



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**COMPORTAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE SECCIÓN OCTOGONAL CON
RESPECTO A LAS COLUMNAS RECTANGULARES Y CIRCULARES DE
CONCRETO ARMADO**

Alvaro Abraham Cruz González

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, enero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPORTAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE SECCIÓN OCTOGONAL CON
RESPECTO A LAS COLUMNAS RECTANGULARES Y CIRCULARES DE
CONCRETO ARMADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ALVARO ABRAHAM CRUZ CONZÁLEZ

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ENERO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
EXAMINADOR	Ing. Elios Rodríguez Benitez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPORTAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE SECCIÓN OCTOGONAL CON RESPECTO A LAS COLUMNAS RECTANGULARES Y CIRCULARES DE CONCRETO ARMADO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 15 de noviembre de 2011.



Alvaro Abraham Cruz González



Guatemala, septiembre de 2012

Ingeniero
Guillermo Mellini
Coordinador del Área de materiales y
Construcciones civiles

Ingeniero Mellini:

Por medio de la presente, le informo que he asesorado y revisado el trabajo de graduación, con título: COMPORTAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE SECCIÓN OCTOGONAL CON RESPECTO A LAS COLUMNAS RECTANGULARES Y CIRCULARES DE CONCRETO ARMADO, desarrollado por el estudiante Alvaro Abraham Cruz González, con carne: 2008-18949. El cual satisface los objetivos del mismo.

Al agradecer su amable atención y colaboración, me suscribo atentamente.


Ing. Mario Rodolfo Corzo Avila
No. De colegiado: 2089
Jefe de la sección de estructuras

Mario Rodolfo Corzo A.
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 2089



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
29 de octubre de 2012

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **COMPORTAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE SECCIÓN OCTOGONAL CON RESPECTO A LAS COLUMNAS RECTANGULARES Y CIRCULARES DE CONCRETO ARMADO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Alvaro Abraham Cruz González, quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

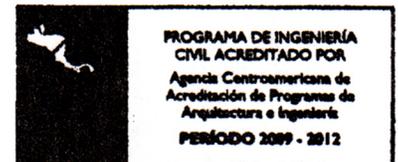

Ing. Civil Guillermo Francisco Meléndez Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Más de 130 Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero al trabajo de graduación del estudiante Alvaro Abraham Cruz González, titulado **COMPORTAMIENTO DE LA COLUMNAS DE SECCIÓN OCTOGONAL CON RESPECTO A LAS COLUMNAS RECTANGULARES Y CIRCULARES DE CONCRETO ARMADO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

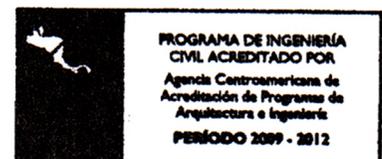

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, enero de 2013.

/bbdeb.

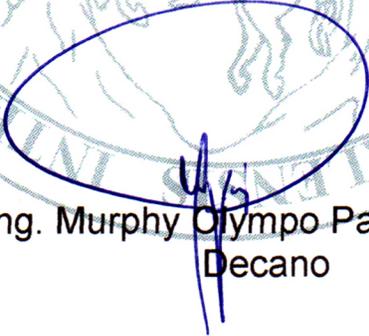
Más de **130** Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **COMPORTAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE SECCIÓN OCTOGONAL CON RESPECTO A LAS COLUMNAS RECTANGULARES Y CIRCULARES DE CONCRETO ARMADO**, presentado por el estudiante universitario **Alvaro Abraham Cruz González**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 18 de enero de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mi Dios	Por guiarme siempre hasta el camino del bien y bendecirme todos y cada uno de los días desde que nací.
La Virgen	Por cuidarme y bendecirme en cada momento.
Mi mamá	María Imelda González Esquite, por su amor, apoyo incondicional y por todos sus consejos que fueron base fundamental para ser quien hoy soy.
Mi papá	Carlos Álvaro Roberto Cruz Paniagua, por apoyarme en todas y cada una de las decisiones que he tomado y estar ahí cuando lo he necesitado.
Mis abuelos	Abraham González y Brígida Esquite por todos los valores que de ellos he aprendido y ser un ejemplo de comportamiento en todo lugar.
Mis tíos	Por ser un ejemplo de lucha y trabajo.
Fernando Revolorio	Por ser más que mi primo mi hermano.

Mis primos

Por sus ánimos de siempre.

Mis amigos

Enrique Rezzio, Eder Ventura, Miguel Zacarias, Edson Salazar, Yonatan Grajeda, Guillermo Urias, Lia Boiton, Liz Navarro, Juan Carlos López, Luis Cordón, Emilio Vásquez, Daniela Vásquez, y Ramón Garrido.

Ing. Mario Corzo Ávila

Por todas sus experiencias y conocimiento transmitido.

Facultad de Ingeniería

Por darme la oportunidad de ampliar mi conocimiento y superarme intelectualmente.

**Colegio Salesiano
Don Bosco**

Por los conocimientos y valores aprendidos.

Mis profesores

Por las enseñanzas brindadas.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis amigos	Guadalupe Vásquez, Manuel Cabrera por su apoyo para realizar esta tesis.
Fabio Sánchez	Por su ayuda y experiencia para realizar los ensayos.
Iván Juárez	Por su ayuda en la realización de la formaleta.
Carlos Yaque	Por su disponibilidad para el préstamo de las herramientas.
Los practicantes del área de estructuras	Por su ayuda a la hora de hacer los ensayos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO	1
1.1. Concreto armado.	1
1.1.1. Características del concreto	1
1.1.2. Materiales empleados para su fabricación	2
1.1.3. Pruebas realizadas al concreto fresco	4
1.2. Clasificación de las columnas de concreto armado	6
1.2.1. Columnas	7
1.2.2. Columnas cortas	7
1.2.3. Columnas esbeltas	9
1.2.4. Clasificación de las columnas en relación a otros componentes de un edificio	11
1.3. Requerimientos principales del ACI	13
1.3.1. Requerimientos sísmicos ACI capítulo 21	15
1.4. Tipos de encofrado	15
1.4.1. Requisitos de un buen encofrado	16
1.4.2. Economía en encofrado.....	17
1.4.3. Encofrado de madera	18
1.4.4. Encofrado de acero	18

1.4.5.	Formas de acero en comparación con el encofrado de madera	19
1.4.6.	Operaciones implicadas en el encofrado.....	19
1.4.6.1.	Orden y método de eliminación del encofrado	19
2.	COLUMNAS CUADRADAS Y CIRCULARES	21
2.1.	Características de las columnas circulares.....	21
2.2.	Características de las columnas cuadradas.	24
3.	CÁLCULOS TEÓRICOS DE LA COLUMNA TÍPICA	27
3.1.	Introducción	27
3.2.	Ejemplos de diseño de columnas	27
3.2.1.	Ejemplo 1 (modelo a ser ensayado).....	28
3.2.2.	Ejemplo 2	30
3.2.3.	Ejemplo 3	33
3.2.4.	Ejemplo 4	36
3.2.5.	Ejemplo 5	36
3.2.6.	Ejemplo 6	37
4.	ENSAYOS Y PROCEDIMIENTOS REALIZADOS.....	39
4.1.	Ensayo de asentamiento o slump.....	39
4.1.1.	Equipo	39
4.1.2.	Procedimiento	42
4.2.	Ensayo de cilindros	43
4.2.1.	Equipo	43
4.2.2.	Procedimiento	44

4.3.	Ensayo de peso volumétrico	45
4.3.1.	Equipo	46
4.3.2.	Procedimiento	46
4.4.	Ensayo a compresión de columnas octogonales (propuesto)..	47
4.4.1.	Equipo	47
4.4.2.	Procedimiento	47
4.5.	Ensayo a corte de columnas octogonales (propuesto)	50
4.5.1.	Equipo	50
4.5.2.	Procedimiento	50
4.6.	Ensayo a corte de columna cuadrada (propuesto)	51
4.6.1.	Equipo	51
4.6.2.	Procedimiento	52
5.	RESULTADOS.....	53
5.1.	Ensayo de cilindros a compresión	53
5.2.	Ensayo de peso volumétrico	54
5.3.	Ensayo a compresión de columnas octogonales (propuesto)..	54
5.4.	Ensayo a corte de columnas octogonales (propuesto)	67
5.5.	Ensayo a corte de columna cuadrada (propuesto)	68
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
6.1.	Ensayo de cilindros a compresión	69
6.2.	Ensayo de peso volumétrico	69
6.3.	Ensayo a compresión de columnas octogonales (propuesto)..	69
6.3.1.	Comparación teórica.....	71
6.4.	Ensayo a corte de columnas octogonales y cuadradas	71
6.4.1.	Comparación teórica	73

CONCLUSIONES..... 75
RECOMENDACIONES 77
BIBLIOGRAFÍA..... 79
APÉNDICES..... 83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Columna exenta.....	11
2.	Columna adosada.....	12
3.	Columna embebida.....	13
4.	Armado de columna octogonal	29
5.	Armado de columna cuadrada.....	32
6.	Armado de columna circular	34
7.	Cono de Abrams.....	40
8.	Varilla compactadora	41
9.	Procedimiento del ensayo de asentamiento	43
10.	Procedimiento de llenado de cilindros	45
11.	Ensayo a compresión de columna octogonal	49
12.	Ensayo a corte de columna octogonal.....	51
13.	Carga <i>versus</i> deformación transversal de columna 1	56
14.	Carga <i>versus</i> deformación de eje x de columna 1	58
15.	Carga <i>versus</i> deformación de eje y de columna 1	60
16.	Carga <i>versus</i> deformación de eje transversal de columna 2	62
17.	Carga <i>versus</i> deformación de eje x de columna 2.....	64
18.	Carga <i>versus</i> deformación de eje y de columna 2.....	66

TABLAS

I.	Numeración de varillas	28
II.	Lecturas de deformómetro transversal de columna 1	55
II.	Lecturas de deformómetro de eje x de columna 1	57
III.	Lecturas de deformómetro de eje y de columna1	59
IV.	Lecturas de deformómetro transversal de columna 2	61
V.	Lecturas de deformómetro de eje x de columna 2	63
VI.	Lecturas deformómetro de eje y de columna 2	65

LISTA DE SÍMBOLOS

As	Área de acero.
Ag	Área gruesa.
bw	Ancho del alma o diámetro de la sección circular.
Nu	Carga axial mayorada normal a la sección transversal.
ρ	Cuantía de refuerzo.
s	Espaciamiento entre estribos.
k	Factor de longitud efectiva.
λ	Factor de modificación.
ϕ	Factor de reducción de resistencia.
Pu	Fuerza axial mayorada.
lu	Longitud sin soporte lateral de un elemento a compresión.
Ec	Módulo de elasticidad del concreto.

%	Porcentaje.
r	Radio de giro.
V_c	Resistencia a corte proporcionada por el concreto.
f_{yt}	Resistencia a la fluencia del refuerzo transversal.
P_n	Resistencia axial nominal.
f'_c	Resistencia especificada a la compresión del concreto.
f_y	Resistencia especificada a la fluencia del refuerzo.
V_s	Resistencia nominal a corte proporcionada por el refuerzo de cortante.

GLOSARIO

Aglomerante	Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente físicos.
Agregado	Material granular, como arena, grava, piedra triturada y escoria de hierro de alto horno, empleado con un medio cementante para formar concreto.
Apisonar	Es la acción de compactar el concreto por medio de una varilla hecha para ese fin.
Apuntalar	Es la acción de colocar puntales, con el fin de sostener y dar firmeza.
Arcilla	Es un material natural que está constituido por minerales en forma de granos, de granulometría menos a 0,002 mm.
Axial	Se refiere al mismo eje.
Centro plástico	Es el punto en la sección transversal de la columna a través del cual la carga resultante en la columna debe pasar a producir una deformación unitaria uniforme en el momento de falla.

Confinar	Encerrar una cosa material o inmaterial dentro de unos límites, especialmente estrecho.
Cuantía	Número de unidades, tamaño o proporción de una cosa, especialmente cuando es indeterminado.
Deformómetro	Es un instrumento que consta de una pieza metálica extensible con un comparador en la parte central que capta las variaciones de longitud.
Esbeltez	Es una característica mecánica de las barras estructurales o prismas mecánicos que relaciona la rigidez de la sección transversal de una pieza prismática con su longitud total.
Esfuerzo	Fuerza por unidad de área.
Estribo	Refuerzo empleado para resistir esfuerzos de cortante y torsión en un elemento estructural.
Excentricidad	La excentricidad se define como la no coincidencia entre el eje de rotación y el eje de simetría.
Flexión	Es un tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.
Grava	Se denomina grava a las rocas de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm.

Helicoidal	Que tiene forma de hélice.
Neopreno	Es un caucho sintético utilizado para la aplicación simétrica de las cargas.
Octogonal	Que tiene ocho lados.
Palustre	Paleta de albañil.
Tamiz	Es un instrumento con aberturas, utilizado para cernir.
Tara	Peso que corresponde al recipiente, envase o vehículo que contiene o transporta una mercancía, sin contar el peso de esta.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación es un estudio comparativo sobre el comportamiento que tienen las columnas cuadradas y las circulares, con respecto a las columnas de sección octogonal, que es la sección propuesta y sobre la cual se hace énfasis para determinar sus principales características y atributos.

Para realizar dicho estudio, se empezará por repasar los materiales y las principales actividades previas para hacer una columna, luego se tendrá una revisión de la teoría básica de las columnas, en la cual se podrán observar los principios de trabajo y factores que se tienen que tomar en consideración para establecer el método de diseño de la columna.

También, se hará énfasis en los requisitos del Código Americano de Concreto y se identificarán las principales características por separado de las columnas cuadradas y circulares, lo cual dará una idea general de lo que se podría esperar en las columnas octogonales.

Para familiarizarse con el trabajo de las columnas se tendrán ejemplos teóricos básicos, en los que desde ya se planteará la comparación en teoría de las columnas cuadradas y circulares con respecto a las octogonales.

Luego se tendrá un repaso de los ensayos a realizar a las columnas octogonales que servirán como guía para el estudio de las mismas y para la determinación de sus características.

Como paso final se tendrán los resultados y el análisis respectivo de los mismos, para llegar a determinar en si el comportamiento de este tipo de columnas.

OBJETIVOS

General

Evaluar el comportamiento de las columnas de sección octogonal con respecto a las columnas de sección cuadrada y circular.

Específicos

1. Determinar las características principales de una columna de sección octogonal.
2. Verificar el comportamiento de la columna de sección octogonal.
3. Establecer los tipos de falla obtenidos en la columna.
4. Realizar una comparación de las características y comportamiento principal a carga axial y corte, entre las columnas cuadradas y circulares.
5. Establecer las ventajas y desventajas en la utilización de columnas octogonales.

INTRODUCCIÓN

Las columnas son elementos estructurales que trabajan principalmente a compresión y corte, aunque se llegan a producir fuerzas de tensión debido a momentos flectores, tanto directos como de segundo orden que hacen que su comportamiento varíe.

En el medio guatemalteco, se manejan principalmente dos tipos de columnas de concreto armado, columnas de sección circular o de sección cuadrada, las que se han observado son eficientes, cada una para distintas necesidades.

El trabajo de graduación tiene por objetivo dar a conocer y determinar las propiedades y características principales de columnas diseñadas con sección octogonal, así como, hacer una propuesta de armado e información, que se obtendrá por medio de ensayos.

Además, se pretende hacer una comparación del comportamiento de las columnas octogonales con respecto al de las columnas cuadradas y las columnas circulares y así determinar sus características y evaluar la eficiencia de cada una.

Se busca hacer eficiente tanto el comportamiento a carga axial como el de corte, esto a una misma cantidad de área en la sección.

1. COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO

1.1. Concreto armado

El concreto armado es un sistema constructivo formado por dos componentes muy importantes, concreto y acero de refuerzo. Dependiendo de las características propias de cada obra, tanto estructurales como de la zona de construcción, será diseñado el concreto y el armado de acero correspondiente, para soportar conjuntamente esfuerzos de tensión, compresión, flexión y corte, generados por la interacción de la estructura con el entorno que la rodea. El recubrimiento de concreto sobre los elementos de refuerzo, brinda protección anticorrosiva y contra incendios.

1.1.1. Características del concreto

Este es un material que se obtiene de la mezcla de un aglomerante, agregados y agua, al endurecerse esta mezcla se obtiene concreto y hormigón.

La propiedad más eficaz y por la que se prefiere su uso, es la de soportar fuertes cargas bajo efectos de compresión, en las cuales el concreto pareciese aumentar su resistencia mientras más carga se le aplica, obviamente según la necesidad de su uso, así será la mezcla más adecuada, para lograrar contrarrestar estas cargas de compresión. Para los esfuerzos de tracción y tensión es un material altamente quebradizo o frágil, por lo que se utilizan barras de acero para resistir este tipo de cargas.

El concreto puede definirse como quebradizo, ya que éste suele romperse fácilmente, lo que puede ser causado por una mala unión entre los compuestos (pasta agua-cemento y los agregados) o también debido a la calidad del agregado grueso, el que al ser de mala calidad puede llegar a quebrarse o separarse a la hora de aplicársele una carga determinada.

1.1.2. Materiales empleados para su fabricación

Cemento

Este material se obtiene de la pulverización y calcinación de piedra caliza, arcilla y rocas metálicas. Es la parte más importante del concreto, ya que sirve como aglomerante de todas las partículas de cada uno de los elementos que le conforman, además de proporcionar una resistencia extra que fortalece la mezcla.

Agregados

Los agregados son materiales pétreos, inertes derivados de la descomposición natural o artificial de las rocas, estos se dividen en: fino y grueso.

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada, los que pasan por el tamiz No. 4.

Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de grava o agregado triturado, cuyas partículas son predominantemente mayores que 5 milímetros y generalmente entre 9,5 milímetros y 38 milímetros.

Clasificación del agregado por su forma:

- Canto rodado: proveniente de cauces de ríos. Forma redondeada, las gravas y arenas de río son de este tipo. Produce concreto de buena calidad y de mayores ventajas (trabajabilidad o docilidad y economía) por lo que debe preferirse a los otros tipos, siempre que satisfaga las especificaciones de calidad, tamaño y bajo costo de explotación. Este material tiene la ventaja de que la composición mineralógica de sus partículas no es uniforme.
- Triturado: proveniente de trituración de piedra de cantera. Los piedrines son de este tipo. Se utilizará cuando no sea posible o económico emplear los otros tipos. Si bien, tiene ventajas por su composición mineralógica más uniforme este material de aristas vivas (cantos angulosos) produce concreto menos trabajable y de mayor consumo de cemento, además de tener un costo de explotación más alto que el de canto rodado.

Procedencia de los agregados:

Entre las principales rocas empleadas para trituración están:

- Volcánicas e ígneas, ya sean intrusivas o extrusivas, riolitas, andesitas, basaltos, granitos y otras.
- Sedimentarias: calizas y dolomitas.
- Las metamórficas: el gnesis, los esquistos, pizarra, mármol y otras.

Los agregados naturales que se utilizan son la arena y la grava. Estos materiales están compuestos por granos de distinto tamaño, independiente de su forma, uniformidad y composición mineralógica.

Dentro de los agregados finos naturales que existen en Guatemala están la arena blanca o arena pómez, arena amarilla, arena de río y arena triturada.

Agua

Es el elemento final con el que se activa el cemento y provoca entonces que se inicie una fase de hidratación, para con esto unir por completo todas las partículas que formarán el concreto, con el tiempo la mezcla comienza a endurecerse y aumentar su resistencia. Se puede utilizar casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga sabor u olor pronunciado.

1.1.3. Pruebas realizadas al concreto fresco

Al concreto recién mezclado se le deben realizar ciertas pruebas, que son muy sencillas, pero que ayudan a conocer el comportamiento futuro de las propiedades del mismo, así como, la resistencia que este puede llegar a soportar y el tiempo en que la alcanzará, ya como elemento estructural.

Las pruebas que se realizan son las siguientes:

- Obtención de muestras de concreto para ser ensayadas (cilindros).
- Medición de la temperatura del concreto fresco.
- Revenimiento en el concreto fresco elaborado con cemento hidráulico.

- Determinación de la masa unitaria (peso unitario).
- Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión.
- Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método volumétrico.
- Práctica normalizada para la elaboración y curado en campo de especímenes de pruebas para concreto.

Cabe resaltar que en la actualidad un 90% de las fallas que ocurren en el concreto, se deben a la forma de colocación en la construcción ya que muchas veces cumple con estas pruebas básicas de diseño de concreto fresco, pero el constructor lo coloca de manera inadecuada y por eso causan fallas en los elementos. E incluso en muchas ocasiones, se debe a una mala supervisión de la obra por parte del ingeniero supervisor.

Fraguado del concreto

El concreto luego de ser vaciado en el encofrado correspondiente para dar forma al elemento estructural comienza un proceso denominado fraguado, el cual corresponde al momento en que el concreto deja su estado fluido y pasa a endurecer, mediante la continua hidratación y reacción de los componentes químicos del cemento. Es necesario controlar esta evaporación para evitar fisuras internas en el concreto.

Según el tipo de cemento varia el lapso de fraguado, que en el caso del cemento Portland normal, comienza entre 45 minutos de colocado y culmina alrededor de 12 horas después.

Curado del concreto

Debido a las reacciones provocadas durante el fraguado donde se pierden las partículas de agua que ocupaban un espacio inicial de la mezcla, se necesita aún mantener un nivel de humedad, que servirá para terminar el secado respectivo, ayudando a que se continúe la hidratación de las partículas de cemento que lo necesiten.

A este proceso se le conoce como curado, donde se trata que disminuyan los poros capilares en el concreto por medio de la hidratación, en un tiempo definido para que se contenga la humedad necesaria sobre la superficie a curar, así como, el control de la temperatura en todo el elemento. Existen diferentes métodos que se usan, según la necesidad de la obra, así como, del presupuesto disponible para ello.

Para el curado, “el concreto debe mantenerse a una temperatura por encima de 10 grados Celsius y en condiciones de humedad por lo menos durante los primeros 7 días después de la colocación (excepto para concreto de alta resistencia en el cual se debe mantener la humedad por lo menos 3 días)”.¹

1.2. Clasificación de las columnas de concreto armado

El concreto armado es un sistema constructivo formado por dos componentes muy importantes, concreto y acero de refuerzo.

¹Instituto Americano de Concreto (ACI). *ACI Sección 5.11*. p. 83.

1.2.1. Columnas

Son elementos estructurales diseñados para soportar cargas axiales a compresión y también momentos flectores, con lo cual se produce una flexión en las mismas.

Las columnas de concreto reforzado suelen dividirse en dos categorías principales: las columnas cortas y las columnas largas o esbeltas.

1.2.2. Columnas cortas

Son elementos estructurales diseñados para soportar cargas axiales a compresión y también momentos flectores, con lo cual se produce una flexión en las mismas. En estas, su resistencia está basada por la resistencia de los materiales en sí, las que constan de poca flexibilidad y la carga que la misma soporta depende de las dimensiones de su sección transversal.

“Para cargas bajas en las cuales los dos materiales (concreto y acero) se mantienen en su intervalo elástico de respuesta, el acero toma una porción relativamente pequeña de la carga total. El esfuerzo en el acero f_s es igual a n veces el refuerzo del concreto”.²

En columnas de este tipo es necesario utilizar una excentricidad e , debido a los efectos de la carga axial y los momentos que genera la misma, con lo que e , sería igual a: $e = M_u / P_u$.

²NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto*. p. 242.

En el diseño de columnas cortas se suponen excentricidades mínimas, en el caso de no tener los momentos y los valores de estas excentricidades mínimas, en columnas zunchadas son de 1 pulgada o 0,05 de la altura y en columnas con estribos son de 1 pulgada o 0,010 de la altura, tomando el valor mayor de la excentricidad encontrada.

Para no utilizar estas excentricidades y facilitar el cálculo, el código ACI ha propuesto que se utilice un factor $\alpha = 0,85$ en columnas zunchadas y $\alpha = 0,80$ para columnas con estribos. La capacidad de carga axial no debe ser mayor a los siguientes valores y se debe tomar en consideración que estas ecuaciones son aceptables solamente, si el momento es muy pequeño o no se posee un momento calculado³.

$$\text{Columnas zunchadas } \phi = 0,75 \quad \phi P_{n(\max)} = 0,85\phi[0,85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$$

$$\text{Columnas con estribos } \phi = 0,65 \quad \phi P_{n(\max)} = 0,80\phi[0,85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$$

Cuando se tienen momentos flectores mayores y considerables, se generan en la columna tanto tensión como compresión, en un lado de la misma.

Para el diseño de este tipo de columnas es de vital importancia tener en cuenta el centroide plástico de las mismas, que es el punto en la sección transversal sobre el cual se produce una deformación unitaria uniforme sobre toda la columna en el momento de falla.

Con la distancia desde el punto de aplicación de la carga y el centro plástico se encuentra la excentricidad de la carga.

³Instituto Americano de Concreto (ACI). *ACI Sección 10.3.6.1*. p. 141.

Una manera de comprobar si el armado de una columna cumple con las características y necesidades que se tienen, es por medio de los diagramas de iteración, en los cuales se puede buscar que el concreto y el acero trabajen de manera balanceada con lo cual se alcanzarán las deformaciones de manera simultánea.

1.2.3. Columnas esbeltas

En estas columnas la resistencia de las mismas se ve afectada debido a las deflexiones laterales producidas en ellas, con lo que su resistencia será disminuida.

Una columna es considerada larga o esbelta, cuando su relación de esbeltez crece con lo cual también crecerán sus deformaciones por flexión, generándose momentos de segundo orden. A causa de esta magnificación de los momentos su capacidad de resistir carga axial, se ve disminuida de manera considerable.

El grado de esbeltez se expresa generalmente en términos de la relación de esbeltez l/r , donde l es la longitud de la columna y r es el radio de giro de la sección transversal, igual a $(I/A)^{1/2}$.

El comportamiento de las columnas esbeltas, fue desarrollado por Euler, quien estableció que este tipo de elementos fallarán por pandeo para una carga crítica igual a:

$$P_c = \frac{\pi^2 E_t I}{(kl)^2}$$

Con lo que se observa que al aumentar la carga, el pandeo tiende a ser mucho mayor.

Para el diseño de columnas esbeltas, lo primero y fundamental es determinar cómo va a trabajar la columna, es decir, si esta será un marco arriostrado contra desplazamiento lateral o no. El código ACI en el capítulo 10.10.1, permite ignorar los efectos de esbeltez en los siguientes casos:

- Para elementos sometidos a compresión no arriostrados contra desplazamientos laterales, se debe cumplir con:

$$\frac{kl_u}{r} \leq 22$$

- Para elementos a compresión, no arriostrados contra desplazamientos laterales, se debe cumplir con:

$$\frac{kl_u}{r} \leq 32 - 12 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \leq 40$$

En este caso k es el factor de longitud efectiva, estos factores se pueden encontrar por medio de monogramas, los cuales toman en consideración la suma de las rigideces entrantes al nudo y las condiciones de empotramiento, teniendo en cuenta si está arriostrado o no. También se tiene a r que es el radio de giro, en este caso se asume $r = 0,3$ veces la dimensión total de la sección, en la cual se considera la estabilidad para el caso de elementos rectangulares y $r = 0,25$ el diámetro en elementos circulares.

Para la magnificación de momentos y efectos de esbeltez se utilizan dos procedimientos, descritos en la sección 10.10.5 y 10.10.6 respectivamente del ACI 318-08.

1.2.4. Clasificación de las columnas en relación a otros componentes de un edificio

Atendiendo a su disposición en relación con otros componentes de un edificio, pueden distinguirse estos tipos de columnas:

- Columna aislada o exenta: la que se encuentra separada de un muro o cualquier elemento vertical de la edificación.

Figura 1. **Columna exenta**



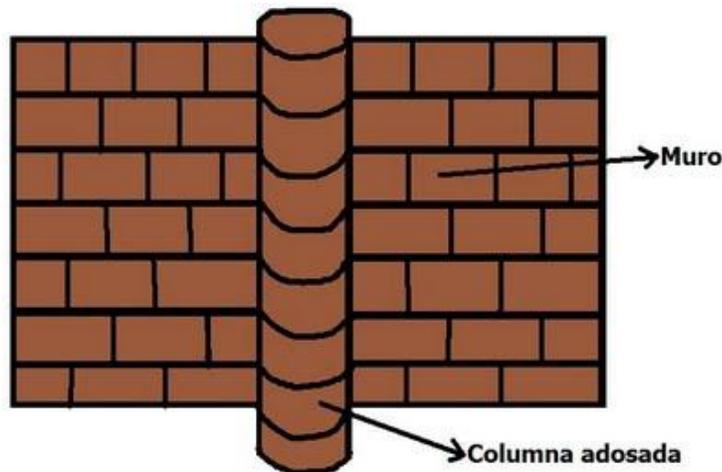
Fuente: <http://www.foro3k.com/la-zona-del-pensamiento/31484-arquitectura-columnas.html>.

Consulta: mayo de 2012.

Como se observa en la figura, estas columnas son totalmente independientes y no tienen contacto con ningún otro elemento vertical.

- Columna adosada: la que está yuxtapuesta a un muro u otro elemento de la edificación.

Figura 2. **Columna adosada**



Fuente: <http://artechachi.blogspot.com/2009/11/evolucion-columnas-adosadas.html>. Consulta: mayo de 2012.

Como se observa en la imagen, esta columna no forma parte del muro, pero, si tiene contacto con él.

- Columna embebida: la que aparenta estar parcialmente incrustada en el muro u otro cuerpo de la construcción.

Figura 3. **Columna embebida**



Fuente: <http://www.romanicocatalan.com/02a-Lleida/Ribagorca/Barruera/Barruera.htm>.

Consulta: mayo de 2012.

Como se observa en la siguiente fotografía, la columna forma parte de los muros y por lo tanto toda la estructura trabaja unida.

1.3. Requerimientos principales del ACI

- “El área de refuerzo longitudinal, para elementos no compuestos, a compresión no debe ser menor que 0,01, ni mayor a 0,08 del área gruesa”.⁴

⁴Instituto Americano de Concreto (ACI). *ACI Sección 10.9.1*. p. 147.

- “El número mínimo de barras longitudinales en elementos sometidos a compresión debe ser 4 para columnas con estribos rectangulares o circulares, 3 para barras dentro de estribos triangulares y 6 para barras encerradas por espirales”.⁵
- “El ancho del elemento no debe ser menor que el más pequeño de 0.3 de la altura y 250 milímetros”.⁶
- “Todas las barras no preesforzadas deben estar confinadas por medio de estribos transversales de por lo menos diámetro No. 10, para barras longitudinales No. 32 o menores y diámetro No. 13 como mínimo, para barras longitudinales No. 36, No. 43 y No. 57 y paquetes de barras”.⁷
- “El espaciamiento vertical de los estribos no debe exceder 16 diámetros de la barra longitudinal, 48 diámetros de la barra o alambre de los estribos o la menor dimensión del elemento sometido a compresión”.⁸
- “El espaciamiento libre entre las hélices de la espiral no debe exceder de 75 milímetros ni ser menos de 25 milímetros”.⁹

⁵Instituto Americano de Concreto (ACI). *ACI Sección 10.9.2*. p. 148.

⁶Ibíd. p. 348.

⁷Ibíd. p. 102.

⁸Ibíd.

⁹Ibíd. p. 101.

1.3.1. Requerimientos sísmicos ACI capítulo 21

- “El espaciamiento vertical de los estribos cerrados de confinamiento, no debe exceder 8 diámetros de la barra longitudinal, 24 veces el diámetro de la barra del estribo cerrado de confinamiento, la mitad de la menor dimensión de la sección transversal de la columna o 30 centímetros”.¹⁰
- “El primer estribo cerrado de confinamiento no debe estar situado a más de la mitad del espaciamiento de estribos de confinamiento”.¹¹
- “La dimensión menor de la sección transversal no debe ser menor de 30 centímetros”.¹²
- “El área de refuerzo longitudinal no debe ser menor que 0,01 del área gruesa, ni mayor que 0,06 del área gruesa”.¹³

1.4. Tipos de encofrado

Encofrado es una construcción auxiliar, utilizado como molde para una estructura. En este molde, el concreto fresco se coloca para endurecerse posteriormente. La construcción del encofrado lleva tiempo e implica gastos de hasta un 20% a un 25% del costo de la estructura o incluso más. Para tener una idea de esto, en las columnas estudiadas en este trabajo de graduación se efectuó un gasto aproximado de Q1 500,00, de los cuales Q520,00 fueron utilizados en madera para las formaletas, lo que sería un equivalente al 35% del costo total.

¹⁰Instituto Americano de Concreto (ACI). *ACI Sección 21.3.5.2*. p. 344.

¹¹Ibíd. p. 345.

¹²Ibíd. p. 354.

¹³Ibíd. p. 355.

Claro que en estas circunstancias no se tomó en cuenta la reutilización, que se le podría dar en obra a la formaleta, con lo que este porcentaje bajaría.

El diseño de estas estructuras temporales se hace con el gasto económico, la operación de quitar el encofrado se conoce como extracción, este encofrado puede ser reutilizado y se le conoce como forma panel y a los no reutilizables como formas fijas.

La madera es el material más común utilizado para el encofrado, la desventaja con el encofrado de madera es que se tuerza, se hinche y se encoja, estos efectos se pueden ver reducidos con una impermeabilización de la madera contra el agua.

1.4.1. Requisitos de un buen encofrado

- Debe ser lo suficientemente fuerte para soportar todo tipo de cargas muertas y vivas.
- Debe ser construido rígidamente, apoyado de manera eficiente, tanto horizontal como verticalmente, con el fin de conservar su forma.
- Las juntas en los encofrados deben ser firmes contra la fuga de mortero.
- La construcción del encofrado debe permitir la eliminación de varias partes de secuencias deseadas sin dañar el concreto.
- El material del encofrado debe ser barato, fácilmente disponible y adecuado para su reutilización.

- En el encofrado se debe establecer con precisión la línea deseada y los niveles deben tener una superficie plana.
- Debe ser lo más ligero posible.
- El material del encofrado no se debe deformar o distorsionar cuando se expone a los elementos.
- Se debe descansar sobre una superficie firme.

1.4.2. Economía en encofrado

Para tener un encofrado económico se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El plan de la construcción debe implicar un número mínimo de variaciones en el tamaño de las habitaciones, superficie, etcétera; con el fin de permitir la reutilización del encofrado en repetidas ocasiones.
- El diseño debe ser perfecto para utilizar secciones delgadas sólo de una manera más económica.
- El aserrado debe ser hecho para permitir la reutilización del material varias veces.

El encofrado puede ser hecho de madera, madera contrachapada, acero, vidrio prefabricado de hormigón o fibra, que se utiliza por separado o en combinación. Las formas de acero se utilizan en situaciones en las cuales se tengan que utilizar varias veces. Para pequeñas obras, el encofrado de madera resulta muy útil.

La fibra de vidrio hecha de hormigón prefabricado y el aluminio se utilizan en hormigón *in situ* de la construcción, tales como losas o miembros que impliquen superficies curvas.

1.4.3. Encofrado de madera

La madera para un encofrado debe cumplir con los siguientes requisitos:

- De peso ligero
- Libre de nudos sueltos
- Superficie lisa y uniforme

1.4.4. Encofrado de acero

Consiste en paneles fabricados de chapa de acero fino, endurecido a lo largo de los bordes de los ángulos de acero pequeños. Las unidades del panel se pueden mantener unidas a través del uso de pinzas adecuadas, tornillos o tuercas. Los paneles pueden ser fabricados en grandes cantidades, en cualquier forma deseada modular o tamaño. Las formas de acero son utilizadas en grandes proyectos o en situaciones donde se vuelva a utilizar el encofrado varias veces. Este tipo de encofrado se considera más adecuado para estructuras circulares o curvas.

1.4.4.1. Formas de acero en comparación con el encofrado de madera

- Las formas de acero son más fuertes, duraderos y tienen una mayor vida útil que la de un encofrado de madera.
- Las formas de acero se pueden instalar y desmontar con mayor facilidad y rapidez.
- El encofrado de acero no absorbe la humedad del hormigón, tampoco se encoge ni se deforma.

1.4.5. Operaciones implicadas en el encofrado

Normalmente esto implica las siguientes operaciones:

- Apuntalar y centrar
- Encofrado
- Prestación de comba
- Limpieza y tratamiento de superficies

1.4.5.1. Orden y método de eliminación de encofrado

La secuencia de las órdenes y el método de extracción de los encofrados son los siguientes:

- Los encofrados verticales utilizados en las paredes, vigas y columnas laterales deben retirarse primero, ya que no tienen ninguna carga, pero sólo retienen el concreto.
- El encofrado en la parte inferior de placas debe ser eliminado junto.
- El encofrado en la parte inferior de vigas y otros encofrados con mucha carga debe ser eliminado en la final.

2. COLUMNAS CUADRADAS Y CIRCULARES

2.1. Características de las columnas circulares

De manera directa, el principio de trabajo al que se expone una columna es el de soportar específicamente cargas axiales, generadas por el peso que sostienen estas.

Por ello, en su diseño a las columnas se les consideran ciertos rangos de excentricidad que pudieran ser provocados, debido a cualquier tipo de impacto que reciban los elementos, también en caso de alguna explosión y en el más probable de los casos, afrontar los momentos que genera un terremoto. La excentricidad mínima para el caso de columnas circulares es 1 pulgada o 0,05 de la altura de la columna.

La carga axial provoca en el interior de la columna una expansión transversal del concreto, debido a la compresión generada y transmitida por el peso que sostiene. Los momentos llevan a la columna a límites de elasticidad que afectan principalmente la ductilidad del concreto, la que es mínima en comparación a la del acero, provocando la ruptura y deformación del elemento. La expansión es controlada mediante el confinamiento adecuado de estribos o en el mejor de los casos, el uso de zuncho en columnas circulares. La ductilidad en columnas es proporcional al acero longitudinal.

Las columnas circulares resultan ser las más apropiadas para contrarrestar las fuerzas de gravedad y principalmente sería un buen elemento estructural. Quizá las limitaciones principales que evitan su uso sean las de carácter arquitectónico, debido a la geometría y el espacio que ocupa, además de la estética y en otro de los casos la del factor económico, debido al empleo de más concreto, más acero estructural y el uso de formaletas especiales que en conjunto incrementan el costo del elemento. Las columnas circulares son usualmente utilizadas en pilotes de cimentación y en columnas de pasos a desnivel y puentes.

Las ecuaciones para cálculo de columnas circulares son las mismas que las de un análisis en columna rectangular, con la diferencia de que la forma del área sujeta a esfuerzos de compresión será un segmento de círculo y, las varillas de refuerzo no se colocan juntas paralelas a los lados a tensión y compresión. También puede surgir el uso de una sección equivalente rectangular que representaría el área de la sección circular.

En el aspecto del refuerzo de acero estructural de las columnas circulares se toman en cuenta 2 elementos:

- El estribo helicoidal, espiral o zuncho brinda más ductilidad a la columna y proporcionan un soporte más alto para contrarrestar la carga máxima y permitir con ello deformaciones amplias, que evitan el colapso total de la estructura antes de que se complete la redistribución total de los momentos, debido a los esfuerzos que genera la energía transmitida; este tipo de refuerzo es obligatorio en regiones con alto riesgo sísmico.

Las columnas zunchadas ofrecen un confinamiento más efectivo del concreto debido a la tracción y uniformidad de trabajo que ejercen sobre el núcleo. En cualquier caso, el diámetro mínimo del refuerzo debe ser de 3/8 de pulgada.

El zuncho da una característica de soporte muy importante, ya que en lugar de producirse el colapso de la columna bajo este nivel de carga, se produce el desprendimiento de la capa de hormigón exterior al zuncho. Simultáneamente, debido al efecto de Poisson el zuncho entra en tensión produciéndose un efecto de compresión triaxial sobre el hormigón del núcleo, lo que permite que la columna resista cargas mayores. En las columnas circulares también pueden llegar a usarse estribos circulares, los cuales dependerán del criterio final tanto respecto a factores económicos como de hechura del estribo.

- Por otra parte, el segundo elemento de la columna (refuerzo longitudinal), ayuda a complementar y extender la ductilidad de la que carece el concreto, por lo que se hace necesario tener un área de acero longitudinal del 1% como mínimo, respecto al área total de la sección de la columna. Una cuantía aceptable sería de 1,5% a 3,0% para el caso de edificios un 4% de área de acero como máximo es aceptable. En las columnas circulares esta área se debe distribuir como mínimo, en 6 varillas longitudinales.

Para el caso de fallas en las columnas circulares, también se puede presentar como resultado de una falla, en el material por la fluencia inicial del acero en la cara de tensión o por el aplastamiento inicial del concreto en la cara en compresión (falla por columna corta) o por la pérdida de la estabilidad lateral estructural (falla por pandeo).

A diferencia de las columnas cuadradas que fallan de manera abrupta, las columnas circulares al alcanzar su carga nominal, el refuerzo en espiral no deja que el refuerzo longitudinal se desplace hacia afuera, debido al confinamiento, sin embargo, el concreto exterior que recubre fallará al alcanzar la carga nominal y se desprenderá, dejando al núcleo trabajando solo y aumentando de manera considerable la carga sin fallar. Aunque estas columnas alcanzan una mayor capacidad de carga, se considera que fallan al producirse este desprendimiento del recubrimiento.

“En las columnas reforzadas con espirales, estas incrementan la resistencia de la columna, debido al aumento de elasticidad que proveen. Una columna reforzada con espiral no fallará hasta que la espiral fluya o se rompa, lo cual permitiría que el concreto interior se resquebraje. El uso de espirales también incrementa el costo de las mismas por lo que estas se usan, ya sea en columnas fuertemente cargadas y en zonas sísmica debido a la gran resistencia que tienen frente a cargas dinámicas”¹⁴.

En el caso de el encofrado en columnas circulares, este suele hacerse con tubos de cartón o plástico, los que se desechan una vez el concreto ha fraguado.

2.2. Características de las columnas cuadradas

El principio de trabajo al que se expone la columna cuadrada es el de soportar específicamente cargas axiales, generadas por el peso que sostienen estas, además de los momentos generados debido a excentricidades y también para soportar fuerzas de corte generadas.

¹⁴MCCORMAC, Jack C. *Diseño de concreto reforzado*. p. 294.

Debido a su geometría, la columna cuadrada tiene una ventaja con relación a la circular y es que esta es más eficiente a la hora de soportar los momentos flectores producidos por las excentricidades, ya que estos serán soportados de una manera igual por el lado contrario al que se generen.

En lo respectivo a carga axial, la columna cuadrada da una buena resistencia, pero al compararse con una columna circular reforzada en espiral la resistencia de esta es mayor, debido a la espiral que genera una fuerza contraria proveniente de la misma espiral.

Las columnas cuadradas principalmente están conformadas por estribos, los cuales son muy efectivos para incrementar la resistencia de las mismas, estos impiden que las barras longitudinales se desplacen durante la construcción y resistan su tendencia a pandearse al estar sometidas a cargas de compresión, además de incrementar considerablemente su resistencia a corte.

En muchos casos las columnas cuadradas son preferidas con respecto a las circulares, debido a que el encofrado de una columna cuadrada, es más fácil de hacer y los gastos son menores que el de una circular.

Al aplicársele una carga hasta la falla a una columna cuadrada, se espera que parte del recubrimiento se desprenda, esto sucederá siempre y cuando los estribos no estén muy unidos, luego de esto las barras longitudinales se pandearán inmediatamente al desaparecer este soporte, una falla de este tipo ocurre de manera muy repentina, por lo que en una columna cuadrada los factores de reducción son menores.

Para el diseño de columnas cuadradas se deben tener en cuenta las excentricidades producidas por los momentos, en caso de no tener momentos o estos sean nulos, se toma una excentricidad mínima de 1 pulgada o 0,10 de la altura de la columna.

En una columna confinada con estribos, el concreto fallará por aplastamiento y por corte hacia afuera a lo largo de los planos inclinados, mientras que el acero longitudinal lo hará por pandeo hacia afuera entre los estribos. La falla producida en columnas con estribos es abrupta y total.

3. CÁLCULOS TEÓRICOS DE LA COLUMNA TÍPICA

3.1. Introducción

Para el diseño de cualquier columna, existen varios factores que se deben tener en cuenta, entre los que se pueden mencionar: la carga a resistir, el área de la misma, la cuantía de acero, la utilización de estribos, zunchos o espirales, además de cumplir con los requisitos del ACI anteriormente mencionados y determinar el comportamiento de la columna, ya sea como corta o esbelta.

3.2. Ejemplos de diseño de columnas

Un factor fundamental para el diseño de las columnas es la determinación de la forma en que estas trabajarán, ya sea como esbeltas o cortas. Para establecer si las mismas son esbeltas, se utilizan las ecuaciones 10-6 y 10-7 del ACI 318-08, las cuales serán aplicadas posteriormente en los ejemplos. “El ACI permite diseñar las columnas como columnas cortas si el efecto secundario o efecto $P\Delta$ no reduce las resistencias en más de 5%”¹⁵.

Nota: para los efectos de la numeración de varillas se tomará la nomenclatura del ACI 318-08 (versión en español y en sistema métrico). Se utilizó la barra número 10 y 13 para la realización de los ejercicios y sus características son las siguientes:

¹⁵Instituto Americano de Concreto (ACI). *ACI Sección 10.10.5*. p. 143.

Tabla I. **Numeración de varillas**

Barra No.	Diámetro nominal, mm	Área nominal mm ²
10	9,5	71
13	12,7	129

Fuente: elaboración propia.

Los números de designación de las barras aproximan el número de milímetros del diámetro nominal de la barra.

3.2.1. **Ejemplo 1 (modelo a ser ensayado)**

Diseñar una columna de sección octogonal, inscrita en un círculo de diámetro de 25 centímetros (área columna octogonal 441,94 centímetros cuadrados), con el refuerzo mínimo y cumpliendo con los requisitos de código ACI, $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ y $f_y = 2\ 800 \text{ kg/cm}^2$. Determinar carga última a soportar.

Solución:

- Calculando área de acero utilizando cuantía mínima

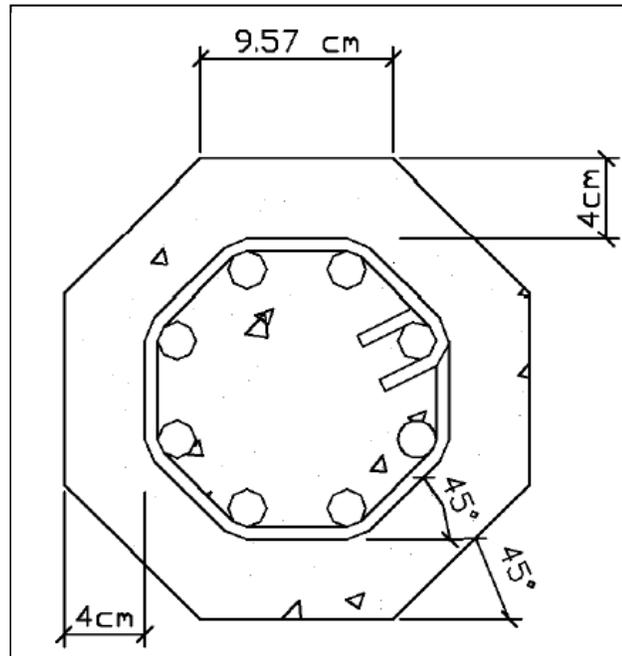
$$A_s = \rho A_g = 0,01(441,94 \text{ cm}^2) = 4,42 \text{ cm}^2$$

- Proponer armado a columna

Ya que es una columna octogonal, el estribo deberá ser de la misma forma, se colocará una varilla longitudinal en cada vértice del estribo para tener un buen soporte y amarre.

“Se utilizará un recubrimiento mínimo de 4 centímetros”.¹⁶ Por lo tanto, se propone un armado como el siguiente: 8 varillas # 3.

Figura 4. Armado de columna octogonal



Fuente: elaboración propia.

- Calcular si el área de acero utilizada cumple con la mínima requerida (ACI 10.9.1)

$$8 \text{ varillas } \# 3 \quad A_s = 8(0,71) = 5,68 \text{ cm}^2$$

Con lo que se tiene una cuantía

$$\rho = A_s / A_g = 5,68 / 441,94 = 1,29\%$$

¹⁶Instituto Americano de Concreto (ACI). *ACI Sección 10.10.5*. p. 96.

- Calcular carga a soportar por la columna (ecuación 10-2 ACI)

$$P_{n(\max)} = 0,80p[0,85f'c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$$

$\Phi P_n = 0,85$ elementos reforzados con espiral

$\Phi P_n = 0,80$ elementos con estribos

$\Phi = 0,75$ espiral y $\Phi = 0,65$ otros

Por lo tanto se tiene:

$$\Phi P_n(\max) = 0,80 * 0,65 [0,85 * 280 (441,94 - 5,68) + 2800 * 5,68]$$

$$\Phi P_n(\max) = 62261,62 \text{ kg}$$

- Calculando separación de estribos (ACI 7.10.5.2)

$$16 d_b = 16(0,95) = 15,2 \text{ cm}$$

$$48 d_{estribo} = 48(0,635) = 30,48 \text{ cm}$$

Lado menor = 25 cm

Utilizar el menor 15 cm confinamiento a $l/3$ superior e inferior a 8 cm

3.2.2. Ejemplo 2

Diseñar una columna cuadrada que tenga la misma área de la columna octogonal del ejemplo 1, con el refuerzo mínimo y cumpliendo con los requisitos de código ACI, $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ y $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$. Determinar carga última a soportar.

Solución:

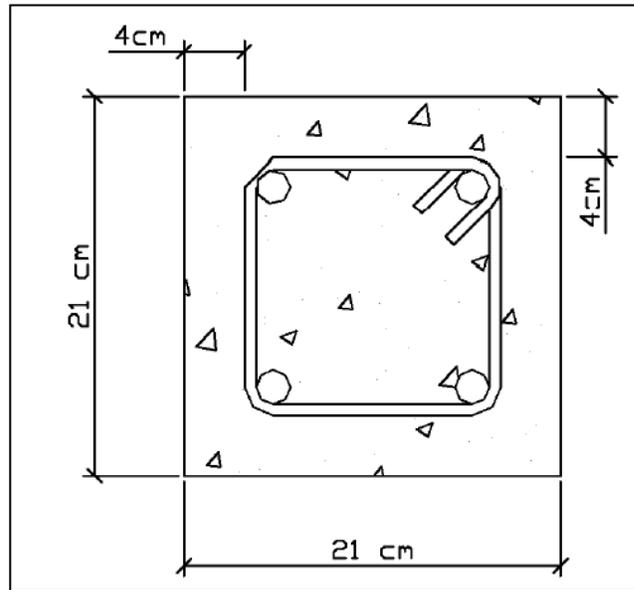
- Calculando área de acero utilizando cuantía mínima

$$A_s = \rho A_g = 0,01(441,94 \text{ cm}^2) = 4,42 \text{ cm}^2$$

- Proponer armado a columna

Para que la columna sea cuadrada y cumpla con el área de 441,94 centímetro, se tendrá una columna cuadrada de 21x21centímetros de lado, con lo que el área es de 441 centímetros cuadrados. Ya que es una columna cuadrada se colocarán 4 varillas una en cada esquina, lo cual es lo mínimo (ACI 10.9.2). Se utilizará un recubrimiento mínimo de 4 centímetros (ACI 7.7.1). Por lo tanto, se propone un armado como el siguiente:

Figura 5. Armado de columna cuadrada



Fuente: elaboración propia.

4 varillas # 4

- Calcular si el área de acero utilizada cumple con la mínima requerida (ACI 10.9.1)

$$4 \text{ varillas } \# 4 \text{ } A_s = 4(1,29) = 5,16 \text{ cm}^2$$

Con lo que se tiene una cuantía

$$\rho = A_s / A_g = 5,16 / 441,94 = 1,17\%$$

- Calcular carga a soportar por la columna (ecuación 10-2 ACI)

$$\Phi P_{n(\max)} = 0,80 \Phi [0,85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$$

$$\Phi P_n = 0,85 \text{ elementos reforzados con espiral}$$

$\Phi P_n = 0,80$ elementos con estribos

$\Phi = 0,75$ espiral y $\Phi = 0,65$ otros

Por lo tanto se tiene:

$\Phi P_{n(max)} = 0,80 * 0,65 [0,85 * 280 (441,94 - 5,16) + 2 * 800 * 5,16]$

$\Phi P_{n(max)} = 65 293,30 \text{ kg}$

- Calcular separación de estribos (ACI 7.10.5.2)

$16d_b = 16(1,27) = 20,32 \text{ cm}$

$48d_{estribo} = 48(0,635) = 30,48 \text{ cm}$

Lado menor = 21 cm

Utilizar el menor a 21 centímetros confinamiento a 1/3 superior e inferior a 10 centímetros.

3.2.3. Ejemplo 3

Diseñar una columna circular que tenga la misma área de la columna octogonal del ejemplo 1, con el refuerzo mínimo y cumpliendo con los requisitos de código ACI, $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ y $f_y = 2 800 \text{ kg/cm}^2$. Determinar carga última a soportar.

Solución:

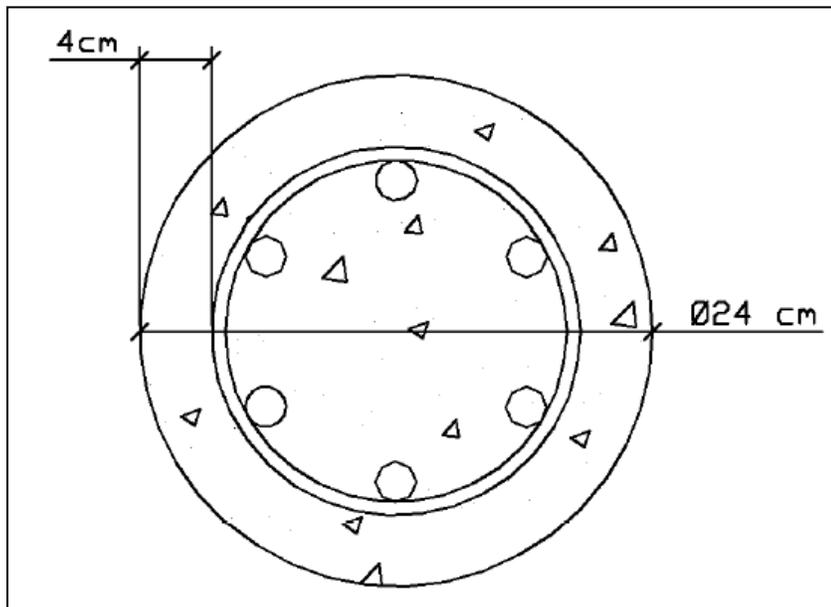
- Calculando área de acero utilizando cuantía mínima

$A_s = \rho A_g = 0,01(441,94 \text{ cm}^2) = 4,42 \text{ cm}^2$

- Proponer armado a columna

Para que la columna sea circular y cumpla con el área de 441,94 centímetros se tendrá una columna circular de diámetro de 24 centímetros, con lo cual el área es de 452 centímetros cuadrados. Ya que es una columna circular el mínimo de varillas son 6 (ACI 10.9.2). Se utilizará un recubrimiento mínimo de 4 centímetros (ACI 7.7.1). Por lo tanto, se propone un armado como el siguiente:

Figura 6. **Armado de columna circular**



Fuente: elaboración propia.

6 varillas # 4

- Calcular si el área de acero utilizada cumple con la mínima requerida (ACI 10.9.1)

$$6 \text{ varilla } \# 4 \quad A_s = 6(1,29) = 7,74 \text{ cm}^2$$

Con lo que se tiene una cuantía

$$\rho = A_s/A_g = 7,74/441,94 = 1,71\%$$

- Calcular carga a soportar por la columna (ecuación 10-1 ACI)

$$\Phi P_{n(\max)} = 0,85 \Phi [0,85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$$

$$\Phi P_n = 0,85 \text{ elementos reforzados con espiral}$$

$$\Phi P_n = 0,80 \text{ elementos con estribos}$$

$$\Phi = 0,75 \text{ espiral y } \Phi = 0,65 \text{ otros}$$

Por lo tanto se tiene:

$$\Phi P_{n(\max)} = 0,85 * 0,75 [0,85 * 280(441,94 - 7,74) + 2 \cdot 800 * 7,74]$$

$$\Phi P_{n(\max)} = 81 \, 280,42 \text{ kg}$$

- Calculando separación de estribos (ACI 7.10.5.2)

$$16d_b = 16(1,27) = 20,32 \text{ cm}$$

$$48d_{\text{estribo}} = 48(0,635) = 30,48 \text{ cm}$$

Lado menor = 24 cm

Utilizar el menor a 21 centímetros confinamiento a 1/3 superior e inferior a 10 centímetros.

3.2.4. Ejemplo 4

Para la columna del ejemplo 2, chequear si la misma es esbelta o no. Utilizar una altura de 2,50 metros.

Solución:

- Chequeando esbeltez (ACI 10.10.1)

Una columna es corta si $\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 22$ donde $k = 1$ por estar articulada en ambos lados.

r = radio de giro

$r = 0,30 h$ columnas cuadradas y $0,25$ del diámetro de la columna circulares.

Con lo que se obtiene:

$$\frac{k \cdot l_u}{r} = \frac{1 \cdot 2,5}{0,25 \cdot 0,21} = 47 > 22$$

Por lo tanto, la columna trabajará como esbelta.

3.2.5. Ejemplo 5

Para la columna del ejemplo 3, chequear si la misma es esbelta o no. Utilizar una altura de 2,50 metros.

Solución:

- Chequeando esbeltez (ACI 10.10.1)

Una columna es corta si $\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 22$ donde $k=1$ por estar articulada en ambos lados.

r = radio de giro

$r = 0,30 h$ columnas cuadradas y $0,25$ del diámetro de la columna en circulares.

Con lo que se obtiene:

$$\frac{k \cdot l_u}{r} = \frac{1 \cdot 2,5}{0,25 \cdot 0,24} = 41,66 > 22$$

Por lo tanto, la columna trabajará como esbelta.

Nota: se observa que las columnas tanto del ejemplo 2 como del ejemplo 3 son esbeltas, pero las mismas fueron diseñadas como cortas considerando que el efecto secundario generado en estas no será mayor al 5%.

3.2.6. Ejemplo 6

Encontrar la resistencia a corte de una columna circular de diámetro de 25 centímetros, si la carga axial mayorada es de 50 000 kilogramos, $f'_c = 280$ kilogramos sobre centímetro cuadrado, $f_y = 2 800$ kilogramos sobre centímetro cuadrado y estribos No. 2 con un espaciamiento de 8 centímetros.

Solución:

- Resistencia al cortante proporcionada por el concreto en elementos no preesforzados sometidos a compresión (ACI 11.2.1.2).

$$V_c = 0,53 \left(1 + \frac{Nu}{140A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} * b_w *$$

$$V_c = 0,53 \left(1 + \frac{50,000}{140 * 490,87} \right) 1 * \sqrt{280} * 25 * 22 = 8\,426,59 \text{ kg}$$

- Resistencia al cortante proporcionada por el refuerzo (ACI 11.4.7.2)

$$V_s = \frac{A_v * f_{yt} * d}{s}$$

Donde $d = 0,80$ veces el diámetro de la sección (ACI 11.2.3)

$$V_s = 0,71 * 2\,800 * (0,80 * 25) / 8 = 4\,970 \text{ kg}$$

$V_n =$ Resistencia nominal a corte del elemento

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_n = 8\,427 + 4\,970 = 13\,397 \text{ kg}$$

4. ENSAYOS Y PROCEDIMIENTOS REALIZADOS

4.1. Ensayo de asentamiento o slump

El objetivo principal de este ensayo es determinar la manejabilidad del concreto fresco. La manejabilidad es una de las propiedades más importantes del concreto en estado fresco y ha tenido diversas concepciones entre las que resaltan:

- Según el comité de la ACI 211, se considera como aquella propiedad del concreto mediante la cual se determina su capacidad para ser colocado y consolidado apropiadamente.
- Según el Road Research Laboratory queda definida como la cantidad de trabajo interno para producir una compactación completa.
- Se define también como el grado de facilidad o dificultad con que el concreto puede ser mezclado, manejado, colocado, transportado y terminado sin que pierda su homogeneidad.

4.1.1. Equipo

- Molde o cono de Abrams

La muestra debe elaborarse en un molde resistente al ataque de la pasta de cemento.

El calibre mínimo del metal debe ser No.16; si el molde se ha elaborado mediante el proceso de repujado ningún punto de pared de este debe tener un espesor menor de 1,14 milímetros. El molde debe tener la forma de la superficie lateral de un tronco de cono de 203 milímetros +- 3,0 milímetros de altura. Las bases deben ser abiertas, paralelas entre sí y perpendiculares al eje del cono.

El molde debe proveerse de agarraderas y dispositivos para sujetarlo con los pies. El molde puede fabricarse con costuras o sin estas. Cuando una costura se requiera, esta se debe hacer. El interior del molde debe estar libre de abolladuras y ser relativamente liso, sin protuberancias, tales como remaches salientes.

Figura 7. **Cono de Abrams**



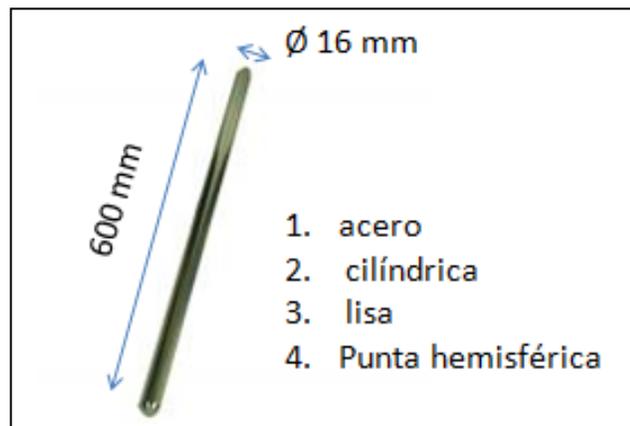
Fuente: <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/ensayo-compresin-de-cilindros-de.html>. Consulta: mayo de 2012.

- Varilla compactadora

La muestra debe elaborarse en un molde resistente al ataque de la pasta de cemento. Debe ser de acero, cilíndrica, lisa, de 16 milímetros de diámetro y con una longitud aproximada de 600 milímetros; el extremo compactador debe ser hemisférico de 16 milímetros de diámetro.

Se utiliza para compactar el concreto en preparación para la prueba de revenimiento y preparar los especímenes cilíndricos, así como, en la realización de pruebas de contenido de aire. Hecho de acero galvanizado.

Figura 8. **Varilla compactadora**

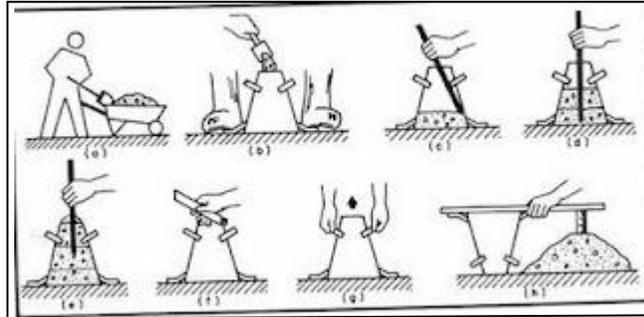


Fuente: <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/ensayo-compresin-de-cilindros-de.html>. Consulta: mayo de 2012.

4.1.2. Procedimiento

- El molde se coloca sobre una superficie plana no absorbente, con la abertura más pequeña hacia arriba. Posteriormente, el molde se presiona hacia abajo, cogiendo las agarraderas, con el objeto de que al colocar la mezcla, esta no se salga por la parte inferior del molde.
- Se llena el cono en 3 capas, cada una aproximadamente con una tercera parte del volumen total del molde. Cada capa se apisona 25 veces con una varilla lisa de 16 milímetros de diámetro y más o menos 60 centímetros de largo. La introducción de la varilla se debe hacer en diferentes sitios de la superficie con el fin de que la compactación sea homogénea en la sección transversal.
- Después de realizar el apisonamiento en la última capa, es necesario alisarse a ras la superficie; luego, se quita la mezcla que cayó al suelo alrededor de la base del molde, dejando limpia la zona aledaña.
- Inmediatamente después se retira el molde, alzándolo cuidadosamente en dirección vertical sin movimientos circulares o laterales y sin tocar la mezcla con el molde cuando este se haya separado del concreto fresco.
- Se mide la diferencia de altura entre el molde y del concreto fresco asentado, valor que será determinante de la consistencia del concreto ensayado.

Figura 9. **Procedimiento del ensayo de asentamiento**



Fuente: <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/ensayo-compresin-de-cilindros-de.html>. Consulta: mayo de 2012.

4.2. **Ensayo de cilindros**

El objetivo fundamental de este ensayo es determinar el aguante a compresión del concreto. La que será utilizada para estimar la resistencia total de la columna.

4.2.1. **Equipo**

- Cilindro

Molde de acero o hierro fundido que tiene 15 centímetros de diámetro y 30 centímetros de altura.

- Varilla compactadora

La misma utilizada en el ensayo de asentamiento.

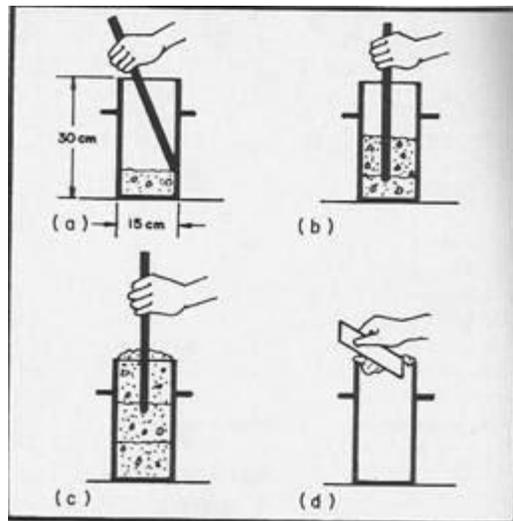
- Martillo de hule o caucho

4.2.2. Procedimiento

- Aceitar el interior del cilindro para evitar que el concreto se adhiera al metal.
- El cilindro se llena en tres capas de igual altura y cada capa se apisona con una varilla lisa de 16 milímetros de diámetro, con uno de sus extremos redondeados; la varilla se hunde 25 veces por capa en diferentes sitios de la superficie del concreto. Al final de la compactación, se completa el llenado del molde con más mezcla y se alisa la superficie con la ayuda del palustre.
- Cuando las capas se han llenado, se dan unos golpes con un martillo de caucho o con la misma varilla con el objeto de eliminar las burbujas de aire que se hayan podido adherir al molde o hayan quedado embebidas en el molde.
- Luego, los cilindros deben quedar en reposo, en sitio cubierto y protegidos de cualquier golpe o vibración y al día siguiente se les quita el molde cuidadosamente.
- Después de remover el molde, los cilindros deben ser sometidos a un proceso de curado en tanques con agua de cal o en un cuarto de curado a 21 – 25 grados Celsius, con el fin de evitar la evaporación del agua que contiene el cilindro por la acción del aire o del sol y el desarrollo de la resistencia se lleve a cabo en condiciones constantes a través del tiempo.

- La resistencia a la compresión de los cilindros se mide con una prensa que aplica carga sobre la superficie superior del cilindro.

Figura 10. **Procedimiento de llenado de cilindros**



Fuente: <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/ensayo-compresin-de-cilindros-de.html>. Consulta: mayo de 2012.

4.3. **Ensayo de peso volumétrico**

El objetivo de este ensayo es determinar el peso volumétrico o unitario del concreto. Este servirá para verificar si el concreto cumple con un peso volumétrico normal o no.

4.3.1. Equipo

- Tara o recipiente

El cual debe tener un volumen definido.

- Varilla Compactadora

La misma utilizada en el ensayo de asentamiento.

- Martillo de hule o caucho
- Balanza

4.3.2. Procedimiento

- Pesar la tara o el recipiente.
- Llenarla en tres capas de igual altura y cada capa se apisona con una varilla lisa de 16 milímetros de diámetro, con uno de sus extremos redondeados; la varilla se hunde 25 veces por capa en diferentes sitios de la superficie del concreto. Al final de la compactación, se completa el llenado del molde con más mezcla y se alisa la superficie con la ayuda del palustre.
- Cuando las capas se han llenado, se dan unos golpes con un martillo de caucho o con la misma varilla con el objeto de eliminar las burbujas de aire que se hayan podido adherir al molde o hayan quedado embebidas en el molde.

- Se vuelve a pesar la tara sólo que ahora con el material.
- Se encuentra la diferencia de pesos entre la tara vacía y llena para determinar el peso del concreto, el cual luego se divide dentro del volumen de la tara para obtener su peso específico.

4.4. Ensayo a compresión columnas octogonales (propuesto)

El objetivo principal de este ensayo es determinar la resistencia a la compresión, del modelo propuesto de columnas de sección octogonales, para tener una referencia de comparación con las columnas cuadradas y circulares.

4.4.1. Equipo

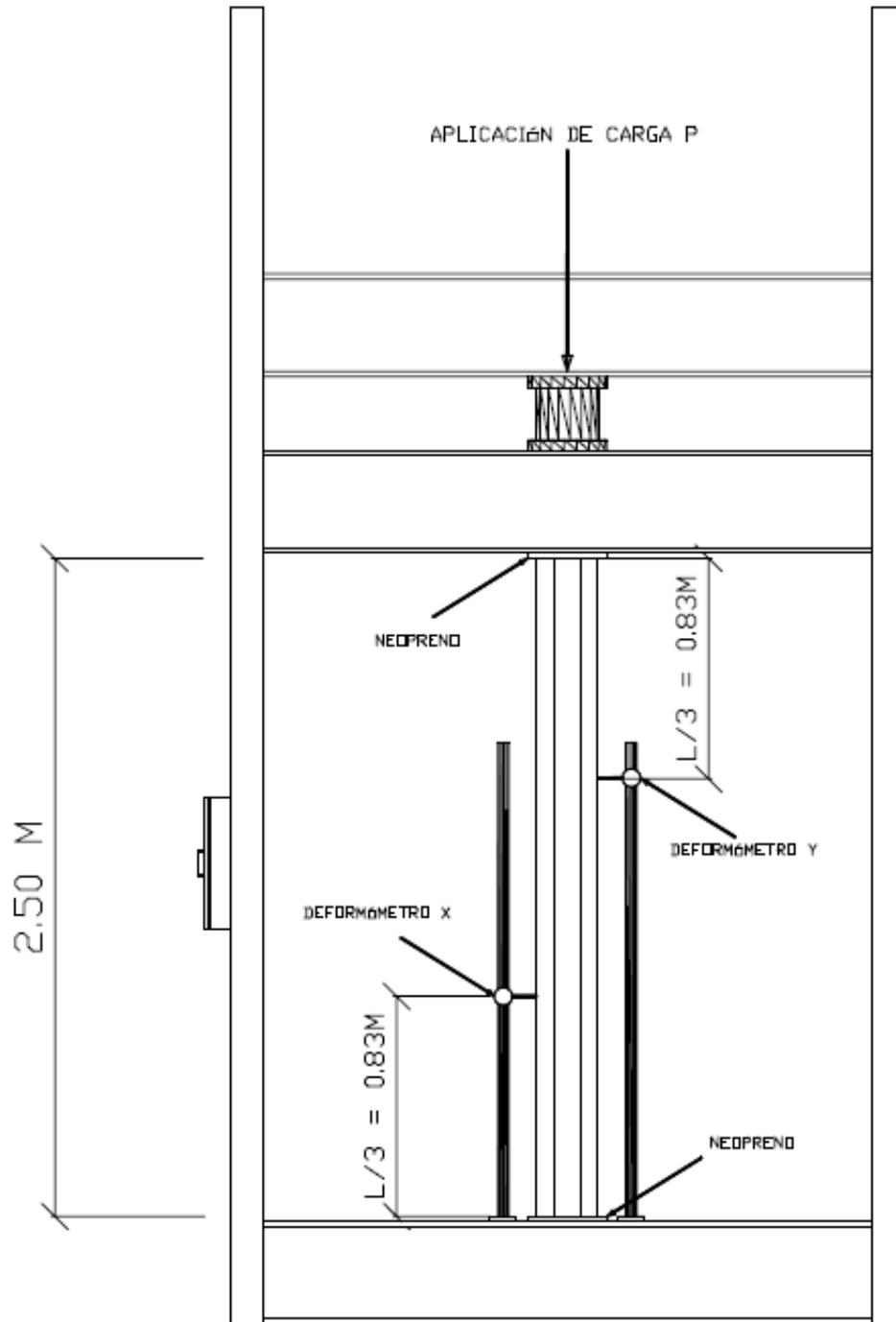
- Tara o recipiente prensa o máquina para aplicar carga
- 3 deformómetros
- Neopreno

4.4.2. Procedimiento

- Acomodar la columna verticalmente dentro de la prensa y luego colocar neopreno tanto en la parte superior como inferior, esto para asegurar que la fuerza es aplicada uniformemente sobre la superficie.
- Se colocan los tres deformómetros, uno a cada tercio de la columna y otro en el centro de la misma. Estos son aplicados uno en el eje y, otro en el eje x; y el otro en una cara transversal de la columna.

- Se marcan grietas existentes en la columna.
- Se procede a la aplicación de ciclos de carga y descargar de 10 000 en 10 000 libras, aumentando 10 000 libras en cada carga hasta llegar a la falla.
- Cada 10 000 libras se toman lecturas de los deformómetros para examinar el comportamiento ante la aplicación de carga a la columna.
- Se marcan las grietas a la falla.

Figura 11. **Ensayo a compresión de columna octogonal**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Ensayo a corte de columnas octogonales (propuesto)

El objetivo principal de este ensayo es determinar la resistencia a corte y el comportamiento de los estribos ante la aplicación de la fuerza de cortante, del modelo propuesto de columnas octogonales.

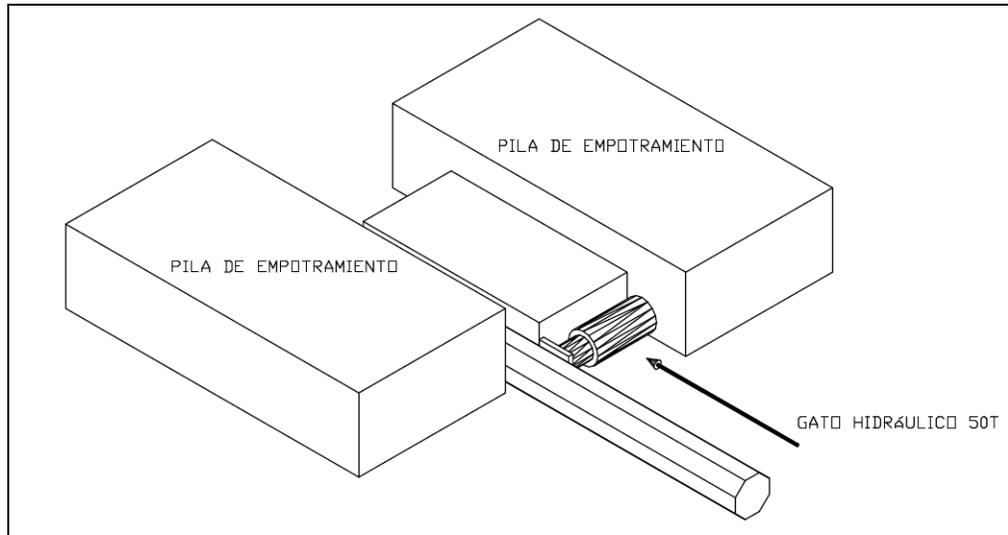
4.5.1. Equipo

- Gato hidráulico de 50 toneladas
- Pilas de empotramiento

4.5.2. Procedimiento

- Empotrar la columna octogonal en su parte inferior, debe quedar segura y sin movimiento ante la aplicación de una fuerza.
- Colocar el gato en la posición en la cual se desee obtener el valor de corte resistente, en el caso del ensayo en el área confinada.
- Se marcan grietas existentes en la columna.
- Se procede a la aplicación de carga hasta la falla.
- Se marcan las grietas a la falla.

Figura 12. **Ensayo a corte de columna octogonal**



Fuente: elaboración propia.

4.6. **Ensayo a corte de columna cuadrada (propuesto)**

El objetivo principal de este ensayo es determinar la resistencia a corte y el comportamiento de los estribos ante la aplicación de la fuerza de cortante, de una columna cuadrada para hacer comparaciones respecto a los datos obtenidos con las columnas octogonales.

4.6.1. **Equipo**

- Gato hidráulico de 50 toneladas
- Pilas de empotramiento

4.6.2. Procedimiento

- Empotrar la columna cuadrada en su parte inferior, debe quedar segura y sin movimiento ante la aplicación de una fuerza.
- Colocar el gato en la posición en la cual se desee obtener el valor de corte resistente, en el caso del ensayo en el centro de la misma ya que esta en su totalidad es confinada.
- Se marcan grietas existentes en la columna.
- Se procede a la aplicación de carga hasta la falla.
- Se marcan las grietas a la falla.

5. RESULTADOS

5.1. Ensayo de cilindros a compresión

Transcurridos 28 días, se ensayaron los 2 cilindros a compresión y se tuvieron las siguientes cargas:

- Cilindro A

Dimensiones: $d_1 = 15,50$ cm, $d_2 = 15,90$ cm, $d_3 = 16,50$ cm, $d_m = 15,97$ cm

Longitud= 29,7 cm

Carga soportada= 31 250 lb = 14 174,76 kg

Área: $200,31$ cm² = 31,05 pulg²

Resistencia= $14\ 174,76$ kg / $200,31$ cm² = $70,76$ kg/ cm² = 1 006,44 psi

- Cilindro B

Dimensiones: $d_1 = 15,15$ cm, $d_2 = 15,09$ cm, $d_3 = 15,20$ cm, $d_m = 15,15$ cm

Longitud= 30 cm

Carga soportada= 33 750 lb = 15 308,74 kg

Área: $188,69$ cm² = 27,94 pulg²

Resistencia= $14\ 174,76$ kg / $200,31$ cm² = $81,13$ kg/ cm² = 1 207,95 psi

5.2. Ensayo de peso volumétrico

Se midió el volumen del recipiente y el peso respectivo del material y el resultado fue el siguiente:

- El recipiente tenía un diámetro de 20 centímetros y una altura de 21 centímetros, su volumen fue de 0,0066 metros cúbicos.
- Peso de tara= 4 kilogramos
- Peso material + tara= 20 kilogramos
- Peso material= 20 kg–4 kg= 16 kg
- Peso volumétrico= 16 kg / 0,0066 m³= 2 425,22 kg

5.3. Ensayo a compresión de columnas octogonales (propuesto)

Se ensayaron 2 columnas de sección octogonal, cabe resaltar que se obtuvo una falla por aplastamiento, dándose un descascamiento en la parte inferior y provocando que el refuerzo longitudinal comenzara a abrirse y fluyera.

Del ensayo se obtuvieron tablas y gráficas para determinar su comportamiento, las cuales se muestran a continuación:

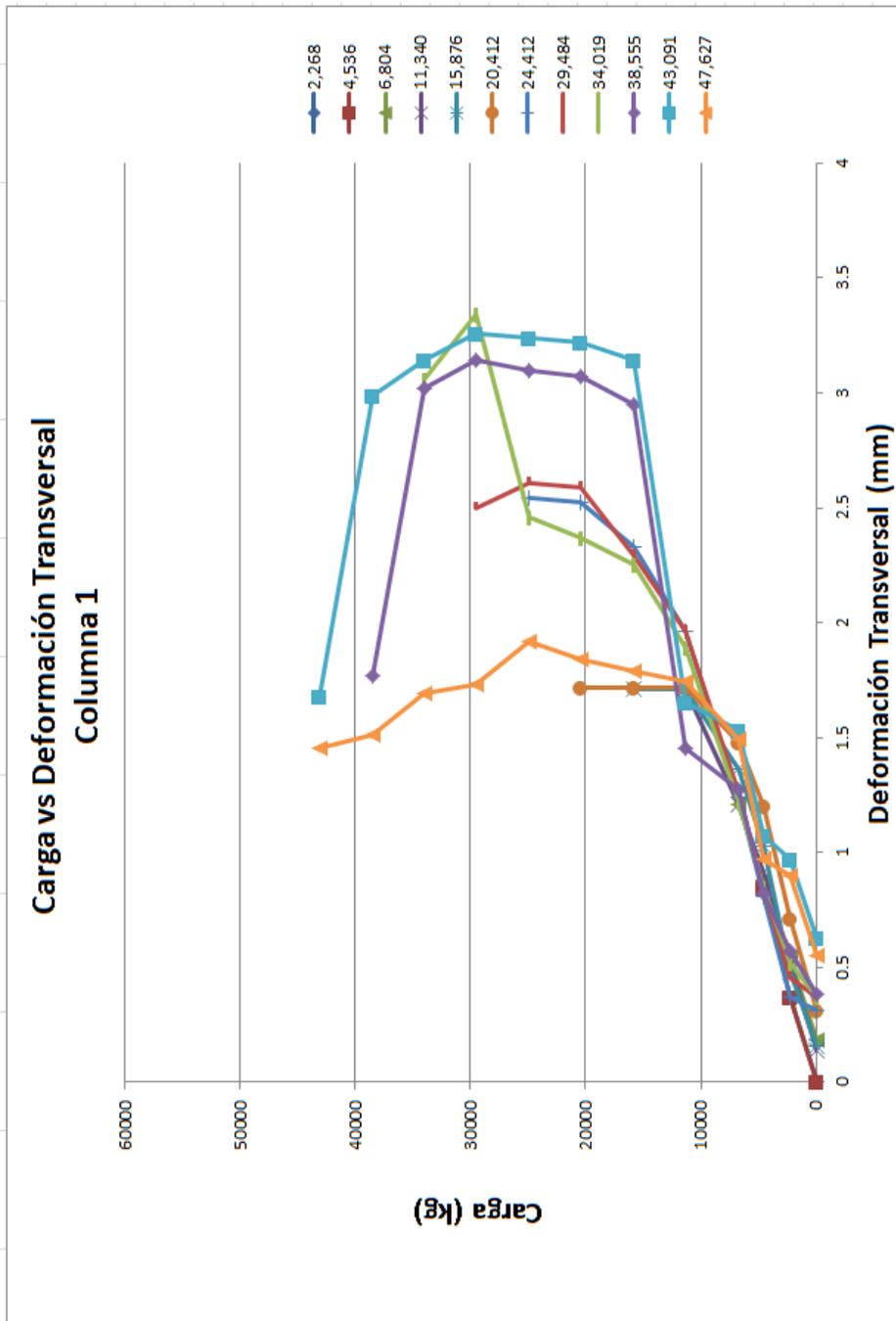
Columna 1

Tabla II. **Lecturas de deformómetro transversal de columna 1**

Carga	2 268	4 536	6 804	11 340	15 876	20 412	24 948	29 484	34 019	38 555	43 091	47 627
0	0	0	0,18	0,14	0,16	0,31	0,31	0,37	0,37	0,38	0,63	0,55
2 268	0,37	0,37	0,54	0,51	0,48	0,71	0,37	0,455	0,52	0,57	0,97	0,9
4 536		0,85	0,88	0,91	1,03	1,2	0,81	0,84	0,845	0,82	1,07	0,97
6 804			1,21	1,21	1,36	1,48	1,24	1,26	1,22	1,27	1,53	1,49
11 340				1,71	1,71	1,715	1,96	1,96	1,89	1,45	1,65	1,74
15 876					1,71	1,715	2,33	2,29	2,25	2,95	3,14	1,79
20 412						1,715	2,52	2,59	2,37	3,07	3,22	1,84
24 948							2,54	2,61	2,46	3,1	3,24	1,92
29 484								2,5	3,34	3,14	3,26	1,73
34 019									3,06	3,02	3,14	1,69
38 555										1,77	2,99	1,51
43 091											1,68	1,45
47 627												

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Carga versus deformación transversal de columna 1**



Fuente: elaboración propia.

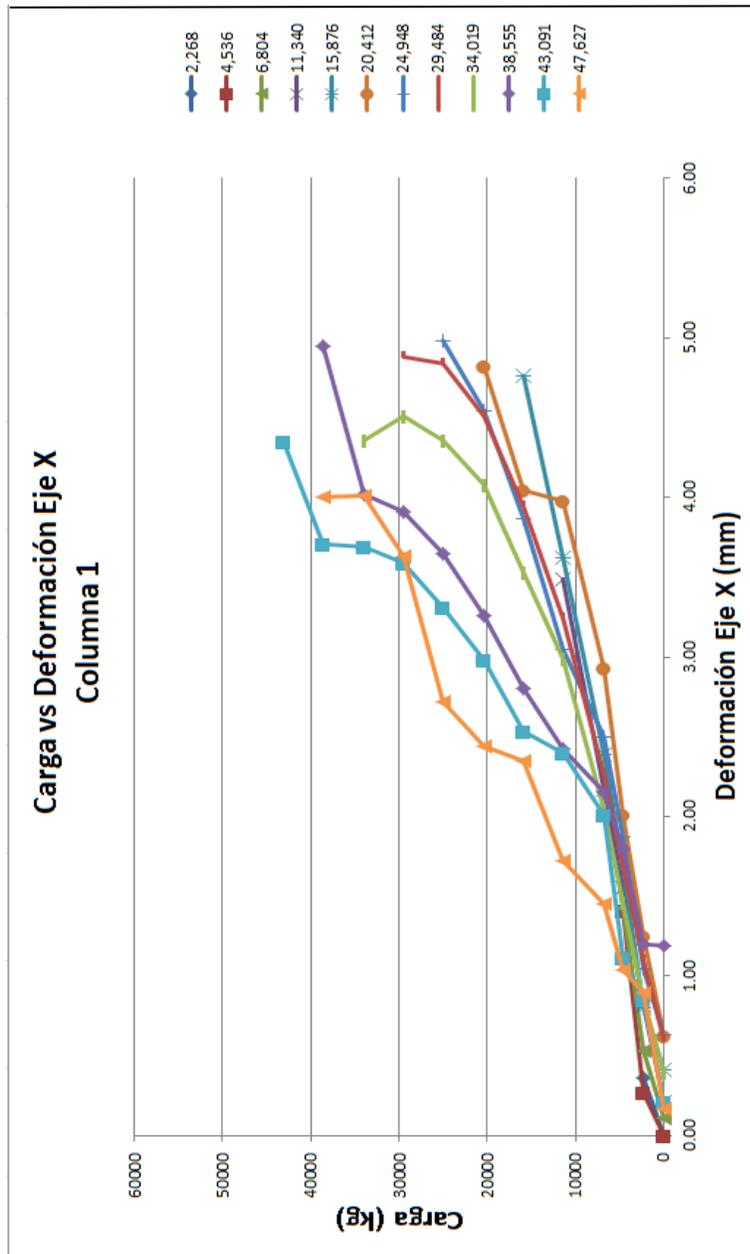
Se observa una deformación proporcional hasta alcanzar un valor de 12 000 kilogramos, luego de esto la deformación tiende a ser mayor y cercana a alcanzar la carga de falla esta regresa la mitad de la deformación máxima alcanzada.

Tabla III. **Lecturas de deformómetro eje x de columna 1**

Carga (kg)	2 268	4 536	6 804	11 340	15 876	20 412	24 948	29 484	34 019	38 555	43 091	47 627
0	0,00	0,00	0,11	0,21	0,41	0,62	0,63	0,60	0,40	1,19	0,21	0,17
2268	0,36	0,27	0,53	0,82	0,80	1,25	1,05	1,10	0,85	1,20	0,85	0,89
4536		1,41	1,43	1,55	1,69	2,01	1,87	1,69	1,46	1,80	1,11	1,04
6804			2,16	2,17	2,39	2,93	2,50	2,26	2,04	2,15	2,01	1,45
11340				3,49	3,62	3,98	3,05	3,24	2,99	2,42	2,40	1,72
15876					4,76	4,04	3,87	3,94	3,53	2,80	2,53	2,35
20412						4,82	4,54	4,51	4,08	3,26	2,98	2,44
24948							4,98	4,84	4,36	3,65	3,31	2,72
29484								4,88	4,51	3,91	3,59	3,63
34019									4,36	4,02	3,69	4,01
38555										4,95	3,71	4,00
43091											4,35	
47627												

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Carga versus deformación de eje x de columna 1**



Fuente: elaboración propia.

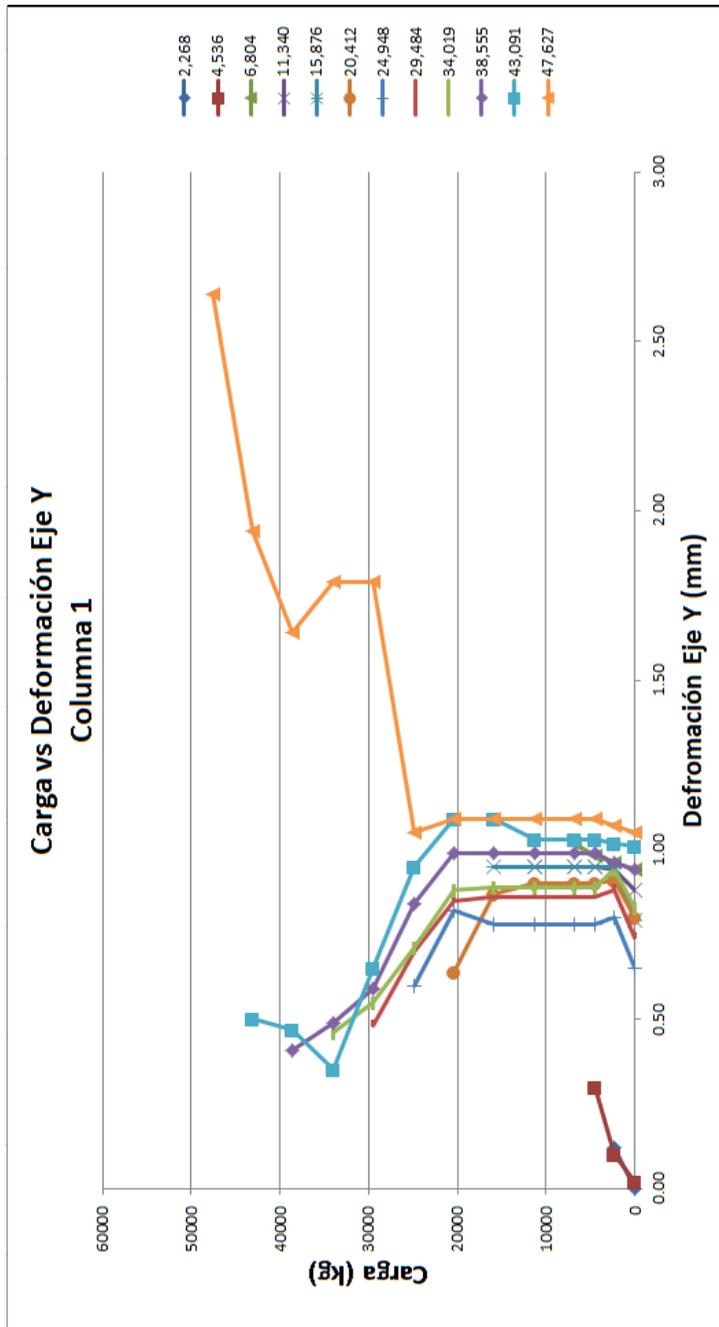
La deformación actúa proporcional hasta una carga de 15 000 kilogramos siendo esta la deformación máxima, luego de esto la deformación para esa misma carga es mucho menor y sigue aumentando en un menor rango proporcionalmente hasta alcanzar la falla.

Tabla IV. **Lecturas de deformómetro de eje y de columna 1**

Carga (kg)	2 268	4 536	6 804	11 340	15 876	20 412	24 948	29 484	34 019	38 555	43 091	47 627
0	0,00	0,02	0,94	0,88	0,79	0,80	0,65	0,74	0,83	0,94	1,01	1,05
2268	0,12	0,10	0,96	0,94	0,95	0,91	0,80	0,88	0,94	0,96	1,02	1,07
4536		0,30	0,98	0,95	0,95	0,90	0,78	0,86	0,89	0,99	1,03	1,09
6804			1,02	0,95	0,95	0,90	0,78	0,86	0,89	0,99	1,03	1,09
11340				0,95	0,95	0,90	0,78	0,86	0,89	0,99	1,03	1,09
15876					0,95	0,87	0,78	0,86	0,89	0,99	1,09	1,09
20412						0,64	0,82	0,85	0,88	0,99	1,09	1,09
24948							0,60	0,70	0,71	0,84	0,95	1,05
29484								0,48	0,55	0,59	0,65	1,79
34019									0,46	0,49	0,35	1,79
38555										0,41	0,47	1,64
43091											0,50	1,94
47627												2,64

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Carga versus deformación de eje y de columna 1**



Fuente: elaboración propia.

Se empieza con una deformación inicial hasta que la columna realmente se asienta y después de esto no se observa mayor deformación, hasta llegar a 45 000 kilogramos en donde esta deformación tiende a irse en sentido opuesto de donde inicio (deformación leve) se observa que ya al estar fallada la columna, la deformación sigue el rumbo inicial y tiende a hacerse demasiado grande.

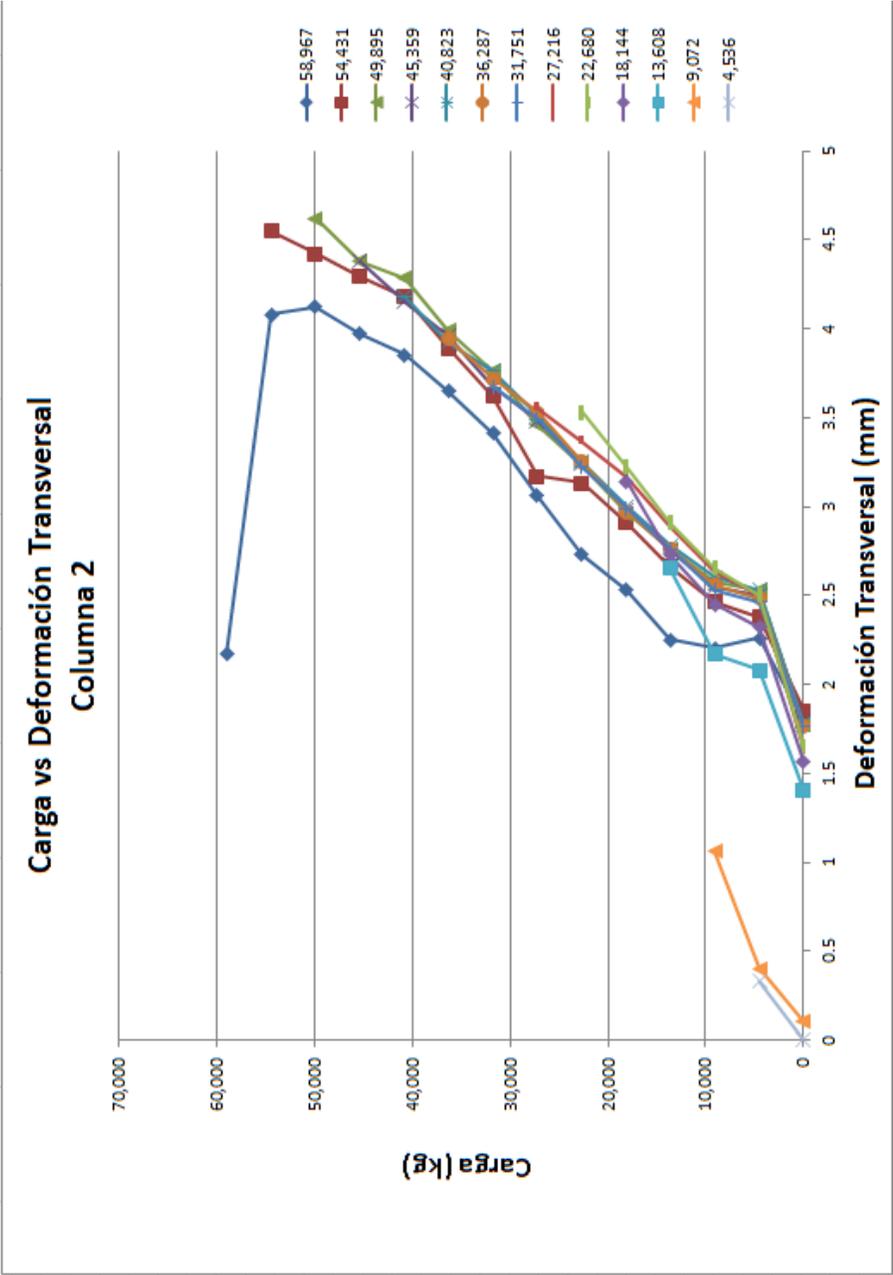
Columna 2

Tabla V. **Lecturas de deformómetro transversal de columna 2**

Carga (kg)	4 536	9 072	13 608	18 144	22 680	27 216	31 751	36 287	40 823	45 359	49 895	54 431	58 967
0	0	0,1	1,4	1,56	1,65	1,64	1,76	1,76	1,77	1,79	1,77	1,85	1,79
4 536	0,33	0,4	2,08	2,32	2,5	2,5	2,46	2,48	2,53	2,5	2,53	2,38	2,26
9 072		1,06	2,17	2,45	2,65	2,63	2,53	2,56	2,6	2,55	2,57	2,46	2,2
13 608			2,65	2,73	2,91	2,89	2,76	2,76	2,78	2,75	2,76	2,66	2,25
18 144				3,14	3,22	3,16	2,99	2,97	3	2,98	2,96	2,91	2,53
22 680					3,53	3,36	3,22	3,25	3,25	3,24	3,23	3,13	2,73
27 216						3,55	3,49	3,53	3,51	3,48	3,46	3,17	3,06
31 751							3,67	3,72	3,76	3,67	3,76	3,62	3,41
36 287								3,94	3,92	3,96	3,99	3,89	3,65
40 823									4,18	4,15	4,28	4,18	3,85
45 359										4,38	4,38	4,29	3,97
49 895											4,62	4,42	4,12
54 431												4,55	4,08
58 967													2,17

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Carga versus deformación de eje transversal de columna 2



Fuente: elaboración propia.

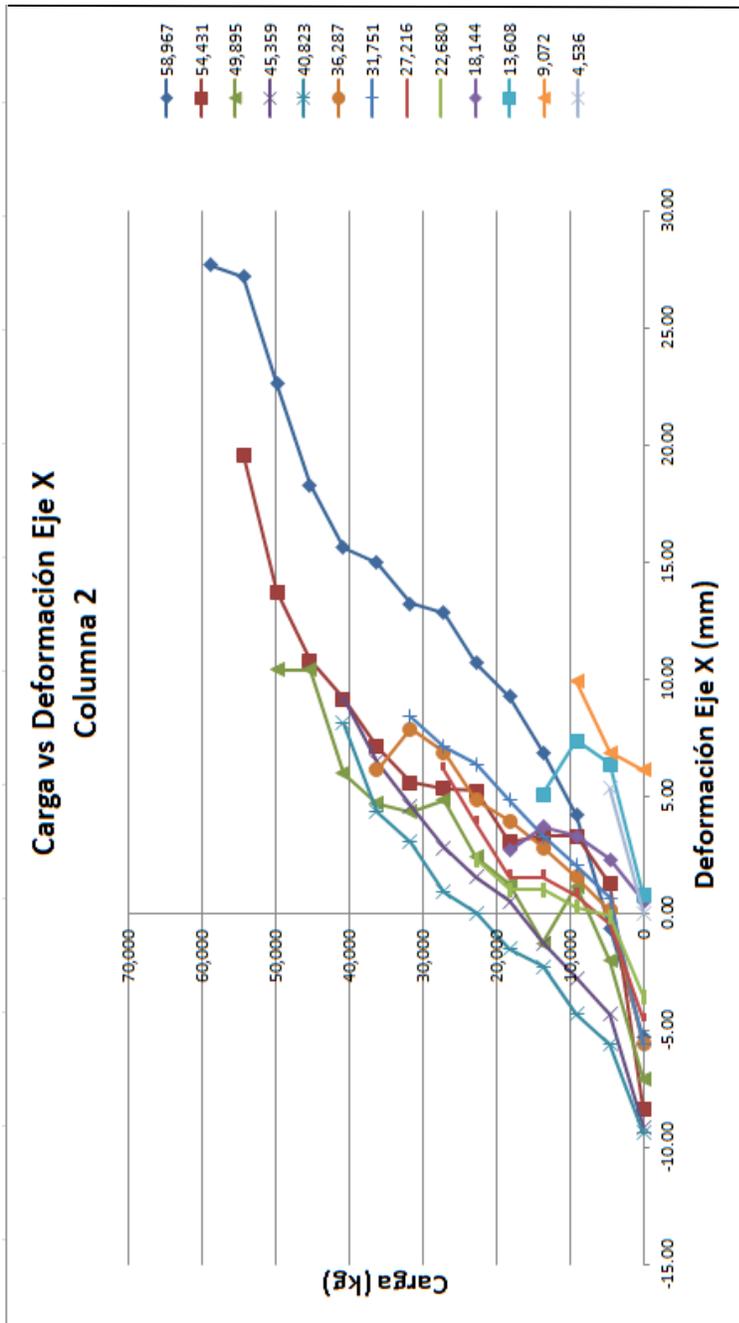
Se observa un asentamiento inicial y luego una deformación que se mantiene proporcional hasta la falla.

Tabla VI. **Lecturas de deformómetro de eje x de columna 2**

Carga (kg)	4	9	13	18	22	27	31	36	40	45	49	54	58
	536	072	608	144	680	216	751	287	823	359	895	431	967
0	0,00	6,10	0,76	0,51	-3,56	-4,57	-5,59	-5,59	-9,40	-9,14	-7,11	-8,38	-5,33
4 536	5,33	6,86	6,35	2,29	-0,13	-0,51	0,64	0,13	-5,59	-4,32	-2,03	1,27	-0,63
9 071		9,91	7,37	3,30	0,25	0,76	2,03	1,52	-4,32	-2,79	1,14	3,30	4,19
13 607			5,08	3,68	1,02	1,52	3,30	2,79	-2,29	-1,27	-1,27	3,30	6,86
18 142				2,67	1,02	1,52	4,83	3,94	-1,52	0,51	1,27	3,05	9,27
22 678					2,29	3,81	6,35	4,83	0,00	1,52	2,41	5,21	10,67
27 214						6,10	7,11	6,86	0,89	2,79	4,83	5,33	12,83
31 749							8,38	7,87	3,05	4,57	4,32	5,59	13,21
36 285								6,10	4,32	6,48	4,70	7,11	14,99
40 820									8,13	9,14	5,97	9,14	15,62
45 356										9,40	10,41	10,80	18,29
49 892											10,41	13,72	22,61
54 427												19,56	27,18
58 963													27,69

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Carga versus deformación de eje x de columna 2**



Fuente: elaboración propia.

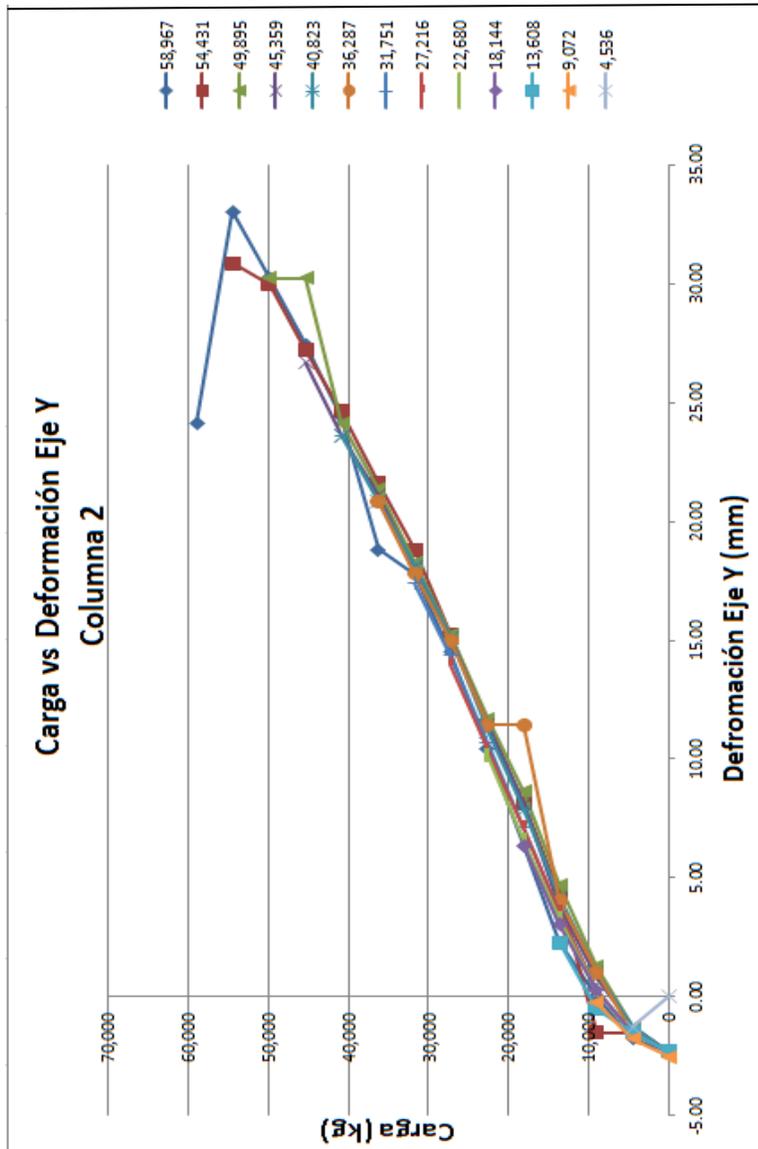
Se observa que la columna sufre de un leve asentamiento y luego de este, se tiene una formación en sentido contrario al inicial en el punto de aplicación de la primera carga, luego de esto la carga asiende proporcionalmente, hasta llegar a la carga de falla donde esta doformación se asentúa.

Tabla VII. **Lecturas de deformómetro de eje y de columna 2**

Carga (kg)	4	9	13	18	22	27	31	36	40	45	49	54	58
	536	072	608	144	680	216	751	287	823	359	895	431	967
0	0,00	-2,54	-2,29	-2,29	-2,29	-2,29	-2,29	-2,29	-2,29	-2,29	-2,29	-2,29	-2,29
4 536	-1,27	-1,78	-1,52	-1,52	-1,52	-1,52	-1,52	-1,52	-1,27	-1,27	-1,27	-1,52	-1,78
9 072		-0,25	-0,51	0,25	0,25	0,25	0,25	1,02	1,02	0,76	1,27	-1,52	0,00
13 608			2,29	3,05	3,30	3,56	3,56	4,06	4,19	3,81	4,70	4,32	2,29
18 144				6,35	6,60	7,11	7,11	11,43	7,87	8,13	8,64	8,13	6,35
22 680					10,16	10,41	10,67	11,43	11,18	11,43	11,68	11,43	10,41
27 216						13,97	14,35	14,99	15,11	15,11	15,24	15,24	14,48
31 751							17,40	17,78	18,16	18,03	18,29	18,80	17,78
36 287								20,83	20,83	21,08	21,34	21,59	18,80
40 823									23,62	23,62	24,13	24,64	24,38
45 359										26,67	30,23	27,18	27,43
49 895											30,23	29,97	30,23
54 431												30,86	33,02
58 967													24,13

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Carga versus deformación de eje y de columna 2**



Fuente: elaboración propia.

La deformación se mantiene proporcional en todo el proceso de carga hasta llegar a la falla.

5.4. Ensayo a corte de columnas octogonales (propuesto)

Se ensayaron las columnas a corte en el área confinada y una también se ensayó al centro y los datos obtenidos fueron los siguientes:

Columna 1 en área confinada:

Primera grieta 2 400 psi = 168,72 kg/cm²

Falla 3 600 psi = 253,08 kg/cm²

Fuerza resistida = $A_{\text{Gato}} \cdot \text{esfuerzo} = 11,04 \text{ pulg}^2 \cdot 3\,600 \text{ psi} = 39\,744 \text{ lb}$
= 18 027 kg

Columna 2 en área confinada:

Primera grieta 2 400 psi = 168,72 kg/cm²

Falla 3 500 psi = 246,05 kg/cm²

Fuerza resistida = $A_{\text{Gato}} \cdot \text{esfuerzo} = 11,04 \text{ pulg}^2 \cdot 3\,500 \text{ psi} = 38\,640 \text{ lb}$
= 17 527 kg

Columna 2 en el centro:

Primera grieta 3 000 psi = 210,90 kg/cm²

Falla 3 900 psi = 275,17 kg/cm²

Fuerza resistida = $A_{\text{Gato}} \cdot \text{esfuerzo} = 11,04 \text{ pulg}^2 \cdot 3\,900 \text{ psi} = 43\,056 \text{ lb}$
= 19 530 kg

5.5. Ensayo a corte columna cuadrada (propuesto)

Se aplicó una fuerza cortante en el centro de la columna y los valores obtenidos fueron los siguientes:

Primera grieta 4 000 psi = 281,20 kg/cm²

Falla 4 200 psi = 295,26 kg/cm²

Fuerza resistida = $A_{\text{Gato}} \cdot \text{esfuerzo} = 11,04 \text{ pulg}^2 \cdot 4\,000 \text{ psi} = 44\,160 \text{ lb} = 20\,030 \text{ kg}$.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Ensayo de cilindros a compresión

Ya que la columna fue diseñada para zona sísmica, y con el fin de evaluar su comportamiento a corte, el (ACI Sección 21.5.4.2) indica que la resistencia a corte dada por el concreto se desprecia y es tomada como cero. Debido a esto el concreto se diseñó con una resistencia baja, pretendiendo que los valores obtenidos de resistencia a corte fueran determinados únicamente por el refuerzo. Con lo que se trabajó el concreto con una resistencia aproximada de 70 kilogramos/centímetro cuadrado.

6.2. Ensayo de peso volumétrico

El peso volumétrico obtenido en el ensayo de 2 425,22 kilogramos sobre metro cúbico es normal para el tipo de concreto diseñado, por lo tanto, cumple con lo esperado.

6.3. Ensayo a compresión de columnas octogonales (propuesto)

De los datos y gráficas analizadas se obtuvieron las siguientes observaciones:

- Es muy importante el primer estribo a 5 centímetros tanto de la parte superior como inferior de la columna, ya que este evita que el acero longitudinal se comience a abrir y esto provoca que el mismo fluya anticipadamente, con lo cual la columna fallará rápidamente debido a la pérdida de resistencia del refuerzo al fluir antes de lo esperado.
- Según lo observado en las gráficas de carga *versus* deformación el módulo de resiliencia llega hasta las 5 000 kilogramos.
- El refuerzo longitudinal comenzó a trabajar aproximadamente a los 30 000 kilogramos.
- Un valor acertado para la carga de diseño sería 50 000 kilogramos ya que en este valor el acero de refuerzo aún no ha comenzado a fluir, suceso que ocurre aproximadamente entre las 52 000 y 55 000 kilogramos.
- Se observó que en el deformómetro del eje X que está colocado en los 1/3 superior de la columna, existió una deformación mayor y una variación más acentuada en los ciclos de carga y descarga.
- En el deformómetro transversal colocado en el centro de la columna, se observó un comportamiento muy similar en los ciclos de carga y descarga y teniendo una deformación máxima de 3 milímetros.
- El deformómetro Y colocado a 1/3 de la parte inferior, presentó un comportamiento muy simétrico, lo que presentó una deformación muy pequeña pero constante en todos los intervalos de carga.

- Las grietas obtenidas en el ensayo, sólo se formaron en la parte inferior debido al aplastamiento que sufrió la columna, también se observó una falla a lo largo del eje transversal que partía del inferior a aproximadamente $l/3$.

6.3.1. Comparación teórica

Según los valores obtenidos de la teoría (ejemplo 1) la resistencia que tuvo que obtenerse en los ensayos fue de 62 000 kilogramos, el valor obtenido fue de 59 000 kilogramos aproximadamente el cual se podría decir que es muy cercano al deseado. La diferencia entre el valor de la resistencia no fue mayor al 5% con lo cual se podría decir que este es un valor aceptable y permisible para trabajar con él.

6.4. Ensayo a corte columnas octogonales y cuadradas

De la realización de estos ensayos se pudo llegar a obtener las siguientes conclusiones:

- En el caso de las columnas octogonales se obtuvieron grietas a 45 grados, las cuales comenzaron pequeñas en longitud y con el tiempo estas fueron alargándose hasta la falla.
- Al aplicar la fuerza de corte tanto en el área confinada como en la no confinada, se observó que la resistencia al corte obtenida era la misma, pero el tamaño de las grietas (en longitud de las mismas) era mayor hasta en un 40% en el área no confinada, con lo que se esperaría que ante la aplicación simultanea de una fuerza de corte y otra de compresión, se causaría un tipo de desplazamiento abrupto en el área no confinada.

- Se observó que en la columna cuadrada de igual área (tanto de concreto como de acero) que las columnas octogonales, se obtuvo una mayor resistencia al corte pero su primera falla fue paralela a la aplicación de la fuerza y conforme aumentó la misma, esta se fue ampliando de manera considerable hasta la falla total, punto en el cual surgió una falla a 45 grados, lo que indica que se podría producir una división repentina en la columna en caso de aumentar la carga.
- Otro aspecto a tomar en cuenta, es que la columna octogonal resiste el efecto de la fuerza cortante (sismo el cual no actúa en una dirección definida) en 4 direcciones de la misma manera, con lo que se tendría una mayor seguridad, no importando la dirección de la aplicación de la fuerza, al contrario de las columnas cuadradas que sólo trabajan en 2 direcciones de manera eficiente.
- Es recomendable que entre los puntos de unión del refuerzo longitudinal de la viga con la columna, el refuerzo a corte no esté a una distancia mayor a 5 centímetros, debido a que con esta condición se da una falla paralela y muy repentina sin aviso previo, la cual puede obtener en su momento mayor resistencia (caso visto en la columna cuadrada) pero es muchísimo más peligrosa que una falla a 45 grados la cual da un aviso de la posibilidad de colapso.

6.4.1. Comparación teórica

Al hacer una comparación de la práctica respecto a lo esperado en teoría (ejemplo 6) se observa que en ambos casos ya sea en las columnas octogonales como en las cuadradas se sobrepasa con facilidad en valor teórico de 17 790 kilogramos que por seguridad deberían resistir.

Con esto se puede decir, que para resistir los efectos cortantes generados por el sismo, la columna octogonal es muy favorable ya que no sólo sobrepasa de manera considerable la resistencia a corte sino que también, permite soportar la misma en muchas direcciones y reaccionar de igual manera.

CONCLUSIONES

1. Las principales características de las columnas de sección octogonal son: buena resistencia a compresión al compararla con los cálculos teóricos realizados en el ejemplo 1 del capítulo 3, una muy buena resistencia al corte al compararla con la requerida por el ACI en el capítulo 11, lo cual fue detallado en el ejemplo 6 del capítulo 3, además la resistencia a corte es soportada en cada sentido de la columna de igual manera lo cual es importante resaltar ya que al presentarse la acción de un sismo, el corte es generado en varias direcciones.
2. La sección octogonal tuvo un comportamiento homogéneo a compresión ya que esta soportó la carga sin que se produjeran excentricidades las cuales causaron la flexión de la misma, con lo respectivo a la deformación, esta fue mayor en la parte superior a $l/3$ de la columna.
3. Según los datos del ensayo a corte, realizados tanto en el área confinada como en el área no confinada, se pudo observar que en la confinada se obtuvieron grietas a 45 grados, las cuales comenzaron pequeñas en longitud y se alargaron hasta la falla, a comparación de el área no confinada en la cual siempre surgieron grietas a 45 grados, pero estas tuvieron una longitud superior hasta en un 40% de las obtenidas en el área confinada, con lo que ante la aplicación simultánea de una fuerza de corte y otra de compresión, se causaría un tipo de desplazamiento abrupto en el área no confinada.

4. La columna falló a compresión por aplastamiento al llegar a su resistencia máxima, esto se debió a la carga que se aplicó de manera concentrada y sin ninguna excentricidad que generara algún momento muy grande que causara la flexión de la columna.
5. Al hacer una comparación de las columnas se observa, que en resistencia a compresión la columna de sección octogonal resiste lo mismo que una columna de sección cuadrada, pero un poco menos que una columna circular con refuerzo en espiral, esto basado en las fórmulas teóricas aplicadas en los ejercicios 1, 2 y 3 del capítulo 3. En la resistencia a corte la columna resiste más que una circular y de manera similar a la cuadrada (basado en la teoría ejemplo 6 capítulo 3 y en los ensayos a corte hechos a las columnas de sección cuadrada y octogonal), solo que la octogonal soporta el corte en más sentidos, lo que sería de vital importancia ante la acción del sismo.
6. Las ventajas que se obtienen al trabajar con una columna de sección octogonal son las siguientes: muy buena resistencia y comportamiento a corte en todos los sentidos, una buena resistencia a compresión, esto según lo especificado anteriormente, además de que se trabaja con varillas de tamaño menor y se tiene una mejor distribución de las misma y se gana en atractivo estético.
7. Entre las principales desventajas vistas desde el proceso constructivo, se pudo observar que la formaleta de este tipo de columnas, necesita mayor tiempo de elaboración y también se presenta una dificultad para hacer el molde de los estribos, pero después de hacer este el proceso de elaboración de los mismos es muy rápido.

RECOMENDACIONES

1. En referencia a los resultados del ensayo a compresión se determinó que es muy importante colocar el primer estibo a 5 centímetros tanto de la parte superior como inferior de la columna, para evitar que el acero longitudinal se abra y con esto fluya, con lo que se tendrá una pérdida de resistencia, lo que causará una falla anticipada.
2. Con lo respectivo al proceso constructivo se debe tomar suficiente tiempo para hacer el molde de los estribos, ya que este tiene que quedar muy seguro para que la medida y los ángulos queden siempre iguales, además tener en cuenta que para este tipo de estribos octogonales la medida de separación entre los pines del molde, debe ser la misma que la medida que se requiere en el estribo y no menor como en el caso de los estribos cuadrados.
3. Es fundamental que entre los puntos de unión del refuerzo longitudinal de la viga con la columna, el refuerzo a corte no esté a una distancia mayor a 5 centímetros, debido a que con esta condición se da una falla paralela y muy repentina sin aviso previo, la que puede obtener en su momento mayor resistencia (caso visto en el ensayo a corte de la columna de sección cuadrada) pero es muchísimo más peligrosa que una falla a 45 grados la cual da un aviso de la posibilidad de colapso.

4. Según lo establecido en las conclusiones se observa que el confinamiento a en los $l/3$ tanto superior como inferior de la columna, es muy importante para que se produzcan fallas de menor tamaño con respecto a la longitud.

5. Usar agregado de calidad para evitar la rotura del mismo y con esto una falla paralela a la aplicación de fuerza y sin previo aviso.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 318S-08: Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario*. USA: ACI, 2008, 518 p.
2. American Society for Testing Materials. *Norma ASTM C-39. Método de ensayo normalizado para resistencia a compresión de especímenes cilindros de concreto*. USA: ASTM, 1990. 7 p.
3. _____. *Norma ASTM C-143. Método de ensayo normalizado para asentamiento de concreto hidráulico*. USA: ASTM, 1990. 4 p.
4. CHEW GUTIÉRREZ, Ike Marthinn. *Análisis y diseño de columna de sección variable*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1999. 107 p.
5. *Comportamiento del concreto armado*. [en línea]. <http://es.scribd.com/doc/49039726/Comportamiento-del-concreto-armado-ante-cargas-axiales>. [Consulta: 11 de junio de 2012].
6. CORZO ÁVILA, Mario Rodolfo. *Concreto 2*. Guatemala: USAC, Facultad de Ingeniería, 2012. 223 p.
7. DE LEÓN MALDONADO, Jorge Mario. *Análisis y diseño de columnas de concreto reforzado*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1984. 206 p.

8. *Ensayos a compresión de cilindros.* [en línea]. <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/ensayo-compresin-de-cilindros-de.html>. [Consulta: 5 de agosto de 2012].
9. *Ensayos en concreto fresco.* [en línea]. <http://construaprendiendo.blogspot.com/2012/02/ensayo-para-determinar-el-asentamiento.html>. [Consulta: 5 de agosto de 2012].
10. _____. [en línea]. http://ingevil.blogspot.com/2008/10/ensayo-de-abrams-toma-de-muestras-para_07.html. [Consulta: 2 de agosto de 2012].
11. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. *Norma técnica colombiana NTC*. Colombia: NTC, 1992. 83 p.
12. International Code Council. *International Building Code IBC. USA: Falls Church, 2003*. 665 p.
13. MCCORMAC, Jack C. *Diseño de concreto reforzado*. 4a ed. México: Alfaomega, 2002. 778 p.
14. NILSON, Arthur H. *Diseño de estructuras de concreto*. 12a ed. Colombia: McGraw-Hill, 1999. 722 p.
15. SARAVIA CADENA, Carlos Enrique. *Formaletas para columnas*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1976. 74 p.

16. *Tipos de encofrado.* [en línea].
<http://theconstructor.org/bluilding/formwork-shuttering/types-of-formwork-shuttering/3767/>. [Consulta: 20 de mayo de 2012].

APÉNDICES

Apéndice 1. Molde para hacer estribos



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 2. Columna armada



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 3. **Formaletas utilizadas**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 4. **Proceso de fundición**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5. **Columna fundida**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 6. Desencofrado



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 7. **Ensayo a compresión columna octogonal**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

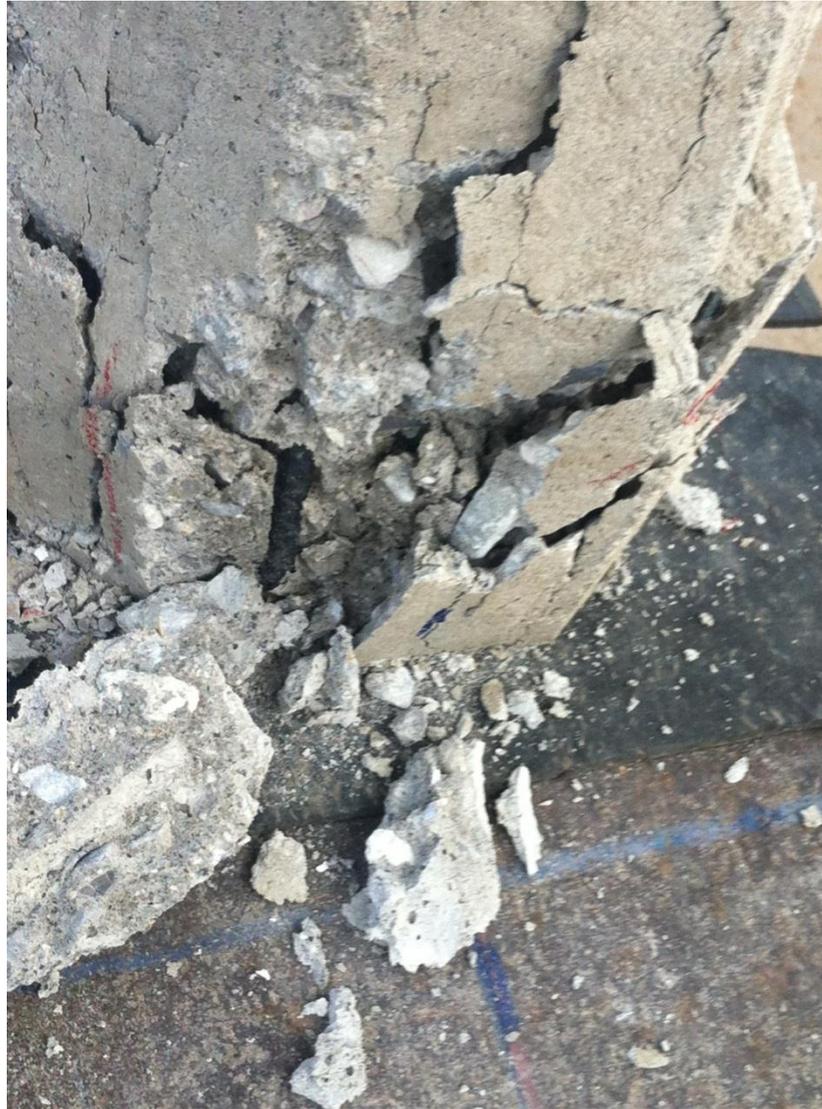
Apéndice 8. **Falla de columna a compresión por aplastamiento**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

La falla se dio a compresión debido a que no había ninguna excentricidad la cual hiciera que esta se flexionara.

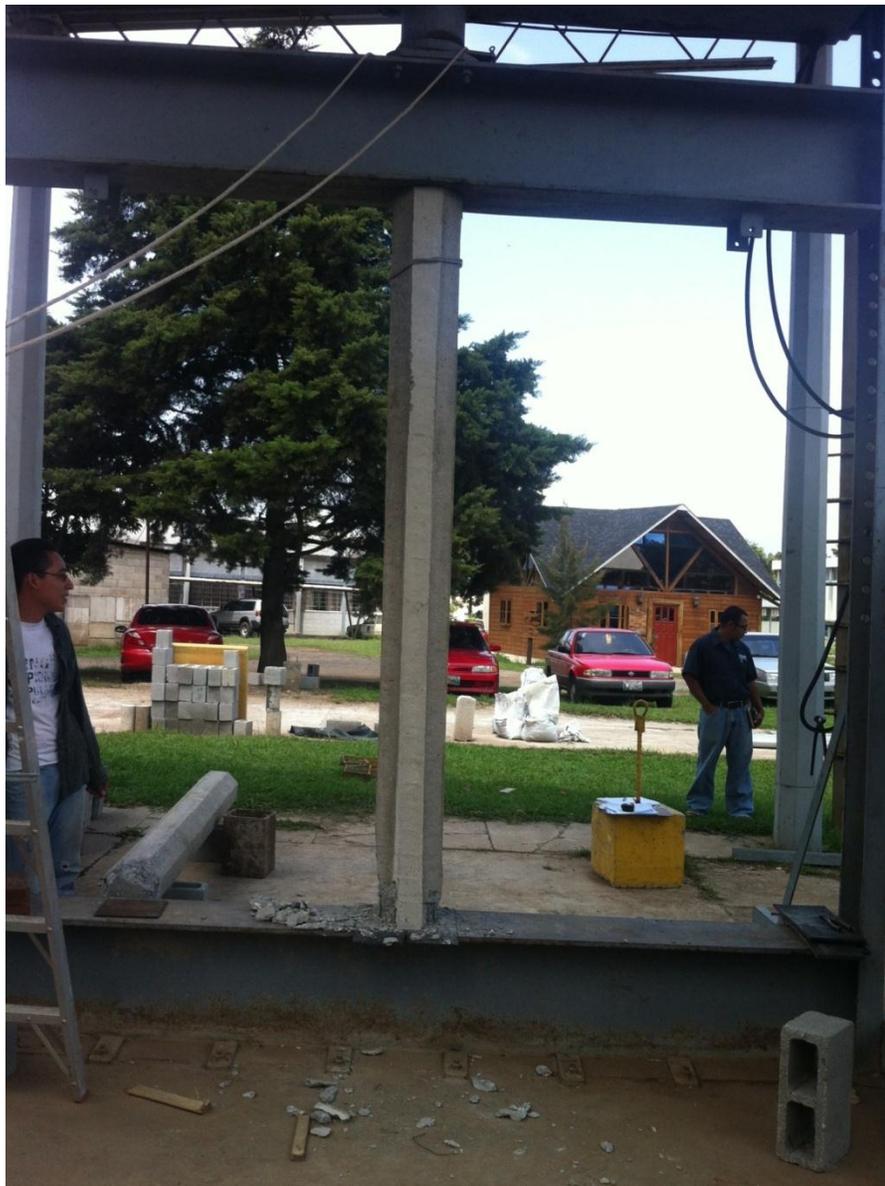
Apéndice 9. **Falla de columna 2 a compresión por aplastamiento**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

La falla se dio a compresión debido a que no había ninguna excentricidad la cual hiciera que esta se flexionara. Se observa el desprendimiento del recubrimiento en la parte inferior de la columna.

Apéndice 10. **Columna luego de falla a compresión por aplastamiento**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Luego de la falla se observa que la columna queda entera y sólo falló en la parte inferior debido al aplastamiento que provocó que el refuerzo longitudinal se abriese.

Apéndice 11. **Ensayo a corte columna 2**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Se observaron grietas a 45 grados generadas por el corte.

Apéndice 12. **Ensayo a corte columna 1 al centro**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 13. **Ensayo a corte columna cuadrada**



Fuente: Área de Prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Se observaron grietas a 45 grados generadas por el corte y también una transversal debido a la separación de los estribos con respecto a la aplicación de carga y la posible mala adherencia de los materiales.