, sometiendo la varilla de anclaje a tensión; y permitiendo conocer el esfuerzo de fluencia de la varilla y la fuerza última de falla.



Figura 50. Foto del ensayo experimental realizado en el laboratorio de estructuras CEINVES. Fuente del autor.

4.4.Resultados

4.4.1. Curvas de Resistencia $f'c$

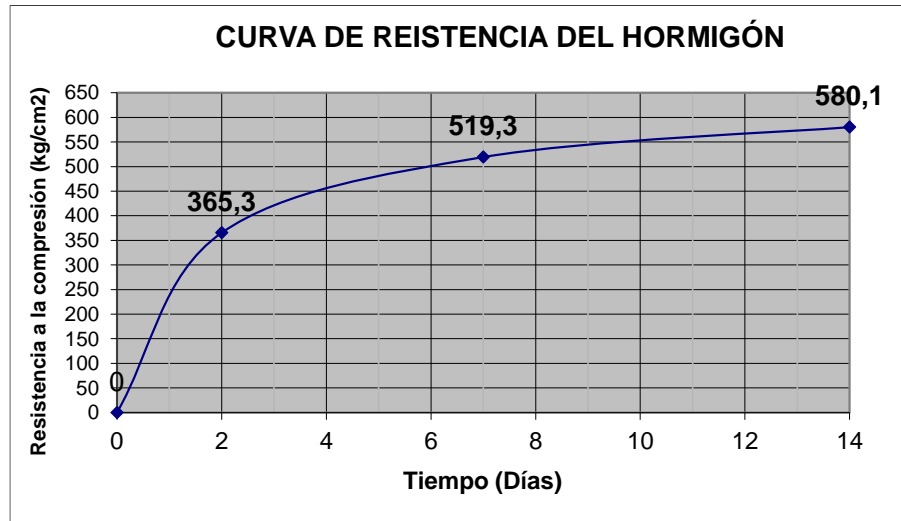


Gráfico 5. Curva de Resistencia de los testigos del hormigón utilizado en todos los bloques a los 2, 7 y 14 días. Fuente del autor.

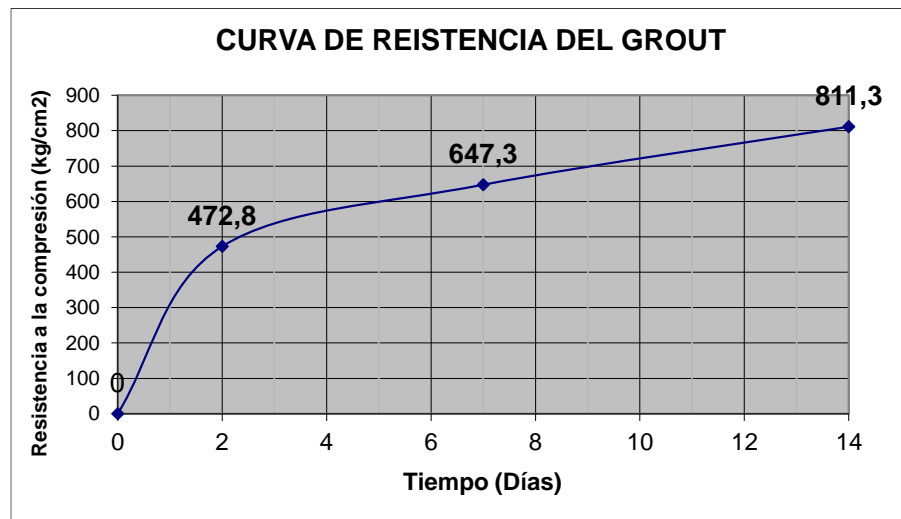


Gráfico 6. Curva de resistencia de los testigos del utilizado en todos los ductos de los bloques de ensayo a los 2,7 y 14 días. Fuente del autor.

Descripción	Tipo de tubo	f'c bloque (kg/cm ²)	F'c grout (kg/cm ²)	Lb (cm)	Ø _b (cm)
Tipo 1A	Liso	580,1	647,3	35	2,5
Tipo 1B	Liso	580,1	647,3	50	2,5
Tipo 2A	Con rugosidad c/ 5 cm	580,1	647,3	35	2,5
Tipo 2B	Con rugosidad c/ 5 cm	580,1	647,3	50	2,5
Tipo 3A	Con rugosidad c/ 2,5cm	580,1	647,3	35	2,5
Tipo 3B	Con rugosidad c/ 2,5cm	580,1	647,3	50	2,5

Tabla 15. Datos obtenidos el día del ensayo Pull-out test. Fuente del autor.

4.4.2. Resultados del Ensayo Experimental

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO PULL-OUT						
Longitud de empotramiento	35 cm			50 cm		
Rugosidad del ducto	Liso	Rugosidad c/5cm	Rugosidad c/2.5cm	Liso	Rugosidad c/5cm	Rugosidad c/2.5cm
Código de Ensayo	1A	2A	3A	1B	2B	3B
Resultado de fuerza de falla (Ton)	15,8	30,1	29,8	17,6	31,3	31,9
Esfuerzo de fluencia (kg/cm ²)	-	4883,3	4708,0	-	5021,0	4800,7
Porcentaje de esfuerzo de fluencia real sobre el mínimo requerido (4200)	-	116%	112%	-	120%	114%
Esfuerzo de falla (kg/cm ²)	3209,5	6134,3	6063,7	3591,7	6377,4	6504,1
Porcentaje de esfuerzo máximo sobre el mínimo requerido (5500)	58%	112%	110%	65%	116%	118%
Modo de falla	Desprendimiento del ducto junto con la varilla de acero y el grout.	Fluyó la varilla.	Fluyó la varilla.	Desprendimiento de la varilla de acero junto con el grout	Fluyó la varilla.	Fluyó la varilla y luego llegó a su rotura total
¿Cumple con la condición de adherencia a fluencia?	NO	SI	SI	NO	SI	SI
¿Cumple con la condición de adherencia a rotura?	NO	SI	SI	NO	SI	SI

Tabla 16. Resultados de fuerza de falla y modo de falla en el experimento Pull-out test. Fuente del autor.

4.5. Análisis de Resultados

4.5.1. Análisis del Ensayo Experimental

En la Tabla 5, se puede verificar que en los bloques que poseen rugosidades cada 2.5cm y 5cm (2A, 2B 3A, y 3B); la adherencia varilla-grout que generó los esfuerzos de falla en las conexiones fueron mayores al esfuerzo de fluencia nominal (4200 kg/cm^2) e incluso superaron el esfuerzo de rotura mínima (5500 kg/cm^2), resultando esta ser una conexión válida. Además, en el bloque 3B, cuya varilla tenía una longitud de empotramiento de 50cm, se dio una rotura de la varilla.

En los bloques Tipo 1, se pudo observar que hubo falla en la adherencia ducto-hormigón y grout-ducto; aunque se pudo comprobar que dicha adherencia de los hormigones con el ducto liso no es nula, debido a que hubo una fuerza significativa para que el tubo se deslice.

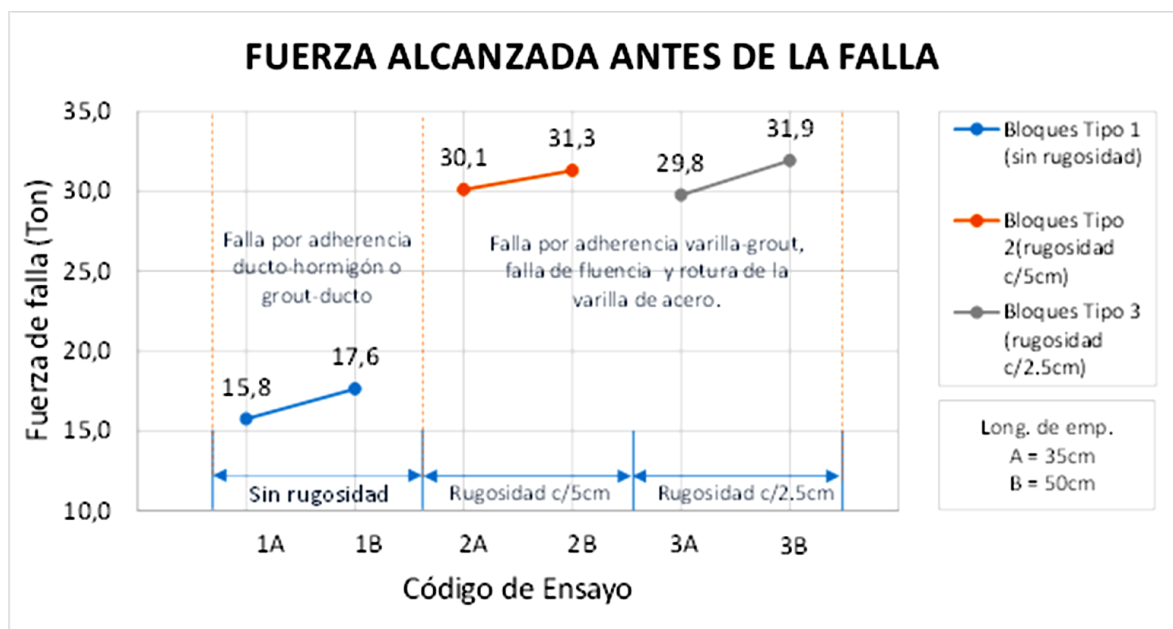


Gráfico 7. Fuerzas alcanzadas antes de la falla. Fuente del autor.

En el gráfico 7 se puede verificar que las fuerzas alcanzadas antes de la falla en los bloques tipo 2 y 3, es decir con los ductos con rugosidad $c/5\text{cm}$ y $c/2.5\text{cm}$, fueron similares. En cambio en los bloques tipo 1, que poseían los tubos lisos y sin rugosidad alguna, las fuerzas alcanzadas en ellos representaron un 50% (Tabla 17) de las alcanzadas en la conexión los bloques tipo 2 y 3.

Descripción	Relación
1A/2A	0,52
1A/3A	0,53
1B/2B	0,56
1B/3B	0,55
Promedio	0,54

Tabla 17. Relación de fuerzas de Falla entre los bloques tipo 1 con los bloques tipo 2 y 3. Fuente del autor.

Entonces para que las conexiones con ductos lisos se comporten de igual manera que los ductos corrugados, la longitud de empotramiento deberá ser el doble. Analizando el gráfico 4 de manera lineal se puede verificar que la relación de la fuerza de falla de los bloques Tipo 2, es de 1.04 y el de los bloques Tipo 3 es de 1.07. Tomando en cuenta estos valores, aparentemente al incrementar 15cm al empotramiento de la varilla, esta aumentará un 5% de su capacidad resistente dando un esfuerzo mayor.

4.5.2. Reformulación

En la Tabla 16 se puede apreciar que, en el bloque 3B hubo rompimiento de la varilla con un $F_u = 6504.1 \text{ kg/cm}^2$ teniendo una fluencia $F_y = 4800.7 \text{ kg/cm}^2$. Es decir que la varilla falló aproximadamente 1700 kg/cm^2 después de su fluencia. Ahora se puede apreciar que en los bloques 2A, 2B, 3A y

3B; la varilla alcanzó su fluencia aproximadamente con un $F_y = 4850 \text{ kg/cm}^2$ con lo cual se comprueba que el factor de mayoración para llegar a la fluencia media de la varilla es de 1.16 y para obtener la fluencia máxima es de 1.20.

En los bloques 1A, 1B, 2A, 2B y 3A; como hubo deslizamiento de la varilla antes de llegar a su fallo final. Mediante el esfuerzo F_s con el que se deslizó la varilla, se puede calcular un coeficiente de fricción estático.

$$l_b \geq \frac{\phi_b * F_s}{4 * (\mu_s * f'c_m)}$$

$$\mu_s = \frac{\phi_b * F_s}{4 * l_b * f'c_m}$$

Reemplazando el valor de F_s , según los resultados de los ensayos experimentales, en la fórmula, se pueden obtener los siguientes coeficientes de fricción estáticos:

Descripción	fs	ϕ_b	lb	f'c (grout)	μ_s
Tipo 1A	3591,7	2,5	35	647,3	0,10
Tipo 1B	3209,5	2,5	50	647,3	0,06
Tipo 2A	6134,3	2,5	35	647,3	0,17
Tipo 2B	6377,4	2,5	50	647,3	0,12
Tipo 3A	6063,7	2,5	35	647,3	0,17

Tabla 18. Cálculo del coeficiente de fricción estático [μ_s] de los diferentes ensayos de conexión. Fuente del autor.

En las conexiones tipo 2 y 3, es decir con tubo corrugado, se puede tomar en cuenta que el coeficiente de fricción se encuentra entre 0,12 y 0,17. En los bloques 2A y 3A, el valor de μ_s fue similar en comparación con el del tipo 2B en donde pudo haber ocurrido el evento del bloque 3B rompiéndose la varilla de anclaje. Entonces para este caso, el autor decidió obtener un promedio de los 3 coeficientes de fricción (μ_s) encontrados dando como resultado un valor de 0.15.

Con los resultados obtenidos de este ensayo experimental, la fórmula para calcular el empotramiento mínimo de la varilla queda de la siguiente manera:

$$l_{bmin} \geq \frac{\phi_b * fy_k}{4 * \mu_s * f'c_g}$$

En donde:

l_{bmin} = longitud de empotramiento mínimo de la varilla de acero

ϕ_b = Diámetro de la varilla

fy_k = Fluencia característica de la varilla igual a **4200 kg/cm²**

μ_s = Coeficiente de fricción estática varilla – mortero igual a **0.15**

$f'c_m$ = Resistencia a la compresión del mortero

Por ahora, en la fórmula hallada no se ha planteado con ningún factor de mayoración debido a que los ingenieros calculistas siempre realizan los diseños estructurales tomando en cuenta la fluencia característica (fy_k) de las varillas. Además cuando se calcula el número de varillas a utilizar en la conexión, éstas se hayan con un momento flector ya mayorado. Reemplazando los valores experimentales en la fórmula se obtiene:

$$l_{bmin} = \frac{\phi_b * 4200}{4 * 0.15 * f'c_g}$$

Reduciendo la fórmula a su mínima expresión, la longitud de empotramiento mínima y recomendada de la varilla de anclaje se calcula de la siguiente manera:

$$l_{bmin} = \frac{7000 * \phi_b}{f'c_g}$$

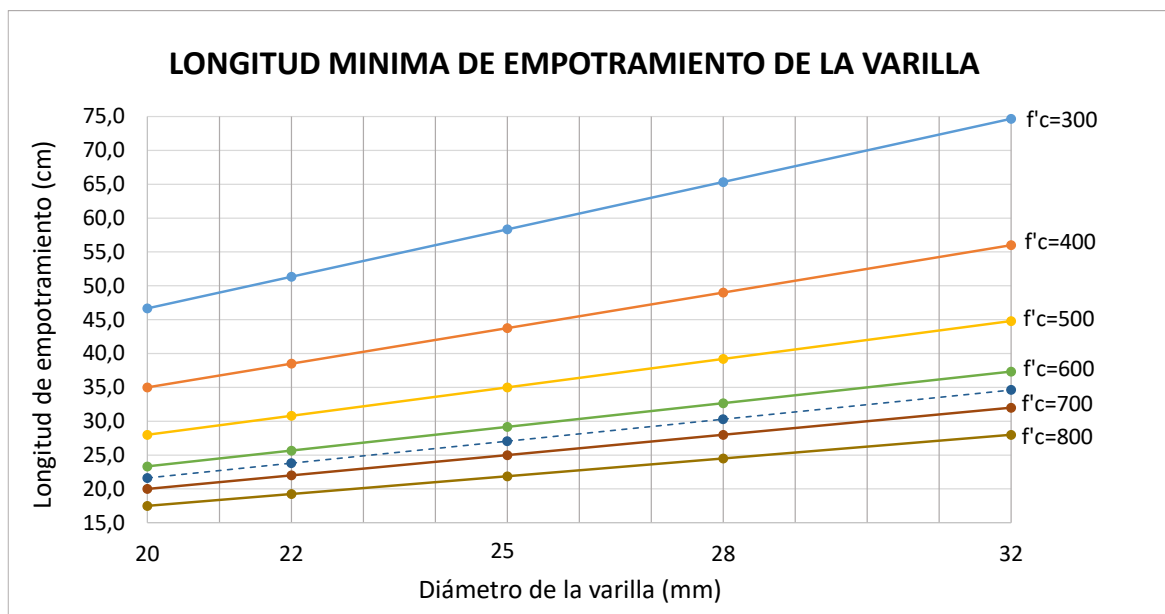


Gráfico 8. Longitud mínima de la varilla de empotramiento vs. El diámetro de la varilla en función con el $f'c_g$ del grout, utilizando ductos con rugosidad. Fuente del autor.

A pesar de que la fórmula dada posee un nivel apto de seguridad, debido a que por lo general la dosificación del grout se diseña de manera en que, esta llegue a una resistencia de diseño $f'c_g$ a los 7 días; pero irá incrementando al pasar las semanas haciendo que la conexión sea más fuerte.

Por otro lado, ya queda en el diseñador si se le añade un factor de seguridad de modo en que la conexión no solo resista el esfuerzo de fluencia característico (fy_k), sino un esfuerzo de fluencia máximo (fy) multiplicando la longitud de empotramiento mínima (l_{bmin}) por un factor de seguridad de 1.3. El factor de seguridad mencionado se puede utilizar en estructuras donde la amenaza sísmica sea considerable.

Por último, si se da el caso que la estructura es sumamente importante, se encuentra en una zona de alta amenaza sísmica, y se requiere ser más conservadores con el diseño, haciendo que la conexión resista un esfuerzo de rotura (f_u), se multiplica l_{bmin} por un factor de seguridad de 1.5. A continuación en la Tabla 19 se muestran las fórmulas para calcular la longitud de empotramiento de la varilla de anclaje, para la Conexión con Barras de Proyección, según los diferentes criterios de diseño.

Criterio de Diseño	Riesgo Sísmico	Longitud de Empotramiento
Liberal	Medio	$l_b \geq l_{bmin}$
Medio	Alto	$l_b \geq 1.3 * l_{bmin}$
Conservador	Alto	$l_b \geq 1.5 * l_{bmin}$

Tabla 19. Longitud de empotramiento de la varilla de anclaje. El factor de seguridad está dado con respecto a su caso y nivel de riesgo sísmico. Fuente del autor.

4.6. Modelado en SAP2000

Para complementar el estudio de la conexión con barras de proyección, se realizó un modelado de elementos finitos con componentes tipo Shell del bloque tipo 1 con ayuda del programa SAP2000, en donde se simuló el empotramiento de una varilla de 25mm de diámetro, a una profundidad de 35cm, junto al ducto que contiene el mortero tipo grout, y el hormigón del utilizado en el bloque. Se le aplicó una carga “P” hacia arriba de 21 Ton, haciendo referencia a la fuerza que requiere la varilla para llegar a su esfuerzo de fluencia de 4200 kg/cm^2 . El modelado (ilustrado en la figura 51) en el programa SAP2000 demostró que la conexión es segura.

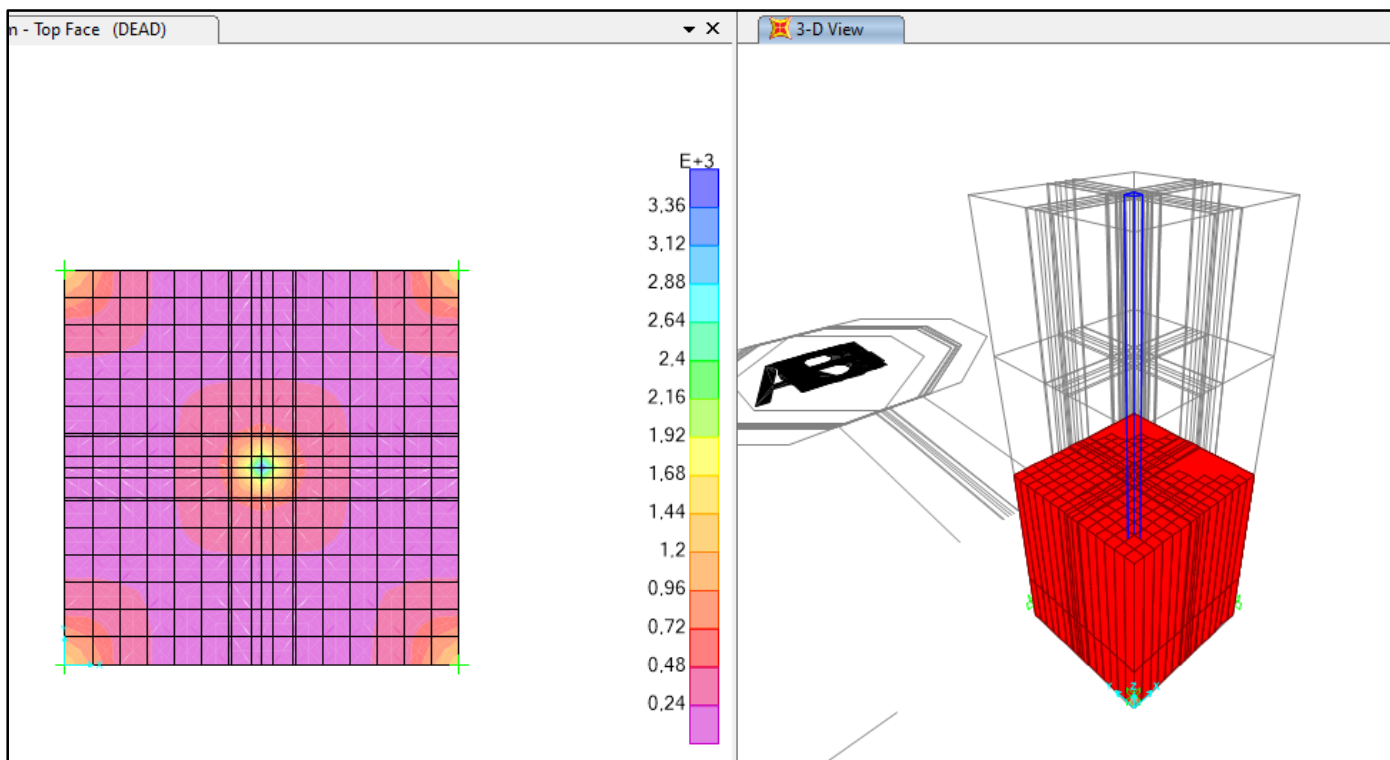


Figura 51. Modelado de elementos finitos de un bloque de ensayo en el programa SAP2000. Fuente del autor.

4.7. Aplicación

Complementando el estudio de la conexión columna-zapata con barras de proyección, se ha decidido analizar este método de anclaje de la zapata ya calculada, para la cimentación del Centro Comercial Bambú Park. Esta vez ya no se utilizan las paredes del candelero, sino que se procede con el cálculo del diámetro y número de varillas de anclaje a utilizar para realizar la conexión.

Dado este caso se utilizan los siguientes datos:

Datos		
Descripción	Valor	Unidades
Mu=	66	Ton-m
∅ =	0,9	
b=	80	cm
d=	55	cm
f'c=	350	kg/cm2
fy=	4200	kg/cm2

Tabla 20. Datos requeridos para calcular el diámetro y número de varillas de conexión. Fuente del autor.

Para hallar el acero requerido (A_s) en la parte en la conexión con barras de proyección columna-zapata calculada, se tiene la siguiente fórmula:

$$A_s = \frac{Mux}{\emptyset * fy * \left(d - \frac{a}{2}\right)}$$

Y en donde:

$$a = \frac{A_s * fy}{0.85 * f'c * b}$$

Al iterar estas dos ecuaciones se obtiene que:

$a_{asumido}$ (cm)	A_s calculado (cm ²)	$a_{calculado}$ (cm)
30,00	43,54	5,38
5,38	33,29	4,11
4,11	32,90	4,06
4,06	32,88	4,06
4,06	32,88	4,06

Tabla 21. Método de iteraciones para hallar los valores de “ A_s ” y “ a ”. Fuente del autor.

Con un $A_s = 32.88\text{cm}^2$ requerido para la conexión con barras de proyección se debe:

Usar 8 varillas $\phi 25\text{mm}$

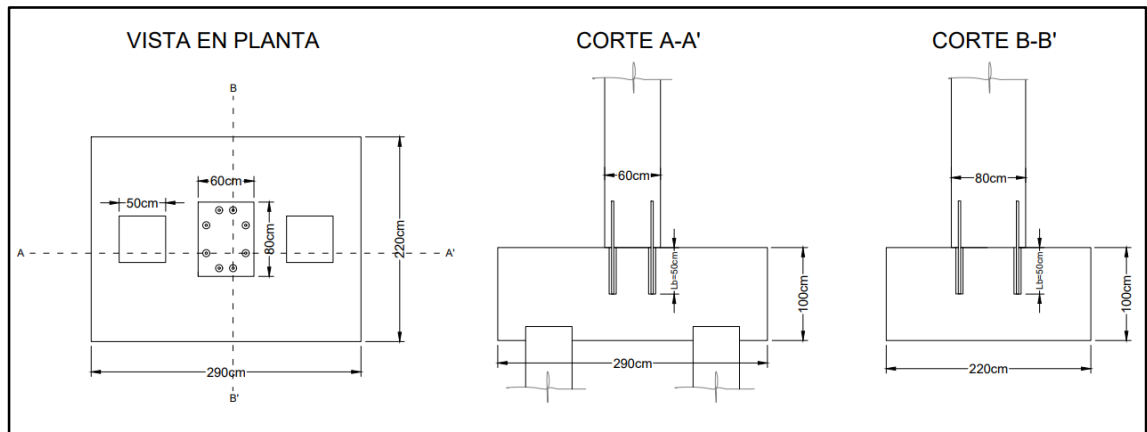


Figura 52. Vista en planta y frontal del dimensionamiento de la zapata. Fuente del autor.

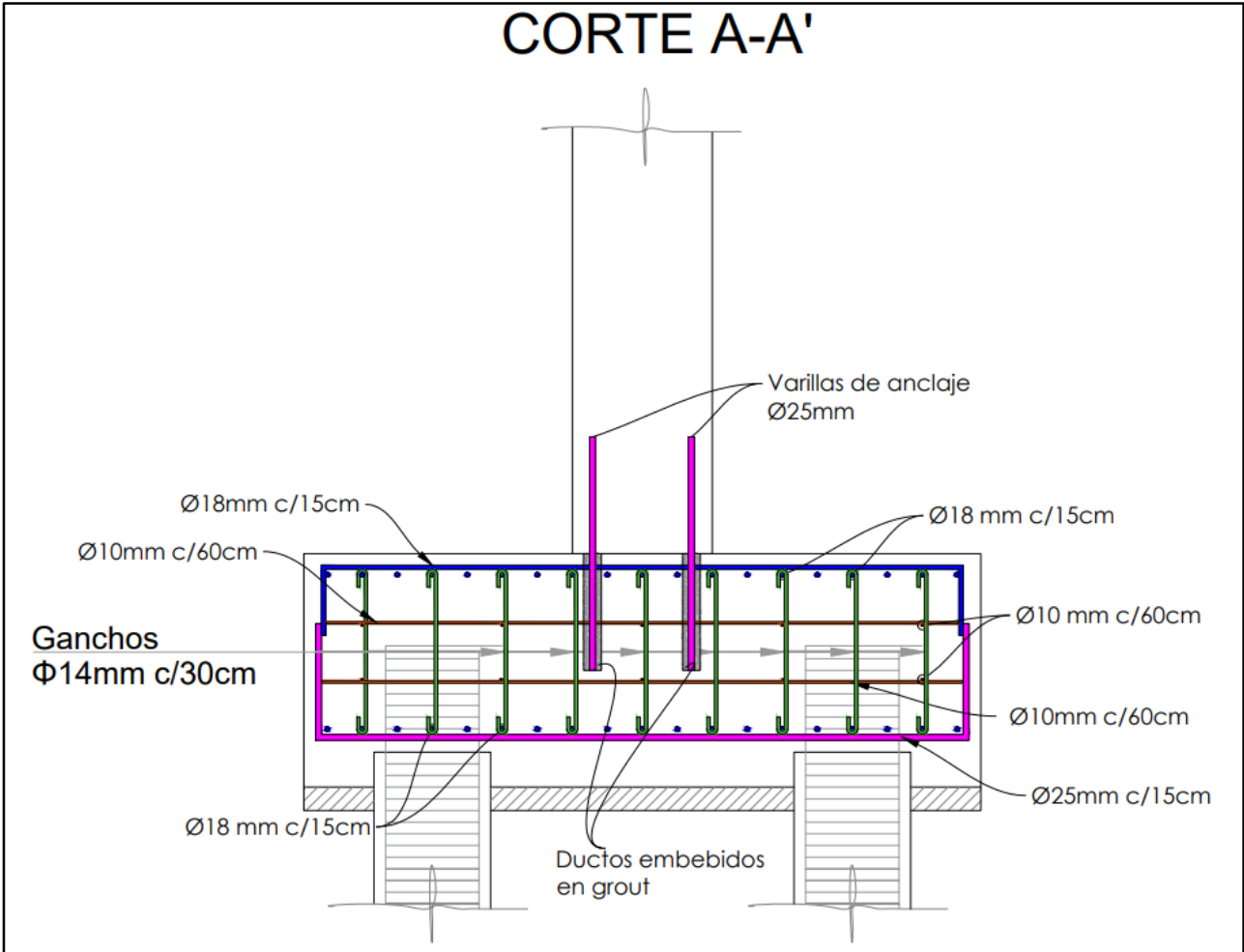


Figura 53. Armado de la zapata en el corte A-A'. Fuente del autor.

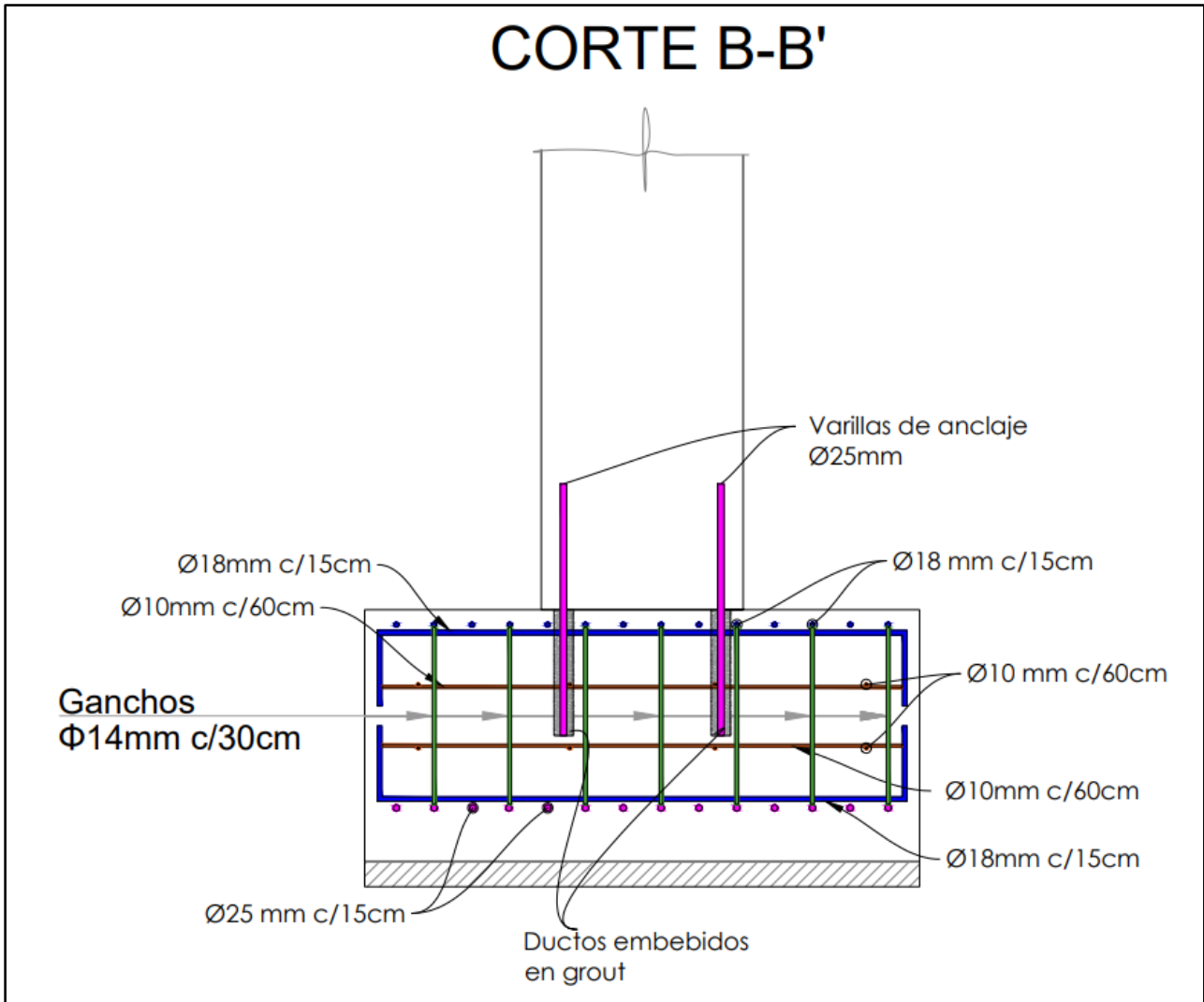


Figura 54. Armado de la zapata en el corte B-B'. Fuente del autor.

4.8. Análisis de Costos

A continuación, en la Tabla 22 se presenta el volumen total de hormigón y grout a utilizar en la zapata calculada para la conexión con barras de proyección; luego en la Tabla 23 se calcula en kg el total de varillas de acero requerido; para por último, en la Tabla 24, obtener el costo total de la zapata calculada.

VOLUMEN TOTAL DE LA ZAPATA CON BARRAS DE PROYECCIÓN (m ³)					
Elemento	Largo	Ancho	Altura	Cantidad	Volumen
Base	2,20	2,90	1,00	1,00	6,38
Pilotes	0,50	0,50	0,30	2,00	0,15
Grout	0,07	0,07	0,50	8,00	0,02
Volumen Total de la zapata=					6,21

Tabla 22. Volumen total de hormigón a utilizar en la zapata. Fuente del autor.

PLANILLA DE ACERO DE LA ZAPATA CON BARRAS DE PROYECCIÓN											
Descripcion Ømm	Cantidad	Dimensiones (m)					Longitu (m)		Peso		Observaciones
		a	b	c	d	e	Unitario	Total	Unitario (Kg/m)	Total (Kg)	
25	14	2,80	0,50	0,50	0,00	0,00	3,80	53,20	3,853	204,98	Acero Inferior
18	14	2,75	0,30	0,30	0,00	0,00	3,35	46,90	1,998	93,71	Acero Superior
18	38	2,10	0,30	0,30	0,00	0,00	2,70	102,60	1,998	204,99	Acero Mínimo
10	8	2,73	0,00	0,00	0,00	0,00	2,73	21,86	0,617	13,49	Acero por Temperatura
10	10	2,06	0,00	0,00	0,00	0,00	2,06	20,64	0,617	12,73	
10	35	0,71	0,08	0,08	0,00	0,00	0,86	30,00	0,617	18,51	Ganchos
25	8	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	8,00	3,853	30,82	Varillas de anclaje
PESO DE ACERO EN LA ZAPATA (Kg)=										579,23	Total

Tabla 23. Planilla de acero de la zapata. Fuente del autor.

COSTO DE LA ZAPATA CON CONEXIÓN DE BARRAS DE PROYECCIÓN				
Material	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Hormigón Zapata	m ³	6,21	\$ 322,43	\$ 2.002,86
Acero	kg	579,23	\$ 2,04	\$ 1.181,63
Grout	m ³	0,02	\$ 1.085,70	\$ 19,80
COSTO TOTAL=				\$ 3.204,29

Tabla 24. Costo total de la zapata. Fuente del autor.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conexión Tipo Candelerero

- La longitud de empotramiento recomendada, para una columna prefabricada de hormigón en una zapata tipo candelerero, debe ser 1.5 veces el lado mayor de la columna.
- Los ensayos experimentales, realizados en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería de la UNAM ubicado en México, comprobaron que la longitud recomendada de empotramiento, de una columna prefabricada de hormigón en una zapata tipo candelerero fue válida, gracias a que al someter la conexión a cargas axiales, cortantes y de momento flector al mismo tiempo, esta no produjo falla en la conexión sino en la columna.
- Se recomienda diseñar candeleros con foso externo, debido a las ventajas que posee como: seguridad, un menor volumen de hormigón a utilizar y la facilidad de encofrado.

5.2. Conexión con Barras de Proyección

- La conexión con barras de proyección necesita que el ducto, en donde va empotrada la varilla, posea rugosidad para que esta conexión se comporte de manera dúctil y no frágil.
- Los tubos con rugosidades $c/5\text{cm}$ y $c/2.5\text{cm}$, no se deslizaron de la conexión en ningún momento debido a que poseen mayor área de contacto con el grout y el hormigón del bloque, comparado con la varilla de empotramiento.

- Como hubo similitud en la fuerza de falla de los bloques tipo 1 y 2 (es decir con los ductos con rugosidades $c/5\text{cm}$ y $c/2.5\text{cm}$). Se puede utilizar de manera segura la conexión con los tubos de rugosidad $c/5\text{cm}$.
- Se comprobó que las fórmulas recomendada para calcular la longitud de empotramiento de la varilla de anclaje, en función su diámetro, el grout a utilizar y la rugosidad de la superficie a conectarse, son las siguientes:

✓ **Conexión Rugosa:** $l_{bmin} = 7000 * \phi_b / f'c_g$

En donde la longitud de empotramiento de la varilla de anclaje se rige por los siguientes criterios de diseño:

- **Liberal:** $l_b \geq l_{bmin}$
- **Media:** $l_b \geq 1.3 * l_{bmin}$
- **Conservadora:** $l_b \geq 1.5 * l_{bmin}$

✓ **Conexión Lisa:** $2 * l_{bmin}$

- Se pudo determinar que en los bloques Tipo 1 el coeficiente de fricción estático para el tubo liso no es cero ya que la máquina de ensayo manifestó una fuerza, para que se produzca una falla en la conexión.
- El costo de la zapata, en donde la columna prefabricada se conecte con proyección de barras, es más conveniente, gracias a que este costo representa un 28% menos, comparado con el de la zapata tipo candelero.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS

- AASHTO. (2014). *LRFG Bridge Design Specifications* (7ma ed.). United States.
- ACI-318. (2014). *Requisitos de Reglamento para concreto estructural (ACI 318S-14)*.
- Banco Central del Ecuador. (2019). *Producto Interno Bruto por Industria*.
- Bull, D. K., & Park, R. (August de 1987). Seismic resistance of frames incorporating precast prestressed concrete beam shells. *Precast Concrete Institute Journal*, pág. 54.
- Cabrera Cabrera, E. (04 de Junio de 2003). *Diseño Estructural en Concreto Armado de un Edificio de Nueve Pisos en Piura*.
- Campos, G. M., Canha, R. M., & El Debs, M. K. (Junio de 2011). Design of precast columns bases embedded in socket. *Ibracon Structures and Materials Journal*, 4(2), 304-323.
- Controls Group. (2015). *Equipos de Ensayo para la Industria de la construcción* (Vol. 8).
- Corres Peiretti, H. (2015). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de Estudio de nudos de elementos prefabricados de edificaciones en zonas sísmicas.
- Drago, R. (2010). *Diseño de Candeleros*.
- Durán, A. S. (03 de Marzo de 2017). *Universidad Católica Antiago de Guayaquil*. Obtenido de Pórticos prefabricados: uniones de elementos que mejoran su reacción frente a cargas.
- Escrig Pérez, C. (2010). *Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón*.
- GeoBienes. (2019). *GeoBienes*. Obtenido de Centro Comercial Bambú Park.
- INEC. (Octubre de 2018). *Ecuador en cifras*. Obtenido de Encuesta de Edificaciones 2017: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Encuesta_Edificaciones/2017/2017_EDIFICACION_ES_PRESENTACION.pdf
- Negro, P., & Toniolo, G. (2012). Design Guidelines for Connections of Precast Structures under Seismic Actions . *European Comission*.
- Novacero. (Marzo de 2017). *Varilla Microaleada*. Obtenido de Ficha Técnica.
- NSR. (2010). *Norma Colombiana Sismo Resistente*.
- Penagos Congote, J. E. (2017). *Guía de diseño de cimentaciones superficiales prefabricadas para edificaciones*. Universidad EIA.
- Pezo, R. (2019). *Conceptos aplicados al diseño estructural de elementos prefabricados de hormigón para el C.C. El Dorado*. Guayaquil.

Publins Canessa, D. A. (2008). *Conexiones Sismoresistentes Viga-Columna en Elementos Prefabricados de Hormigón*. Santiago de Chile.

Torres Matos, M. A., & Rodríguez, M. E. (2014). Comportamiento Sísmico de cimentación tipo Candelero para Puente con Columnas Prefabricadas. *Revista de Ingeniería Sísmica*.

CAPÍTULO 7: ANEXOS



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL - FUNDACYT

Centro de Investigaciones en Ingeniería Estructural Sismo Resistente / CEINVES

ENSAYO DE TENSION EN BARRAS DE ACERO

Fecha:	11-jun-19
Obra:	ENSAYOS DE ADHERENCIA
Cliente:	MAVISA S.A.
Muestra Tipo:	Bloque 3B Tubo con Rugosidad c 25 mm L 500 mm
Diámetro:	25 mm
Corrugada:	Sí
Fecha de ensayo:	31-may-19
Código o Norma:	ASTM A 370
Realizado por:	Ing. Luis Octavio Yépez

Equipo:	Máquina Universal CONTROLS C810/CZ Cap: 1000 kN / SN 99112806
---------	--

Observaciones:	Barra corrugada, y anclada en bloque de hormigón.
----------------	---

Fuerza Máxima Obtenida:	313,1	kN
Resistencia Máxima:	636,5	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Alto:	474,2	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Bajo:	470,8	N/mm ²



Centro de Investigaciones en
Ingeniería Estructural Sismo Resistente

CEINVES

Ing. Luis O. Yépez
Responsable Técnico



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL - FUNDACYT

Centro de Investigaciones en Ingeniería Estructural Sismo Resistente / CEINVES

ENSAYO DE TENSION EN BARRAS DE ACERO

Fecha:	11-jun-19
Obra:	ENSAYOS DE ADHERENCIA
Cliente:	MAVISA S.A.
Muestra Tipo:	Bloque 2A Tubo con rugosidad c 50 mm L 350 mm
Diámetro:	25 mm
Corrugada:	SI
Fecha de ensayo:	31-may-19
Código o Norma:	ASTM A 370
Realizado por:	Ing. Luis Octavio Yépez

Equipo:	Máquina Universal CONTROLS C810/CZ Cap: 1000 kN / SN 99112806
---------	--

Observaciones:	Barra corrugada, y anclada en bloque de hormigón.
----------------	---

Fuerza Máxima Obtenida:	295,3	kN
Resistencia Máxima:	600,4	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Alto:	482,8	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Bajo:	478,9	N/mm ²



Centro de Investigaciones en
Ingeniería Estructural Sismo Resistente

Ing. Luis O. Yépez
Responsable Técnico



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL - FUNDACYT

Centro de Investigaciones en Ingeniería Estructural Sismo Resistente / CEINVES

ENSAYO DE TENSION EN BARRAS DE ACERO

Fecha:	11-jun-19
Obra:	ENSAYOS DE ADHERENCIA
Cliente:	MAVISA S.A.
Muestra Tipo:	Bloque 1B Tubo Liso L 500 mm
Diámetro:	25 mm
Corrugada:	Sí
Fecha de ensayo:	31-may-19
Código o Norma:	ASTM A 370
Realizado por:	Ing. Luis Octavio Yépez

Equipo:	Máquina Universal CONTROLS C810/CZ Cap: 1000 kN / SN 99112806
---------	--

Observaciones:	Barra corrugada, y anclada en bloque de hormigón.
----------------	---

Fuerza Máxima Obtenida:	154,5	kN
Resistencia Máxima:	314,2	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Alto:	219,4	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Bajo:	192,9	N/mm ²



Centro de Investigaciones en
Ingeniería Estructural Sismo Resistente

CEINVES

Ing. Luis O. Yépez
Responsable Técnico



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL - FUNDACYT

Centro de Investigaciones en Ingeniería Estructural Sismo Resistente / CEINVES

ENSAYO DE TENSION EN BARRAS DE ACERO

Fecha:	11-jun-19
Obra:	ENSAYOS DE ADHERENCIA
Cliente:	MAVISA S.A.
Muestra Tipo:	Bloque 1A Tubo Liso L 350 mm
Diámetro:	25 mm
Corrugada:	Sí
Fecha de ensayo:	31-may-19
Código o Norma:	ASTM A 370
Realizado por:	Ing. Luis Octavio Yépez

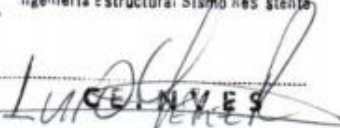
Equipo:	Máquina Universal CONTROLS C810/CZ Cap: 1000 kN / SN 99112806
---------	--

Observaciones:	Barra corrugada, y anclada en bloque de hormigón.
----------------	---

Fuerza Máxima Obtenida:	172,9	kN
Resistencia Máxima:	351,5	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Alto:	159,2	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Bajo:	147,5	N/mm ²



Centro de Investigaciones en
Ingeniería Estructural Sismo Resistente


CEINVES

Ing. Luis O. Yépez
Responsable Técnico



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL - FUNDACYT

Centro de Investigaciones en Ingeniería Estructural Sismo Resistente / CEINVEST

ENSAYO DE TENSION EN BARRAS DE ACERO

Fecha:	11-jun-19
Obra:	ENSAYOS DE ADHERENCIA
Cliente:	MAVISA S.A.
Muestra Tipo:	Bloque 3A Tubo con Rugosidad c 25 mm L 350 mm
Diámetro:	25 mm
Corrugada:	Si
Fecha de ensayo:	31-may-19
Código o Norma:	ASTM A 370
Realizado por:	Ing. Luis Octavio Yépez

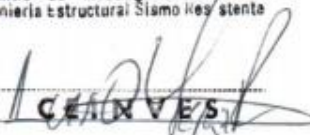
Equipo:	Máquina Universal CONTROLS C810/CZ Cap: 1000 kN / SN 99112806
---------	--

Observaciones:	Barra corrugada, y anclada en bloque de hormigón.
----------------	---

Fuerza Máxima Obtenida:	291,9	kN
Resistencia Máxima:	593,4	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Alto:	467,2	N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Bajo:	461,7	N/mm ²



Centro de Investigaciones en
Ingeniería Estructural Sismo Resistente


CEINVEST

Ing. Luis O. Yépez
Responsable Técnico



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL - FUNDACYT

Centro de Investigaciones en Ingeniería Estructural Sismo Resistente / CEINVES

ENSAYO DE TENSION EN BARRAS DE ACERO

Fecha:	11-jun-19
Obra:	ENSAYOS DE ADHERENCIA
Cliente:	MAVISA S.A.
Muestra Tipo:	Bloque 2B Tubo con rugosidad c 50 mm L 500 mm
Diámetro:	25 mm
Corrugada:	Sí
Fecha de ensayo:	31-may-19
Código o Norma:	ASTM A 370
Realizado por:	Ing. Luis Octavio Yépez

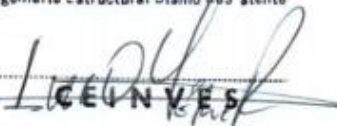
Equipo:	Máquina Universal CONTROLS C810/CZ Cap: 1000 kN / SN 99112806
---------	--

Observaciones:	Barra corrugada, y anclada en bloque de hormigón.
----------------	---

Fuerza Máxima Obtenida:	153,5 kN
Resistencia Máxima:	312,0 N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Alto:	220,0 N/mm ²
Esfuerzo Fluencia Bajo:	195,0 N/mm ²



Centro de Investigaciones en
Ingeniería Estructural Sismo Resistente


CEINVES

Ing. Luis O. Yépez
Responsable Técnico