



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIEROS CIVILES**

**TEMA: EVALUACIÓN DE DAÑO EN COLUMNAS DE HORMIGÓN
ARMADO A ESCALA REAL POR EFECTO DE CARGAS EXPLOSIVAS
MEDIANTE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL**

**AUTORES: CAPT. DE E. PERALTA ROJAS, RICARDO JAVIER
SARANGO TORRES, ÁNGEL ANDRÉS**

DIRECTOR: ING. MEJÍA ALMEIDA, NÉSTOR DAVID M.SC

SANGOLQUÍ

2019



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "*EVALUACIÓN DE DAÑO EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO A ESCALA REAL POR EFECTO DE CARGAS EXPLOSIVAS MEDIANTE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL*" fue realizado por los señores *CAPT. DE E. PERALTA ROJAS, RICARDO JAVIER* y *SARANGO TORRES, ÁNGEL ANDRÉS* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditarlo y autorizar para que los sustenten públicamente.

Sangolquí, 06 de junio de 2019

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Néstor David Mejía', is written over a horizontal dotted line.

Ing. Néstor David Mejía Almeida M.Sc.

C. C. 1714547898



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Capt. de E. Peralta Rojas, Ricardo Javier y Sarango Torres, Ángel Andrés*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Evaluación de daño en columnas de hormigón armado a escala real por efecto de cargas explosivas mediante validación experimental* es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 06 de junio de 2019

Capt. de E. Peralta Rojas, Ricardo Javier
C.C. 1714117130

Sarango Torres, Ángel Andrés
C.C. 1718560376



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN CARRERA
DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Capt. de E. Peralta Rojas, Ricardo Javier y Sarango Torres, Ángel Andrés, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: Evaluación de daño en columnas de hormigón armado a escala real por efecto de cargas explosivas mediante validación experimental en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 06 de junio de 2019

Capt. de E. Peralta Rojas, Ricardo Javier
C.C. 1714117130

Sarango Torres, Ángel Andrés
C.C. 1718560376

DEDICATORIA

A mis padres, quienes fueron mis primeros maestros y me han forjado como persona siendo siempre mi ejemplo a seguir. A mis hermanas, por su apoyo incondicional en todo momento y quienes también han sido mi modelo. A mi sobrino, quien me alegra con su inocencia y cada día me enseña nuevas cosas. A mis amigos y compañeros, por ser parte de este arduo camino y con quienes hemos compartido grandiosos momentos. A todos ellos, con gratitud dedico esta tesis.

Andrés Sarango T.

Este trabajo dedico a mi esposa Geovy y a mis hijos Ricardo y Paula por ser mi inspiración y el impulso a seguir en todo momento, además por comprender el tiempo dedicado a los estudios y a las obligaciones que la carrera me demando, este logro es por ustedes y para ustedes. A toda mi familia por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos. A mis amigos de promoción y compañeros de esta larga pero extraordinaria carrera.

Capt. E. Peralta Rojas Ricardo Javier

AGRADECIMIENTO

Al culminar un objetivo tan importante, quiero agradecer a Dios, mi familia, al Ejército que me permitió capacitarme en esta prestigiosa universidad; y especialmente a mi esposa y mis hijos por su apoyo incondicional, a mi madre, hermana y la Sra. Sonia Palacios por ser un soporte para mi familia. Agradecer a quienes confiaron en mi trabajo para la ejecución del Proyecto de Investigación Militar al Ing. David Mejía tutor de la investigación, al Ing. Ricardo Durán Director del Proyecto y a mi Capt. Rodrigo Mejía. No quiero dejar de agradecer a mis compañeros y amigos ayudantes de investigación que contribuyeron a cumplir con los objetivos trazados en el proyecto, y a mi amigo de tesis por la colaboración y apoyo en la ejecución de todas las fases del proyecto. Finalmente, mi agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, a sus autoridades, personal directivo y docentes por el apoyo brindado al desarrollo, financiamiento y ejecución del Proyecto de Investigación Militar.

Capt. E. Peralta Rojas Ricardo Javier

En primer lugar, a Dios, por darme la fuerza y sabiduría para culminar esta etapa de mi vida. Un agradecimiento especial a mis padres por sus consejos y apoyo absoluto en cada momento de dificultad sin dejarme desmayar. Mis hermanas y sobrino por su paciencia y frases de aliento. A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y sus docentes por acogerme en sus aulas e impartirme sus conocimientos durante años; en especial al Ing. Ricardo Duran e Ing. David Mejía quienes siempre estuvieron dispuestos a colaborar en la realización del presente trabajo de titulación. A mis amigos y compañeros por ser parte de esta experiencia universitaria llena de grandes momentos, en especial a quienes fueron parte del proyecto de investigación con los cuales compartimos esta maravillosa experiencia y colaboraron en la realización de la misma.

Andrés Sarango T.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO I	1
GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Estado del Arte	5
1.4. Justificación e Importancia	10
1.5. Objetivos	11
1.5.1. Objetivo General	11

	vii
1.5.2. Objetivos Específicos	11
1.6. Área de Influencia	12
CAPÍTULO II.....	13
MARCO TEÓRICO	13
2.1 Demoliciones controladas con explosivo	13
2.1.1. Reseña Histórica.....	13
2.1.2. Definición.....	14
2.1.3. Generalidades de las demoliciones.....	14
2.1.4. Propósito.....	15
2.1.5. Características de Diseño	16
2.1.6. Proceso de demolición	17
2.1.7. Demoliciones en operaciones militares.....	19
2.1.8. Riesgos y peligros en las detonaciones	20
2.1.9. Tipos de demoliciones.....	21
2.1.10. Selección de explosivos	22
2.1.11. Dimensión de Carga	22
2.1.12. Tipos de carga	23
2.1.12.1. Cargas internas	24
2.1.12.2. Cargas Externas.....	24
2.2 El Explosivo	25
2.2.1. Efectos del explosivo	26
2.2.1.1. Deformación.....	26

	viii
2.2.1.2. Fragmentación.....	26
2.2.1.3. Fractura radial.....	27
2.2.1.4. Presión de explosión.....	27
2.2.2. La Pentolita	29
2.2.3. Carga Cónica.....	29
2.3 Elementos de hormigón armado	30
2.3.1. Columnas de hormigón armado	30
2.3.2. Consideraciones de diseño	32
2.3.3. Resistencia a la compresión de columnas de hormigón armado.....	34
2.3.4. Carga Crítica de Pandeo.....	34
2.3.5. Condición de Esbeltez.....	37
2.3.6. Flexo-Compresión.....	37
2.3.7. Factor de incremento dinámico (DIF).....	38
CAPÍTULO III	40
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	40
3.1 Metodología del desarrollo del proyecto	40
3.2 Metodología de diseño y construcción de probetas de ensayo.....	41
3.2.1. Diseño de las probetas.....	41
3.2.2. Tracción del acero, diseño de hormigones y ensayo de resistencia de compresión de cilindros.....	46
3.2.2.1. Ensayo de tracción de varillas de acero.....	47
3.2.2.2. Diseño de hormigones de cemento Portland.....	48

3.2.2.3. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros.	55
3.3 Construcción de probetas tipo columnas	59
3.4 Protocolo de Instructivos de ensayo y seguridad.....	62
3.4.1. Protocolo de ensayo	62
3.4.2. Instructivo para Ensayo	63
3.5 Materiales, equipo y zona de ensayo.....	64
3.5.1 Materiales	64
3.5.2 Equipos.....	66
3.5.3 Zona de ensayo.....	69
3.5.4 Preparación de explosivos	76
CAPÍTULO IV	80
FASE EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN	80
4.1 Ensayos con explosivo en probetas de hormigón armado tipo columna.	80
4.1.1 Procedimiento de ensayo.....	80
4.1.1.1 Etapa I.- Preparación de áreas y puestos de seguridad.....	80
4.1.1.2 Etapa II.- Traslado de probetas e instalación de equipos.	81
4.1.1.3 Etapa III.- Preparación de la máquina de ensayos destructivos, verificación de las columnas y explosivos.	82
4.1.1.4 Etapa IV.- Procedimientos de los ensayos destructivos	83
4.1.2 Medición de deformaciones	94
4.1.3 Esclerómetro.....	99
4.2 Pruebas post ensayos con explosivos en probetas tipo columna	102

4.2.1	Ensayo de tracción de acero	x 102
4.2.2	Ensayos de núcleos de hormigón	106
CAPÍTULO V		113
MODELOS MATEMÁTICOS		113
5.1	Presión de Incidencia	113
5.1.1	Presión de Incidencia Teórica	113
5.1.2	Presión de Incidencia de Campo o experimental	116
5.1.3	Presión de Incidencia por simulación computacional	118
5.2	Criterios de falla de las probetas tipo columna	119
5.2.1	Deformaciones de los aceros de refuerzo	119
5.2.2	Fragmentación de las probetas tipo columna.	120
5.2.3	Carga crítica de pandeo por la longitud de exposición del acero	121
5.2.4	Criterio de falla de Conrath.....	122
CAPITULO VI		124
ANÁLISIS DE RESULTADOS		124
6.1	Análisis de la presión de incidencia máxima	124
6.2	Análisis de las probetas tipo columna de hormigón armado	125
6.2.1	Análisis de la resistencia a la compresión de las columnas	125
6.2.2	Análisis de las cargas axiales restantes	131
6.2.3	Análisis de las pruebas de tracción del acero	131
6.3	Análisis de los criterios de falla de las probetas tipo columna	132

	xi
6.3.1 Deformaciones de las probetas tipo columna.....	132
6.3.2 Análisis de la fragmentación del hormigón.....	133
6.3.3 Análisis de carga crítica de pandeo del área fragmentada.....	135
6.3.4 Análisis del Criterio de falla de Conrath.....	136
6.4 Curvas de daño por impacto con cargas explosivas en elementos de hormigón. .	137
CAPITULO VII.....	141
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	141
7.1 Conclusiones	141
7.2 Recomendaciones	148
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Factor de Forma</i>	36
Tabla 2 <i>Factores de incremento dinámico (DIF) para el diseño de elementos de hormigón armado y de acero estructural</i>	38
Tabla 3 <i>Criterios típicos de fallo para elementos estructurales</i>	39
Tabla 4 <i>Descripción de las características de las probetas tipo columna</i>	41
Tabla 5 <i>Planilla de aceros de las probetas tipo columna</i>	43
Tabla 6 <i>Resultados de los ensayos de tracción en varillas de acero corrugado (límite de fluencia)</i>	47
Tabla 7 <i>Contenido de humedad de árido fino y grueso</i>	49
Tabla 8 <i>Resultados de densidad, densidad aparente y absorción de agua del agregado fino</i>	50
Tabla 9 <i>Resultados de densidad, densidad aparente y absorción de agua del agregado grueso</i>	51
Tabla 10 <i>Densidad volumétrica y porcentaje de absorción del árido fino</i>	52
Tabla 11 <i>Densidad volumétrica y porcentaje de absorción del árido grueso</i>	52
Tabla 12 <i>Análisis Granulométrico de agregados Gruesos</i>	53
Tabla 13 <i>Análisis Granulométrico de agregados Gruesos</i>	54
Tabla 14 <i>Resumen de la caracterización de los agregados</i>	55
Tabla 15 <i>Dosificación del hormigón con su respectiva resistencia a la compresión</i>	55
Tabla 16 <i>Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 210 kg/cm²</i> ...	56
Tabla 17 <i>Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 280 kg/cm²</i> ...	56
Tabla 18 <i>Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 280 kg/cm²</i> ...	57
Tabla 19 <i>Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 210 kg/cm²</i> ...	57
Tabla 20 <i>Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 280 kg/cm²</i> ...	58

Tabla 21 <i>Materiales utilizados durante los ensayos experimentales.</i>	64
Tabla 22 <i>Equipos utilizados durante los ensayos experimentales</i>	66
Tabla 23 <i>Presión de incidencia en las diferentes distancias de análisis para una masa equivalente de 6,17 kg de TNT</i>	72
Tabla 24 <i>Características del explosivo Pentolita</i>	77
Tabla 25 <i>Descripción de los pasos a seguir en el ensayo de las 33 columnas</i>	84
Tabla 26 <i>Imágenes de los resultados de los ensayos con explosivos</i>	88
Tabla 27 <i>Resultados de los ensayos referentes al Grupo 1</i>	95
Tabla 28 <i>Resultados de los ensayos referentes al Grupo 2</i>	96
Tabla 29 <i>Resultados de los ensayos referentes al Grupo 3</i>	97
Tabla 30 <i>Resultados de los ensayos referentes al Grupo 4</i>	97
Tabla 31 <i>Resultados de los ensayos referentes al Grupo 5</i>	98
Tabla 32 <i>Resultados de los ensayos referentes al Grupo 6</i>	99
Tabla 33 <i>Resultados de los ensayos de resistencia del hormigón con esclerómetro</i>	101
Tabla 34 <i>Resultados de los ensayos de tracción de las varillas de acero</i>	105
Tabla 35 <i>Resultados de los ensayos a compresión de los núcleos de hormigón</i>	111
Tabla 36 <i>Valores obtenidos mediante los ensayos del esclerómetro en las probetas</i>	112
Tabla 37 <i>Constantes utilizadas por Swisdak en su estudio para determinar la presión de incidencia</i>	114
Tabla 38 <i>Datos de ensayo y medidas de la primera onda explosiva</i>	117
Tabla 39 <i>Presiones de Incidencia Máxima</i>	125
Tabla 40 <i>Análisis de resultados de los cilindros testigo de 210 kg/cm²</i>	126
Tabla 41 <i>Análisis de resultados de los cilindros testigo de 280 kg/cm²</i>	127

Tabla 42 <i>Análisis de resultados del ensayo con el uso del esclerómetro en probetas de 280</i>	
<i>kg/cm²</i>	128
Tabla 43 <i>Análisis de resultados del ensayo con el uso del esclerómetro en probetas de 210</i>	
<i>kg/cm²</i>	128
Tabla 44 <i>Resultados de ensayos post detonación.....</i>	129
Tabla 45 <i>Porcentajes de deformación del acero de refuerzo.....</i>	132
Tabla 46 <i>Mediciones de longitud de exposición y fragmentación</i>	134
Tabla 47 <i>Cálculo de la carga crítica por pandeo del área fragmentada.....</i>	135
Tabla 48 <i>Aplicación de los criterios de falla de Conrath</i>	136
Tabla 49 <i>Criterios de falla de probetas tipo columna de hormigón armado.....</i>	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Colocación de la carga explosiva confinada en la columna	5
Figura 2. Influencia del factor del explosivo en la resistencia de los especímenes	6
Figura 3. Deformación en columna de hormigón armado causada por detonación.....	7
Figura 4. Estructura de soporte modelada con columna pegada	9
Figura 5. Ensayos destructivos realizados en elementos tipo Columna H.A.	9
Figura 6. Voladura por demolición del edificio Monzese en Milán	15
Figura 7. Desarticulaciones con carga explosiva de una estructura.....	16
Figura 8. Demolición de Puente.....	19
Figura 9. Carga interna o confinada en una columna.....	24
Figura 10. Carga externa o no confinada en muros"	25
Figura 11. Curva de la Presión de incidencia.....	28
Figura 12. Distintas geometrías transversales de columnas"	31
Figura 13. Columnas con estribos y columnas zunchadas.....	32
Figura 14. Columnas con estribos y columnas zunchadas	33
Figura 15. Elástica de deformación.....	35
Figura 16. Curva carga crítica-desplazamiento.....	36
Figura 17. Armado de probetas de hormigón pertenecientes al Grupo 1 y 2.....	42
Figura 18. Armado de probetas de hormigón pertenecientes al Grupo 3 y 4.....	42
Figura 19. Armado de probetas de hormigón pertenecientes al Grupo 5.....	42
Figura 20. Armado de probetas de hormigón pertenecientes al Grupo 6.....	42
Figura 21. Detalle de la placa de 300 x 300 x 6 mm.....	44
Figura 22. Detalle de la placa de 400 x 400 x 6 mm.....	44

Figura 23. Detalle de la placa de 500 mm x 500 mm x 6 mm	45
Figura 24. Detalle de ganchos de transporte	46
Figura 25. Vista 3D de las probetas y ubicación de los ganchos de transporte	46
Figura 26. Límites de fluencia del acero corrugado grado AS 42.....	48
Figura 27. Curva granulométrica áridos finos.....	53
Figura 28. Curva granulométrica áridos finos.....	54
Figura 29. Ensayos de compresión del hormigón en cilindros de 210 kg/cm ²	59
Figura 30. Ensayos de compresión del hormigón en cilindros de 280 kg/cm ²	59
Figura 31. Encofrado de madera Tríplex 4818 C de 3 caras para probetas tipo columna	60
Figura 32. Fundición de probetas tipo columna de hormigón armado.....	61
Figura 33. Desencofrado y curado de las probetas tipo columna de hormigón armado	61
Figura 34. Equipos utilizados para la ejecución de ensayos	67
Figura 35. Máquina de ensayos destructivos a compresión.....	67
Figura 36. Equipo filmográfico.....	68
Figura 37. Equipo de seguridad especializado para explosivitas	69
Figura 38. Ubicación geográfica del Depósito Conjunto de Municiones “El Corazón”.....	70
Figura 39. Ubicación de las posiciones de seguridad.....	73
Figura 40. Posición de seguridad número uno, zona de ensayos	74
Figura 41. Posición de seguridad número dos, berma de seguridad	75
Figura 42. Posición de seguridad número tres, posición de seguridad tipo fosa.....	76
Figura 43. Carga cónica 450g	77
Figura 44. Carga Diédrica	78
Figura 45. Carga conformada 1140g.....	78

Figura 46. Colocación de las cargas a media altura en las probetas de hormigón armado tipo columna	79
Figura 47. Preparación puesto de seguridad tipo fosa para equipo filmográfico	81
Figura 48. Traslado de las probetas de hormigón armado tipo columnas	81
Figura 49. Instalación de los equipos filmográficos en el puesto de seguridad	82
Figura 50. Ubicación del gato hidráulico	83
Figura 51. 33 probetas de hormigón armado tipo columna	83
Figura 52. Metodología de medición de probetas del Grupo 1, 2, 3 y 4	94
Figura 53. Columna de 50 cm x 50 cm post ensayo	95
Figura 54. Columna de 40 cm x 40 cm post ensayo	96
Figura 55. Metodología de medición de probetas del Grupo 5 y 6	98
Figura 56. Ensayo de resistencia del hormigón con el uso de esclerómetro	100
Figura 57. Dirección de golpe en el ensayo con esclerómetro	101
Figura 58. Ensayo de tracción del acero	103
Figura 59. Resultados del ensayo de tracción de las varillas de 18mm	104
Figura 60. Resultados del ensayo de tracción de las varillas de 16mm	104
Figura 61. Resultados del ensayo de tracción de las varillas de 14mm	105
Figura 62. Máquina de extracción de núcleos en columna de 50 cm x 50 cm, $f'c$ 210kg/cm ² ..	107
Figura 63. Perforación de los núcleos en las probetas tipo columna	108
Figura 64. Medición del área de perforación	108
Figura 65. Muestras obtenidas en perforaciones	109
Figura 66. Corte de los cilindros	110
Figura 67. Ensayos a compresión	110

Figura 68. Falla de la muestra	111
Figura 69. Modelo de Esclerómetro.....	112
Figura 70. Efecto de daño para infraestructura y personas para 1 kg de TNT.....	114
Figura 71. Comportamiento de la Presión de Incidencia vs Distancia.....	116
Figura 72. Variación de gases de la carga explosivo conformada	118
Figura 73. Presión de incidencia máxima calculada en la simulación computacional	119
Figura 74. Estimación de la fragmentación del hormigón y medición de la longitud de exposición del acero.	120
Figura 75. Resumen de ensayos de resistencia de hormigón	130
Figura 76. Curva de daño por impacto por cargas explosivas en elementos de hormigón	139

RESUMEN

La presente investigación se planteó por objetivo determinar una curva de daño por impacto con el fin de establecer la cantidad de explosivo óptimo que se requiere para el colapso vertical de columnas de hormigón armado. Se construyeron 33 probetas tipo columna de hormigón armado, mismas que fueron ensayadas ante cargas explosivas; el explosivo utilizado en la investigación fue Pentolita 50/50 representado en cargas conformadas, las variables que intervinieron fueron: sección transversal de las columnas, resistencia a la compresión del hormigón y cantidad de explosivo. Posterior a la detonación, los parámetros que se analizaron para verificar el fallo de las probetas tipo columna fueron: fragmentación del hormigón, longitud de exposición del refuerzo longitudinal, deformación del acero y acortamiento axial de las probetas; que son la base para correlacionar con los criterios de falla establecidos en estudios previos de otros autores. Finalmente, se determinó el daño provocado en las diferentes probetas y se estableció una curva de daño en términos de cantidad óptima de explosivo y coeficiente de hormigón, dicho coeficiente está relacionado con la sección transversal y la resistencia a la compresión del hormigón. Esta investigación servirá como base fundamental para realizar estudios más avanzados en el campo de las demoliciones controladas en edificaciones.

PALABRAS CLAVES:

- **PENTOLITA**
- **COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO**
- **CARGAS EXPLOSIVAS**
- **DETONACIÓN CONTROLADA**
- **COLAPSO**

ABSTRACT

This study presents an experimental and analytical investigation of the optimal quantity of explosive charge that is required for the vertical collapse of reinforced concrete columns. During the experimental studies, 33 reinforced concrete columns were constructed for different cross section and compressive strength of the concrete. Additionally, these were tested under the action of blast load. It is produced by the detonation of Pentolite 50/50 explosive. The failure in each one of columns are determined by the interaction between the fragmentation in concrete, exposed length of longitudinal steel-bars, deformation of the reinforcement steel and axial shortening of columns. The outcomes are showed in terms of optimum quantity of explosive, cross section and the compressive strength of the concrete, which were represented in a damage curve. This research might be the framework for further research related to controlled demolitions works.

KEYWORDS:

- **PENTOLITE**
- **REINFORCED CONCRETE COLUMNS**
- **EXPLOSIVE CHARGE**
- **CONTROLLED DETONATION**
- **COLLAPSE**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

A través del tiempo, el estudio de las técnicas y metodologías en demoliciones de estructuras se han desarrollado para hacer frente a necesidades como:

- Ordenamiento urbanístico
- Desastres naturales, y
- Aplicaciones de tipo militar.

El empleo de estas técnicas ha permitido demoler estructuras de gran tamaño optimizando tiempo y dinero. La aplicación de los explosivos en las demoliciones somete a las estructuras a esfuerzos máximos con el fin de alterar sus propiedades físicas y mecánicas. La técnica que se aplica en la demolición, determina la cantidad, composición y lugar de colocación del explosivo en los elementos estructurales.

La metodología que se utiliza para realizar las demoliciones controladas, requiere el análisis de los elementos estructurales mediante: el control del diseño, proceso constructivo y las condiciones en las cuales se encuentran los elementos de hormigón armado, que permitirá establecer los materiales explosivos, zonas de seguridad, sitios de colocación del explosivo y el efecto necesario para provocar el colapso de estos elementos.

Los métodos de investigación aplicados a este proyecto son de tipo descriptivo y experimental. La Investigación Descriptiva, refiere la realidad de situaciones, eventos, personas que se estén

abordando y que se pretenda analizar, consiste en plantear lo más relevante, definir su análisis y los procesos que involucrará el mismo (Universia, 2017). Esta metodología aplicada en la investigación, comprende la implementación de registros, análisis e interpretación de condiciones actuales sobre demoliciones controladas en elementos de hormigón armado. Las relaciones causa-efecto serán comparadas entre variables no manipuladas, pero reales (Mejía & Vasconez, 2017).

La Investigación Experimental, es un proceso sistemático y una aproximación científica a la investigación en la cual el investigador manipula una o más variables, controla y mide pruebas para entender los procesos causales y su efecto sobre dichas variables (Explorable, 2008). Esta metodología determina la aplicación de cargas explosivas en elementos de hormigón, estableciendo la variación de cantidad de explosivo, la aplicación de carga axial, el análisis de los parámetros de deformación del acero y la fragmentación del hormigón, permiten determinar soluciones para la ejecución de demoliciones de estructuras.

Este proyecto de investigación presenta alternativas para el uso de explosivos aplicados en elementos de hormigón que provocarán su colapso y pueden ser utilizadas en operaciones militares de demoliciones controladas. Además, el uso de las curvas de daño que se determinará al final de este trabajo, que podrá ser utilizado en apoyo a la gestión de riesgo en desastres naturales o necesidades urgentes del país.

El contenido del presente proyecto, en sus capítulos desarrolla un análisis detallado de las características y propiedades fundamentales del explosivo que se utilizará en los ensayos experimentales; el diseño y proceso constructivo de las probetas tipo columna de hormigón armado; desarrollo y protocolos de ensayos en el campo y el uso de los equipos de investigación;

análisis post ensayos de los elementos de hormigón armado; y la determinación de las curvas de daño por impacto con cargas explosivas en probetas de hormigón.

1.2. Antecedentes

El presente proyecto nace como consecuencia del terremoto ocurrido el 16 de abril del año 2016, donde las costas ecuatorianas, específicamente en Manabí se vieron afectadas por un fuerte movimiento telúrico de 7.8° en la escala de Richter; dejando gran cantidad de edificaciones dañadas, siendo necesaria su demolición.

La imperiosa necesidad de implementar en las operaciones militares de ingeniería las demoliciones de estructuras, para estar enmarcados en el Manual de Conducción Militar del Comando de Educación y Doctrina del Ejército (CEDE, 2015); el ámbito de la seguridad y defensa, durante el desarrollo de operaciones militares de guerra, en los niveles de la conducción estratégica y operacional, se definen objetivos que por principio deben ser claramente definidos, decisivos y alcanzables, cuya conquista contribuye en la estrategia militar para conseguir con carácter de favorable un estado final deseado dentro del teatro de guerra. El ejecutar estas operaciones permiten, que las maniobras militares y las estrategias sean la manera más ventajosa para ganar la guerra, porque ayuda a determinar la movilidad y la efectividad de las tropas (Tzu, 1730).

Las Fuerzas Armadas del Ecuador como parte de su doctrina en explosivos y demoliciones utilizan el manual FM 5-250 del ejército de los Estados Unidos de Norteamérica (Army, U. S., 1992), manual que basa su uso en equipos y materiales de los EEUU, por lo tanto para su aplicación se debe realizar equivalencias que inciden en la exactitud de los resultados, los efectos que se requieren deben ser precisos por la peculiaridad del trabajo de demoliciones en edificaciones.

Este trabajo de investigación es parte del Proyecto de Investigación Militar 005 titulado: “Desarrollo de curvas de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de hormigón armado a través de simulación computacional y ensayos experimentales” que en la actualidad se encuentra en ejecución de su etapa final, además se tiene como referencia la tesis realizada por: (Mejía & Vasconez, 2017) “Establecer a través de ensayos experimentales curvas características del comportamiento del hormigón armado en elementos estructurales tipo columna de sección cuadrada, bajo cargas explosivas, en función de las propiedades mecánicas; como la cantidad óptima de explosivo que se utiliza en una detonación controlada con impulso eléctrico, sobre una cara y a media luz del elemento” y (Navia & Morales, 2017) “Simulación computacional de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de hormigón armado”. En el cual los autores desarrollaron curvas características mediante el uso de probetas de hormigón armado de sección transversal de 30 x 30 cm y 50 cm de longitud y la simulación computacional de los efectos del explosivo en las probetas analizadas.

En el Ecuador por efectos post terremotos existieron 13.962 edificaciones y viviendas en zona urbana y 15.710 en zona rural que se encuentran colapsadas, por demoler, con restricciones e inseguras (SENPLADES, 2016), de las cuales 139 edificaciones fueron destruidas (INEC, 2017), 3 por voladuras controladas y 136 por demolición mecánica. Las tres edificaciones de la provincia de Manabí que se demolieron por voladuras controladas, fueron aprobadas por las mesas del COE provincial para que la compañía Tragsa de procedencia española realice estos trabajos, presentando los procedimientos y parámetros como el análisis de la estructura, seguros contra daños a terceros, perímetros de seguridad, censo de viviendas antes y después de la demolición, limpieza de los escombros, perforaciones, protecciones de mallado, geo textil y colocación de merlones de protección alrededor del edificio realizando una “fulminación directa” como explico Jorge

Muntasell representante de la compañía (Manabí, 2016). El principal propósito de utilizar este método de demolición es de optimizar el empleo de materiales, medios y equipos, bajo parámetros de seguridad, siendo esta la primera ocasión que se usa estas técnicas de demolición en el país.

1.3. Estado del Arte

En el campo de estudio relacionado al proyecto, se pueden destacar trabajos investigativos realizados a nivel mundial, mismos que se relacionan directamente a los temas a tratarse en el presente proyecto. Dichos proyectos centran sus estudios de demoliciones mediante el uso de explosivo en base a la problemática de su país y de los insumos que poseen en el mismo.

(Fujikake & Aemlaor, 2013) realizaron un estudio sobre el daño provocado en columnas de hormigón armado después de ejecutar trabajos de demolición con explosivos. Los investigadores construyeron 14 especímenes tipo columna de hormigón reforzado, dichos especímenes tuvieron una sección transversal de 180 x 180 mm y 1200 mm de longitud, donde la carga explosiva fue colocada de manera confinada en un orificio como se presenta en la Figura 1.

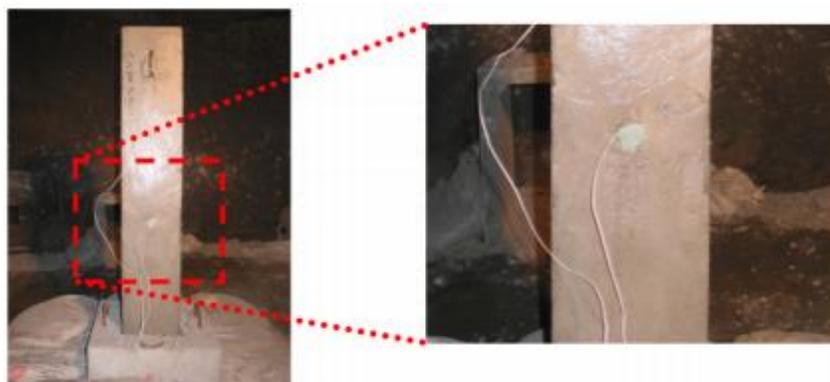


Figura 1. Colocación de la carga explosiva confinada en la columna

Fuente: (Fujikake & Aemlaor, 2013)

Las variables analizadas en el estudio de (Fujikake & Aemlaor, 2013) para determinar la cantidad de explosivo que se debe colocar en el trabajo de demolición fueron: el área de la columna

a derrocar y el factor C. Dicho factor es propio del explosivo que en el caso de la investigación fue Composition 4 (C4). Los investigadores variaron el factor C del explosivo en tres valores: 0.15 kg/m², 0.40 kg/m² y 0.60 kg/m².

Las columnas analizadas fallaron casi en su totalidad, no todas trabajaron del mismo modo debido a que sus características físicas y mecánicas no fueron las mismas en todos los casos. Los 14 especímenes se los dividieron en 8 grupos, cuyas variables eran: resistencia a la compresión del hormigón, reforzamiento longitudinal y el reforzamiento transversal.

Finalmente, (Fujikake & Aemlaor, 2013) concluyeron que para realizar trabajos de demolición con explosivo C4 confinado, se debe trabajar con factores C de 0.40 kg/m² y 0.60 kg/m², en la Figura 2 se presenta como el factor del explosivo C afecta a la resistencia residual.

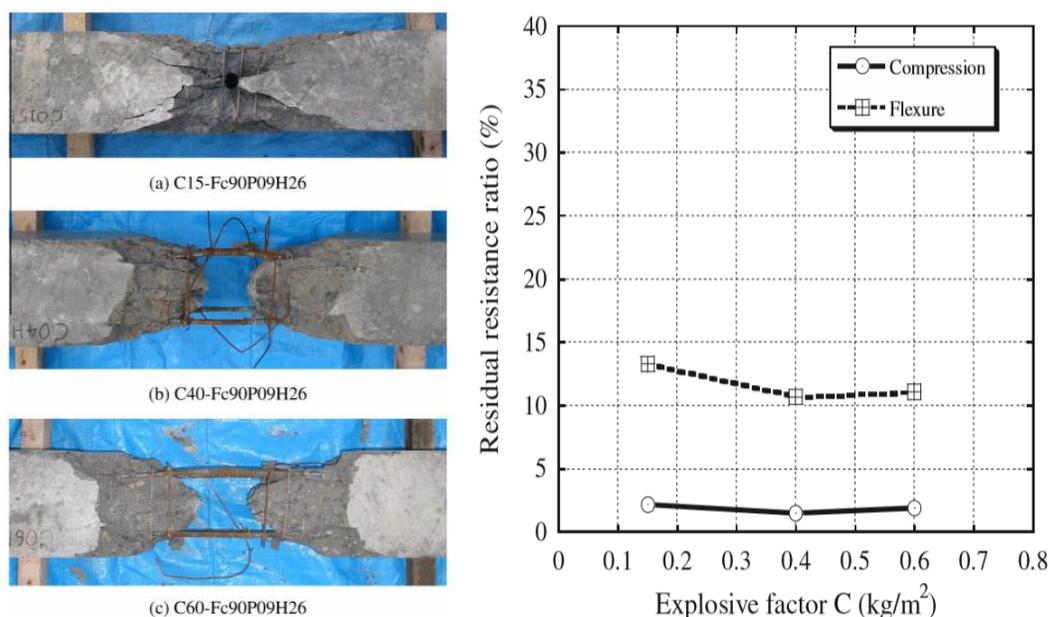


Figura 2. Influencia del factor del explosivo en la resistencia de los especímenes
Fuente: (Fujikake & Aemlaor, 2013)

(Astarlioglu, Krauthammer, Morency, & Tran, 2013) realizaron una investigación sobre el comportamiento de columnas de hormigón armado frente a cargas explosivas como se muestra en

la Figura 3. Las variables que se consideraron para desarrollar la investigación fueron: carga axial y el armado longitudinal. Las variables utilizadas jugaron un papel significativo en el procesamiento de datos, siendo la carga axial la más influyente en la resistencia de la columna.



Figura 3. Deformación en columna de hormigón armado causada por detonación

Fuente: (Astarlioglu, Krauthammer, Morency, & Tran, 2013)

Las columnas en las que se experimentó tenían una sección transversal de 406 x 406 mm y 3.66 m de longitud. El hormigón de las columnas poseía una resistencia a la compresión de 276 kg/cm², dichas columnas fueron experimentadas en dos casos diferentes de condición de borde: simplemente apoyadas y empotradas en sus extremos. La carga axial aplicada a las columnas fueron 3 tipos: 2224 kN, 3559 kN y 6672 kN; esta variación estuvo en conjunto con la de presión del explosivo (Astarlioglu, Krauthammer, Morency, & Tran, 2013).

Concluida la investigación lograron demostrar que, la carga axial influye directamente en la deformación causada por la detonación, mientras mayor es la carga axial, mayor será el daño en la columna. De igual manera el explosivo no fue colocado junto al elemento, por lo que solo causó deformación. Cuando la columna se deforma deja de soportar a compresión y pasa a trabajar a

flexión, redistribuyendo la carga que soportaba a otros elementos portantes (Astarlioglu, Krauthammer, Morency, & Tran, 2013).

Por otro lado, (Tran, 2009) realizó un estudio en el que aplicaron cargas espontáneas y de corta duración a cuatro columnas de hormigón armado de resistencia a la compresión de 4000 psi. Dichas columnas tenían refuerzo de acero diferente en cada una de ellas, la cuantía de cada una fue: 1.88, 4.88, 7.31 y 3.52 respectivamente. Las dimensiones de las columnas fueron de 16" x 16" x 144".

Se utilizó para simular tal fenómeno cargas explosivas, la presión de detonación se la calculó mediante la fórmula de (Brode, 1955) y la de (Newmark & Hansen, 1961). Esta presión simulaba las cargas laterales, que sumadas a la carga axial deformaban a las columnas. Finalmente, (Tran, 2009) concluyeron que dicho fenómeno se lo puede modelar como un sistema de un grado de libertad. Los resultados fueron comprobados utilizando el programa ABAQUS.

(Siba, 2014), estudió el efecto de cargas explosivas colocadas cercanas a columnas de hormigón armado (tradicional, pre tensado y post tensado), la fase experimental la desarrollaron en la Base Petawawa del ejército de Canadá. El autor construyó una estructura de hormigón post tensado que fue modelado como un muro en voladizo; de igual manera, la estructura fue diseñada contra volcadura y deslizamiento. El propósito de construir dicha estructura fue brindar, durante los ensayos experimentales con cargas explosivas, la condición de empotramiento perfecto a las columnas. En la Figura 4 se presenta la estructura de hormigón pre tensado construido para la experimentación y en la Figura 5 se muestra el proceso experimental.

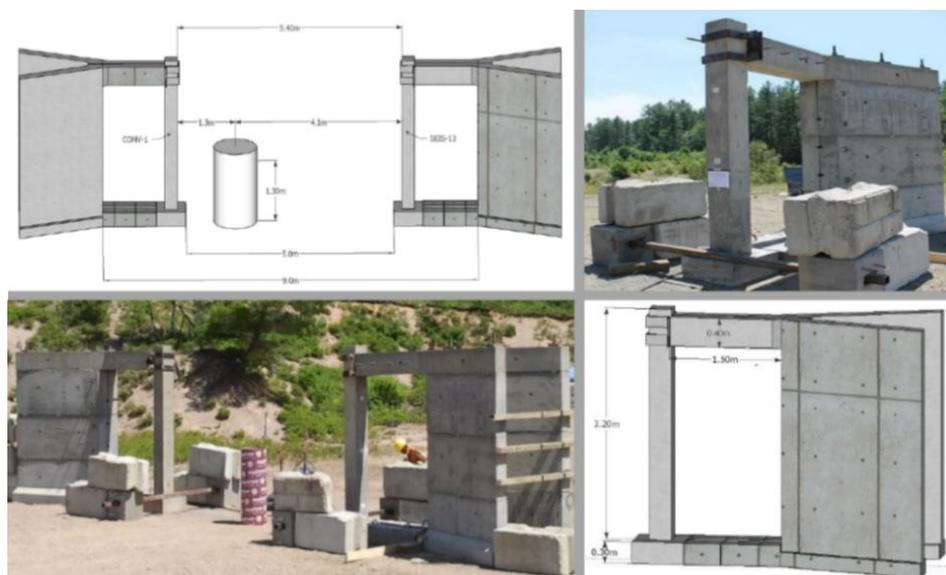


Figura 4. Estructura de soporte modelada con columna pegada
Fuente: (Siba, 2014)



Figura 5. Ensayos destructivos realizados en elementos tipo Columna H.A.
Fuente: (Siba, 2014)

El estudio analizó los efectos de la explosión originados en el acero de refuerzo, la afectación por la carga axial basada en la comparación de los modos de falla y el daño en las columnas en función del Coeficiente Z (distancia escalada de Hopkinson-Cranz). Los resultados determinaron que, a menor espaciamiento en el armado del acero transversal de refuerzo, mayor es la resistencia a la explosión; así también que, mientras aumenta la distancia de aplicación del explosivo, el daño en las columnas es menor (Siba, 2014).

1.4. Justificación e Importancia

Esta investigación es la base de estudio del proyecto “Desarrollo de curvas de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de hormigón armado a través de simulación computacional y pruebas experimentales” el cual proveerá a futuro el conocimiento para realizar implosiones en edificaciones bajo la acción de cargas explosivas con insumos y personal nacional.

En el campo de investigación que se desarrolla el proyecto, no existe ningún tipo de estudio similar previ6, debido a la ejecuci6n de la fase experimental, en donde se emplean equipos y materiales, dise1ados y construidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, para cumplir con los objetivos que se requieren para una demolici6n controlada de estructuras en el pa6s.

Existen varios experimentos a nivel mundial sobre este tema, pero con diferentes procesos en los ensayos y el equipo utilizado. La presente investigaci6n se basa en la evaluaci6n de los efectos en elementos de hormig6n construidos bajo los m6todos, materiales, par6metros y normativas vigentes para la construcci6n en nuestro pa6s.

El explosivo que se utiliz6 en este proyecto fue escogido de acuerdo a la capacidad de producci6n y distribuci6n de la f6brica de explosivos del pa6s, ya que el importar o generar nuevas geometr6as de cargas explosivas, generar6a mayores costos de fabricaci6n e importaci6n, lo que nos llevar6a a perder el principio de disminuir costos, priorizar la tecnolog6a y los productos nacionales.

El proyecto de investigaci6n permitir6 contribuir con el desarrollo de las curvas de da1o en elementos de hormig6n armado con el empleo de explosivos, que permitan establecer los efectos, cantidad y tipo de explosivo que se requiere para causar colapso en elementos de hormig6n que

conlleva a la aplicación de las demoliciones controladas de estructuras. Además de impulsar la investigación en temas de seguridad y defensa, que es la base fundamental de la presencia de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE en el ámbito de educación superior.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar curvas de daño que permitan establecer la cantidad de explosivo que se requiere para la detonación de columnas de hormigón armado, por efecto de cargas explosivas y bajo sollicitación de carga axial observados en probetas ensayadas a escala real, para evaluar el daño estructural en elementos de hormigón armado.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el diseño y proceso constructivo bajo especificaciones técnicas y parámetros de control de calidad nacionales e internacionales, de los elementos estructurales diseñados y construidos en el proyecto “Desarrollo de curvas de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de hormigón armado a través de simulación computacional y pruebas experimentales”
- Establecer un protocolo de experimentación: antes, durante y después de cada ensayo, que involucre maniobrabilidad mecánica, instalación de columnas, puesta a punto del banco de pruebas (máquina de ensayos), colocación de las cargas explosivas y parámetros de seguridad para el personal y el entorno.
- Realizar ensayos destructivos de las columnas de hormigón a escala real (1:1).

- Recolectar, procesar y analizar estadísticamente los datos obtenidos en los ensayos destructivos.
- Realizar pruebas de laboratorio del estado final del concreto y del acero de refuerzo.
- Desarrollar curvas características que relacionen el estado final de los elementos estructurales en función de la cantidad de explosivo, propiedades mecánicas y geométricas de los elementos estructurales, basadas en el análisis obtenido por los ensayos experimentales y por análisis científico.
- Evaluar el nivel de daño por causa de la acción de cargas explosivas que se aplican sobre las probetas tipo columna de hormigón armado; mediante la observación directa: (pérdida de masa, rotura y/o fluencia del acero de refuerzo, entre otras).

1.6. Área de Influencia

El área de aplicación es a nivel nacional en donde las demoliciones controladas intervienen en el ámbito de las operaciones militares y el apoyo a la gestión de riesgos, donde el estudio de las demoliciones controladas, incursionan en los ámbitos de la investigación, innovación y transferencia de tecnología para desarrollar las líneas de investigación de seguridad y defensa aplicadas a la ejecución de las operaciones militares de ingeniería; estructuras y construcciones y todas las áreas de conocimiento que se requieran para las demoliciones y derrocamientos de estructuras en estado de riesgo y por necesidades estratégicas en las operaciones militares.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Demoliciones controladas con explosivo

2.1.1. Reseña Histórica

Para entender a profundidad en qué consisten las demoliciones controladas con explosivos se debe tomar en consideración la historia y el porqué del uso de técnicas de demolición con explosivos. Es así que el momento más importante de las demoliciones urbanas fue en el siglo XIX, cuando la modernización en infraestructura llega a su punto más alto con los cambios drásticos en métodos y materiales de construcción, conservando las huellas de los métodos constructivos pasados, pero borrados totalmente por sus resultados más eficientes, duraderos y tecnológicos. Estructuras obsoletas que dejaron huellas de un pasado insalubre, hacinado, pestilente, promiscuo, oscuro, húmedo, envilecedor, que no permitía el despliegue del progreso y sus manifestaciones urbano – arquitectónicas, ese fue el primer acto sublime de la demolición: el pasado fue borrado con pico, pala y con las primeras apariciones de compuestos químicos como la pólvora y la nitroglicerina que se irían convirtiendo en sustancias de alto poder destructivo (Thiele, 2007).

Los procesos de modernización se aceleran en el siglo XX cuando las edificaciones tienen menor duración, entre otras razones, por su propia condición moderna, en este siglo y el pasado, la mayoría de los edificios construidos con el empleo de las tecnologías proporcionadas por su propio tiempo están condenados a sufrir el veloz envejecimiento de sus componentes constructivos. El poeta Baudelaire con su frase “La modernidad es lo transitorio, lo fugitivo, lo contingente” es la

descripción exacta y manifiesta de la industria, porque debe modificar continuamente sus productos, mejorarlos, aplicar nuevos conceptos, nuevos materiales (Thiele, 2007).

En el ámbito militar la historia de la Ingeniería, a través de los tiempos el hombre ha tenido que hacer uso de su ingenio para poder enfrentar las amenazas provenientes de la naturaleza y de sus semejantes; estos dos factores han sido determinados en el desarrollo de la humanidad. La guerra nace con el hombre en su empeño por defender el clan, la tribu, su espacio geográfico, el país, su nación; en su entorno se van generando cambios trascendentes destinados a modificar su contenido y facilitar su ejecución, desde sus inicios, el combatiente se vió en la necesidad de ejecutar trabajos tendientes a facilitar las marchas, los estacionamientos y las acciones de combate, a más de participar en trabajos de carácter técnico dirigidos a construir, destruir y sistematizar el campo de batalla, en este contexto la importancia del uso de explosivos fue primordial para la ejecución de las operaciones militares y el apoyo al desarrollo de las naciones (Ejercito, 2017).

2.1.2. Definición

Las demoliciones de estructuras de hormigón armado, se caracterizan por lo general en el uso de explosivos, que tienden a separar el hormigón del acero de refuerzo con mayor rapidez, que utilizar una excavadora equipada con un martillo de demolición hidráulica, además ayuda en el reciclaje del acero de refuerzo (ENGINEERS, 2016).

2.1.3. Generalidades de las demoliciones

Generalmente, en la demolición de estructuras se eliminan ciertas restricciones y se ejecutan la separación de algunos elementos rígidos. La demolición considera la desintegración no de estructuras naturales sino de estructuras diseñadas de acuerdo con los principios de la ciencia de la

construcción, que utilizan elementos rígidos (vigas, pilares, placas y perfiles metálicos) conectados entre sí a través de sistemas de restricciones más o menos complejos. Esto se refiere a la desintegración de edificios, torres, puentes, plantas industriales, estas operaciones se puede definir con el término de "demoliciones" (Berta, 1996). En la Figura 6 se muestra un ejemplo de la demolición de estructuras.



Figura 6. Voladura por demolición del edificio Monzese en Milán
Fuente: (Berta, 1996)

2.1.4. Propósito

El propósito de las demoliciones es esencialmente el desarticular la estructura para ponerlo sobre el terreno, por lo que es suficiente intervenir de forma limitada cierto número de elementos y volúmenes relativamente reducidos de la estructura a derrocar. Al destruir con explosivos estos elementos la estructura se vuelve inestable, lo que refleja aún más las consecuentes deformaciones que sufre durante la caída y al momento de impacto (Berta, 1996). En la Figura 7 se muestra cómo se desarticula una estructura luego de la aplicación de la carga explosiva.

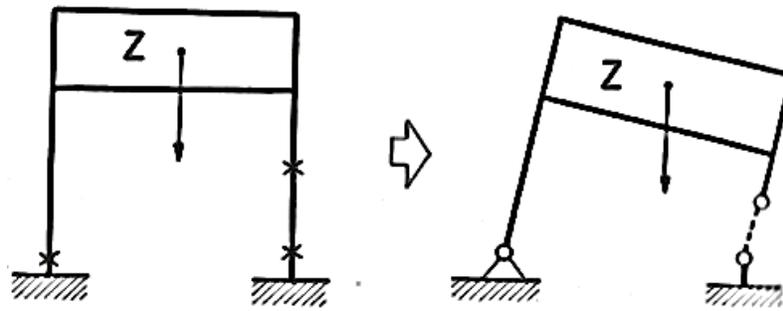


Figura 7. Desarticulaciones con carga explosiva de una estructura
Fuente: (Berta, 1996)

En las demoliciones controladas de edificaciones y construcciones en general, el hormigón es el material que se encuentra con mayor frecuencia en las estructuras. La demolición con cargas explosivas puede garantizar la desintegración del hormigón. El corte de los hierros no es seguro (prácticamente nunca ocurre) porque para propósitos ejecutivos es aconsejable que los orificios estén lejos del refuerzo. Como consecuencia, la carga no se puede colocar en contacto con los hierros (la única posición del explosivo que puede asegurar su corte). Por lo tanto, el propósito es verificar que la restricción o el elemento rígido pueda considerarse eliminado solo con la desintegración del concreto (ENGINEERS, 2016).

2.1.5. Características de Diseño

El diseño de voladura del concreto es similar en algunos aspectos a la voladura en roca, ya que la resistencia a la tracción del concreto es aproximadamente el 10% de su resistencia a la compresión. La resistencia a la tracción adicional se obtiene mediante el uso de acero de refuerzo (ENGINEERS, 2016).

Al diseñar detonaciones para demoler estructuras, es necesario conocer el tamaño y la distribución del acero de refuerzo dentro de la estructura. Esto se puede determinar a través del

análisis de los planos junto con el astillado del concreto para exponer el acero de refuerzo y verificar la condición (tal como está construida) de la estructura (Army, 2007).

En las estructuras de gran altura de voladura, el peso de la estructura se utiliza para derribarla. Es necesario diseñar la voladura para vencer la resistencia del acero de refuerzo en la estructura. Los explosivos se usan no solo para romper el concreto, sino también para deformar el acero de refuerzo en las columnas. La deformación del acero de refuerzo hace que pierda su fuerza, lo que permite que la estructura se colapse (ENGINEERS, 2016).

Los efectos de detonación con explosivos, se convierten violentamente en gas altamente comprimido. El tipo de explosivo, la densidad, el confinamiento y las dimensiones determinan la velocidad a la que la carga cambia a un estado gaseoso (Army, 2007).

2.1.6. Proceso de demolición

En la demolición controlada de estructuras, la voladura secundaria es el proceso de reducción de material de gran tamaño para su procesamiento y manejo. El material de gran tamaño puede ser causado por muchos factores, entre ellos: la geometría de la explosión de preacondicionamiento, diseño inadecuado, geología, mal funcionamiento de explosivos y fallas en los diseños de los elementos de hormigón (ENGINEERS, 2016).

Como parte del proceso de la voladura controlada se debe tomar en cuenta el factor de polvo (la presión que ejercerá el explosivo en elementos de hormigón), el uso dependerá de la situación y la resistencia del hormigón. El factor de polvo puede variar desde 0.30 kilogramos / metro (0.7 libras / yarda) para estructuras más débiles hasta 0.90 kilogramos / metro (2 libras / yarda) para estructuras fuertemente reforzadas (ENGINEERS, 2016).

Antes de la demolición se debe realizar una voladura de prueba que generalmente se lleva a cabo para determinar qué cantidad mínima de explosivos se requiere para lograr la desviación total del acero de refuerzo (ENGINEERS, 2016). La secuencia de retardo en el proceso de demolición se diseña para dirigir el colapso de la estructura. En el caso de edificios de gran altura, se usan cables de alambre para tirar de las paredes exteriores hacia el centro (ENGINEERS, 2016).

En la demolición se debe llevar el control de los fragmentos, mediante el uso de métodos innovadores para demoler estructuras de hormigón armado con cargas muy ligeras. Para evitar cortes en la demolición de una estructura, es importante seleccionar una secuencia de retardo que permita que todos los detonadores se energicen antes de que se dispare la primera carga (ENGINEERS, 2016).

La fragmentación del hormigón armado ofrece desafíos únicos. La dureza del concreto puede variar dependiendo de su antigüedad, la dureza del agregado utilizado y la presencia de aditivos como los aceleradores utilizados en la mezcla. La presencia del acero de refuerzo se suma al desafío. La fragmentación de hormigón es similar a la fragmentación en conglomerado, donde la dureza y la abrasividad dependen de la composición de los elementos que se fusionan. El hormigón puede ser quebradizo y si es bastante débil y se romperá fácilmente cuando se lo destruya (ENGINEERS, 2016).

El hormigón resistente que contiene agregados livianos se usa a menudo en los pisos superiores de las estructuras de gran altura. A menudo, la única forma de destrucción es fragmentar o juntar el concreto para exponer el agregado para una comparación visual. El acero de refuerzo variará mucho dependiendo del tipo de estructura, el acero más pesado se encuentra en los pisos inferiores, mientras que el acero más ligero se usa en los pisos superiores (ENGINEERS, 2016).

2.1.7. Demoliciones en operaciones militares

Las operaciones de demolición, proporcionan información sobre el uso de obstáculos, los tipos de operaciones, la planificación de demolición, las órdenes de demolición, las demoliciones preliminares y reservadas, las órdenes y registros de reconocimiento y las carpetas de obstáculos (Army, 2007).

Los obstáculos de demolición son creados para el uso de explosivos. Si bien los ingenieros usan explosivos para la extracción de canteras, desmonte y otros proyectos, su uso más importante es crear obstáculos de demolición. Los ingenieros utilizan los obstáculos de demolición junto con muchos otros tipos de obstáculos, incluidas las minas. También usan explosivos para destruir el material e instalaciones que deben abandonarse (operaciones de negación) (Army, 2007). En la Figura 8 se muestra la ejecución de una demolición que cumple con los objetivos de contra movilidad.

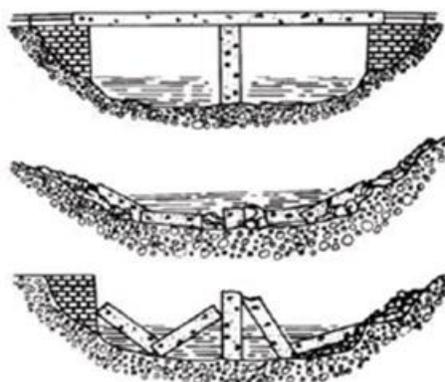


Figura 8. Demolición de Puente
Fuente: (Army, 2007)

Las barreras y operaciones de negación, son operaciones en las cuales los comandantes de división o de rango superior dirigen el uso de barreras extensas y operaciones de negación. Los comandantes deben preparar y coordinar cuidadosamente estas operaciones con todos los planes

tácticos. Las unidades de ingenieros brindan asesoría y supervisión técnica, estiman los recursos necesarios para la construcción de obstáculos, construyen barreras u obstáculos y recomiendan la asignación de recursos de ingenieros. Por lo general, construyen obstáculos de demolición porque tienen las habilidades y equipos especiales para realizar estas tareas (Army, 2007).

En las demoliciones consideradas como reservadas, el comandante responsable debe controlar cuidadosamente un objetivo de demolición reservado. El objetivo puede ser una parte vital del plan táctico o estratégico o la demolición se llevará a cabo en contacto cercano con el enemigo (Army, 2007).

2.1.8. Riesgos y peligros en las detonaciones

La contención de escombros de fragmentos de hormigón es uno de los mayores desafíos con la voladura del hormigón armado. Muchas estructuras que requieren demolición están en áreas congestionadas o pueden estar contenidas dentro de una zona industrial (Army, 2007).

El uso de esteras de voladura, relleno, capas de cercas de eslabones de cadenas y telas filtrantes, madera contrachapada, cintas transportadoras y arena se han utilizado para controlar los desechos voladores. En muchos casos, se requiere un debilitamiento previo de la estructura. Esto puede implicar la eliminación selectiva de columnas y paredes no estructurales, y el corte de los pisos o paredes de la estructura (ENGINEERS, 2016).

El impacto por la acción de los explosivos, pueden causar lesiones graves y pueden ser fatales. Los dos tipos de lesiones por impacto son la aceleración y la desaceleración. Las lesiones por aceleración se pueden producir de dos maneras. Primero, el cuerpo o una parte del cuerpo son impactados por un proyectil o fragmento, esto se llama trauma contundente (Army, 2007).

Segundo, la víctima es golpeada con la onda de presión de explosión, que es acelerada a través del aire. Las lesiones por desaceleración ocurren cuando una víctima se impacta sobre una superficie. Las lesiones pueden ir desde laceraciones hasta lesiones cerebrales masivas (Army, 2007).

Para evitar riesgos se debe elaborar un plan de demolición integral de todas las columnas y muros a detonar, para colocar las cargas se identifican con una secuencia de numeración tanto en la estructura como en los dibujos. Los tamaños de carga pueden calcularse y tabularse en un plan de carga, haciendo referencia a cada número de barrenos (Army, 2007).

2.1.9. Tipos de demoliciones

El trabajo de una demolición es un análisis cuidadoso de las estructuras para identificar los elementos a detonar y para definir la sucesión temporal de la detonación. La detonación a los elementos de la estructura puede llevarse a cabo por medios mecánicos o por explosiones (Berta, 1996).

Las cargas explosivas en edificaciones categorizan a las detonaciones en confinadas y no confinadas. Las explosiones confinadas se producen cuando la explosión se inicia dentro de una edificación y la reacción explosiva se puede amplificar a través del rebote de la onda expansiva en las superficies internas de la estructura, este fenómeno está acompañado de una presión de gas cuasi-estática que resulta del incremento de temperatura. En el caso de las explosiones no confinadas, se considera cuando las cargas explosivas son detonadas a cielo abierto y la onda expansiva se propaga lejos de la fuente hacia la estructura (Conrath, E. et al., 1999).

Las explosiones no confinadas pueden clasificarse bajo tres diferentes condiciones: cuando la onda de choque producida se propaga alejándose de la fuente e incide en la estructura sin ninguna

amplificación; el segundo caso se presenta cuando la detonación ocurre a una distancia alejada de la estructura de modo que la onda expansiva se refleja en el suelo antes de que alcance la estructura y el tercer caso se presenta cuando la detonación ocurre cerca del suelo y la onda de choque inicial es amplificada en este punto por efecto de rebote con el suelo (Conrath, E. et al., 1999).

2.1.10. Selección de explosivos

La elección de explosivos en la demolición de estructuras de hormigón armado es importante, se requiere un explosivo con alto poder brisante o destructor, junto con la capacidad de ser cortado en varias longitudes. El alto explosivo es generalmente usado para la demolición de columnas, mientras que el cordón detonante se usa en voladuras de paredes de corte (ENGINEERS, 2016).

Además, determinar la cantidad y la colocación de explosivos son factores claves en el propósito de los proyectos de demolición militar. Los principios de demolición y el análisis de factores críticos guían a un soldado en el trabajo con cargas explosivas. Las fórmulas disponibles para los cálculos de demolición se basan en los efectos de detonación, la importancia de la dimensión de la carga y la importancia de la colocación de la carga (Army, 2007).

2.1.11. Dimensión de Carga

Para las demoliciones controladas es fundamental realizar un exacto dimensionamiento de las cargas explosivas, primero se debe realizar un examen analítico de las estructuras más comunes para determinar el tamaño de las cargas explosivas necesarias para las intervenciones destructivas en los elementos que componen las estructuras, generalmente están compuestos por los siguientes materiales: mampostería, hormigón armado, placas y perfiles metálicos (ENGINEERS, 2016). Estos materiales tienen su comportamiento característico cuando están sujetos a los efectos de una

explosión, y este comportamiento debe tenerse en cuenta cuando se va a dimensionar las cargas explosivas necesarias para la ruptura. La carga explosiva puede ponerse en contacto con el elemento que se va a desintegrar o cortar esencialmente de dos maneras: el explosivo en un orificio cargado o apoyadas en la superficie de una cara del elemento (ENGINEERS, 2016).

La fuerza de una explosión depende de la cantidad y potencia del explosivo. El efecto destructivo depende de la dirección de la fuerza explosiva. Para transmitir el mayor impacto, una carga debe tener la relación óptima entre el área de contacto, el espesor con el volumen y la densidad del objetivo. Si una carga calculada se distribuye de poco espesor, no se proporcionará espacio suficiente para que la onda de choque alcance la velocidad máxima antes de golpear el objetivo (Army, 2007).

La importancia de la colocación de cargas va relacionada con el efecto destructivo y depende de la ubicación de la carga en relación con el tamaño, la forma y la configuración del objetivo. Cualquier espacio de aire o agua significativo entre el objetivo y el explosivo disminuirá la fuerza de la onda de choque. Se utiliza las cargas internas para lograr la máxima destrucción con el mínimo gasto de explosivos. Apisonar las cargas externas aumenta su efecto destructivo (Army, 2007).

2.1.12. Tipos de carga

Las cargas internas y externas son los dos tipos de carga. Las cargas internas son cargas que se colocan en barrenos en el objetivo. Las cargas externas que se colocan en la superficie del objetivo (Army, 2007).

2.1.12.1. Cargas internas

Las cargas internas son el método más seguro, eficiente y rentable para tratar con rocas de gran tamaño y con demoliciones de estructuras. Se requiere la perforación y cantidades significativamente pequeñas de explosivos para obtener los mismos o mejores resultados (ENGINEERS, 2016).

Las cargas internas se limitan con arena compactada, arcilla húmeda u otro material (vástago). La derivación es el proceso de empaquetar el material sobre un barrenado interno o una carga de cráter. El material del vástago se llena y se aplasta contra el explosivo para llenar el pozo hasta la superficie. En los agujeros perforados, apisonar el explosivo mientras se carga en el agujero (Army, 2007). En la Figura 9 se muestra la colocación de una carga interna o confinada en un elemento estructural.

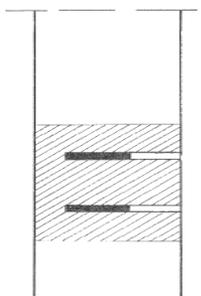


Figura 9. Carga interna o confinada en una columna

Fuente: (Berta, 1996)

2.1.12.2. Cargas Externas

Las cargas externas están cubiertas y manipuladas con arena, arcilla u otro material denso bien compactado. El material del tallo puede estar suelto o en bolsas de arena. Para ser más efectivo, haga que el grosor del material de apisonamiento sea al menos igual al radio de ruptura (Army, 2007).

El uso de cargas externas para romper el tamaño excesivo es el método más rápido y menos costoso para la tarea. También crea el mayor peligro para la voladura y requiere de mayores cantidades de explosivos para el mismo resultado. Los explosivos deben ser de alta velocidad (brísense). La carga debe estar en contacto estrecho con la superficie y en el centro de gravedad. Puede ser necesario algún método de fijación (cable, cinta, cuerda) para mantener la carga ajustada al tamaño excesivo. El uso de cargas superficiales no confinadas se refiere a la demolición de estructuras de acero o la demolición de estructuras peligrosas, en un equilibrio precario, en el que es demasiado peligroso perforar pozos (Berta, 1996). En la Figura 10 se muestra los efectos de una carga externa o no confinada en un muro estructural.



Figura 10. Carga externa o no confinada en muros"

Fuente: (Berta, 1996)

2.2 El Explosivo

Es aquella sustancia o mezcla de sustancias de naturaleza química, cuya reacción (REDOX) adopta la descomposición definida en la detonación por una reacción explosiva. El estado físico

del explosivo puede ser: sólido (TNT, exógeno, pentrita, entre otros), líquido (nitroglicerina, nitroglicol, entre otros) y gaseoso (acetileno, grisú, butano, entre otros) (Mora, 2013).

2.2.1. Efectos del explosivo

Cuando el explosivo es detonado, el material explosivo se convierte instantáneamente en una masa de gases rápidamente expandida. La detonación explosiva dará como resultado cuatro efectos fundamentales que pueden afectar: presión de explosión, fragmentación, efecto térmico y envenenamiento químico (Army, 2007).

La presión resultante forma una onda de choque de compresión que rompe y desplaza los objetos en su camino (Army, 2007). Una carga de alto explosivo (HE) detonada en contacto directo con un objeto sólido produce los siguientes cuatro efectos detectables y destructivos: deformación, fragmentación, fractura radial y la presión de la explosión.

2.2.1.1. Deformación

La carga de la onda de choque deforma la superficie del objeto directamente debajo de la carga. Cuando la carga se coloca sobre una superficie de concreto, provoca una onda de choque de compresión que fractura el concreto en las inmediaciones de la carga, formando un cráter (Army, 2007).

2.2.1.2. Fragmentación

La onda de choque de la carga se desprende de la superficie del objeto directamente debajo de la carga. Debido a la diferencia de densidad entre el objetivo y el aire, la onda de choque de compresión de la carga se refleja como una onda de choque de tracción desde la superficie libre si el objetivo tiene una superficie libre en el lado opuesto a la carga. Esta acción provoca el

desprendimiento de la superficie libre de objetivos. El cráter y los espolones pueden reunirse para formar un agujero a través de la pared en demoliciones de concreto (Army, 2007).

2.2.1.3. Fractura radial

Si la carga es lo suficientemente grande, los gases en expansión pueden crear una carga de presión en el objeto que provocará el agrietamiento y el desplazamiento del material, cuando se coloca en paredes de concreto, la carga puede romper la superficie en una gran cantidad de trozos y proyectarlos lejos del centro de la explosión (Army, 2007).

2.2.1.4. Presión de explosión

Una vez que se produce la detonación, una masa de gas en expansión se desplaza hacia afuera en un patrón circular desde el punto de detonación, como una ola gigante, rompiendo cualquier objeto en su camino. Cuanto más lejos se desplaza la onda de presión desde el punto de detonación, menor es el poder que posee hasta que se reduce a la nada (Army, 2007).

La presión de explosión tiene dos fases de presión: positiva y negativa. Fase de presión positiva, cuando la onda de presión de explosión se forma en el instante de la detonación, la presión comprime la atmósfera circundante. La capa de aire comprimido, conocida como el frente de choque, es el borde delantero de la presión positiva. El frente de choque tiene solo una fracción de pulgada de espesor y es la parte de la atmósfera que se comprime antes de que se ponga en movimiento. A medida que el frente de choque, seguido de la onda de presión positiva se desplaza hacia afuera, aplica un golpe repentino y punzante a cualquier objeto en su camino. Fase de presión negativa, a medida que el frente de choque se mueve hacia afuera, empuja el aire circundante lejos

del punto de detonación (ENGINEERS, 2016). El aire desplazado que se apresura hacia el punto de detonación tiene masa, potencia y gran velocidad.

Además de tener dos fases de presión, el efecto de explosión crea otros efectos que pueden causar problemas importantes para el equipo que rompe. Esto se conoce como fenómeno de presión de explosión (Army, 2007). El fenómeno de la presión de explosión también incluye: la presión dinámica. La presión dinámica, es la presión de transición ejercida sobre un objeto por la explosión. Esta es la presión que se siente y el daño causado por el impacto del frente de choque con el objeto (Army, 2007).

La presión del incidente es la presión medida a 90° con respecto a la dirección de desplazamiento del frente de explosión. La presión reflexiva es una acumulación rápida de presión que se produce cuando un frente de choque golpea cualquier superficie en la línea de desplazamiento y rebota (American Society of Civil Engineers, 2011). En la Figura 11 muestra el comportamiento de la presión del explosivo y su efecto de la onda de choque.

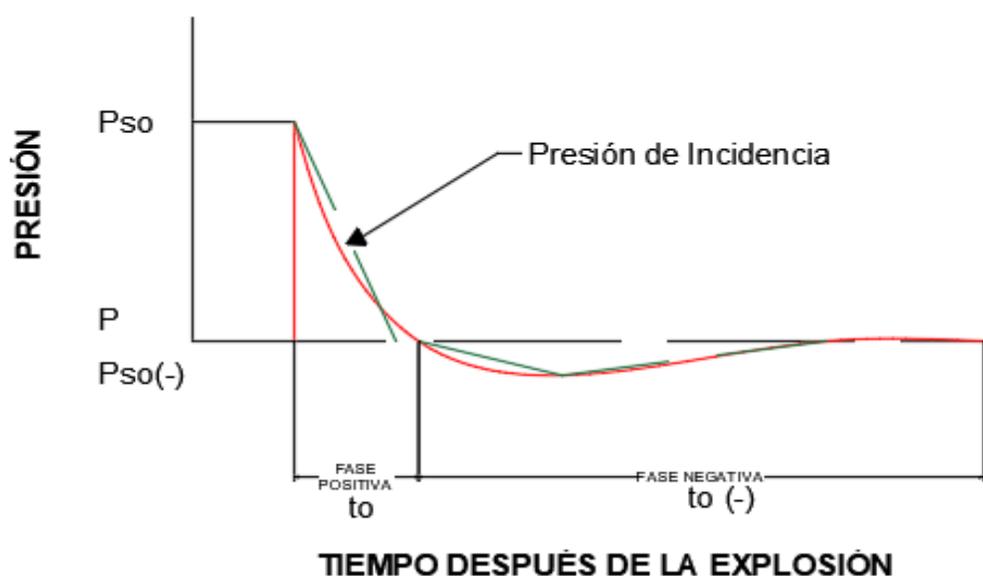


Figura 11. Curva de la Presión de incidencia
Fuente: (American Society of Civil Engineers, 2011)

La descomposición del explosivo puede efectuarse por cuatro mecanismos distintos, dependiendo de la naturaleza de la propia sustancia y de la forma de inclinación de dicha descomposición siendo estos: por descomposición molecular lenta, por combustión en espacios abiertos a presión normal, por combustión a presión en espacios cerrados (deflagración) y por detonación (Mora, 2013).

2.2.2. La Pentolita

Es una mezcla de PENT y TNT en un 50 % y 50 % (existen presentaciones que varía el porcentaje de acuerdo a la necesidad) se usa como cargas direccionales (rompedores cónicos, cilíndricos y cúbicos), debido a su alto poder y velocidad de detonación, su velocidad es de 7450 m/s y su Factor de efectividad relativa (F.E.R.) es 1.33 (Army, 2007).

La Pentolita es la base fundamental para la fabricación de los torpedos Bangalore, cargas huecas, cargas defensivas dirigidas, sismofex, pentofex, entre otros. La Pentolita es utilizada como carga de demolición adaptable a diferentes presentaciones de 1, ½, ¼, 1/8 de kilogramo y como carga reforzadora para la iniciación de los explosivos insensibles al detonador, es resistente a la humedad, y es una sustancia explosiva estable (Puerta, 2016).

2.2.3. Carga Cónica

Cargas Cónicas o rompedores cónicos son explosivos con cuerpos cónicos envasados en conos de cartón, llenos de pentolita. Los rompedores cónicos por su diseño geométrico poseen un efecto direccional desde la cima hasta la base del cono lo cual permite ser usado en voladuras (EXPLOCEN, Explosivos Encartuchados, 2017).

Los ROMPEDORES CONICOS APD (Alto Poder de Detonación) son cargas explosivas de alta potencia y gran seguridad por ser insensibles a los golpes o roces. Es un eficiente dispositivo para reducir rocas y elementos de hormigón en labores a cielo abierto o subterráneo, cuando no es práctico hacer perforaciones y es muy útil para remover material atascado en chimeneas y piques (EXPLOCEN, Explosivos Encartuchados, 2017).

2.3 Elementos de hormigón armado

Los elementos de hormigón armado tienen la capacidad de corte de un elemento estructural depende de la resistencia del hormigón, a pesar de que esta magnitud es representativa para el cálculo de la resistencia última de los elementos con rotaciones en los apoyos (menor a 2 grados), en cuyo caso a medida que se aumenta la resistencia del hormigón, se reduce la necesidad de acero de refuerzo. Para elementos con grandes rotaciones en los apoyos (2 a 12 grados), el agrietamiento y trituración del hormigón es menos severo cuando se emplea hormigón de mayor resistencia. Para el diseño de elementos resistentes a cargas explosivas (blast) en ninguna circunstancia la resistencia a la compresión del hormigón (f'_c) debe ser inferior a 3.000 psi, siendo recomendable utilizar hormigón de 4.000 psi, independientemente de la magnitud de los criterios de carga explosiva (blast) y deflexión (Army, U. S., 1990).

2.3.1. Columnas de hormigón armado

Una columna es un elemento estructural capaz de resistir cargas axiales y esfuerzos producidos por acciones dinámicas. Las columnas de hormigón armado constituyen piezas, generalmente verticales en las que la sollicitación normal es predominante. Sus distintas secciones transversales pueden estar sometidas a compresión simple, compuesta o flexo-compresión. Según su sección

transversal, existen columnas cuadradas, columnas rectangulares, columnas circulares, columnas en L, columnas en T, columnas en cruz, etc (Romo, 2008).

La función principal de las columnas es canalizar las acciones que actúan sobre la estructura hacia la cimentación de la obra y, en último extremo, al terreno de cimentación, por lo que constituye elementos de gran responsabilidad resistente. Las secciones de las columnas de hormigón armado pueden adoptar diversas formas si bien las más corrientes son las rectangulares y cuadradas, también los de sección circular se denominan columnas. En la Figura 12 se muestra las distintas geometrías transversales de columnas.

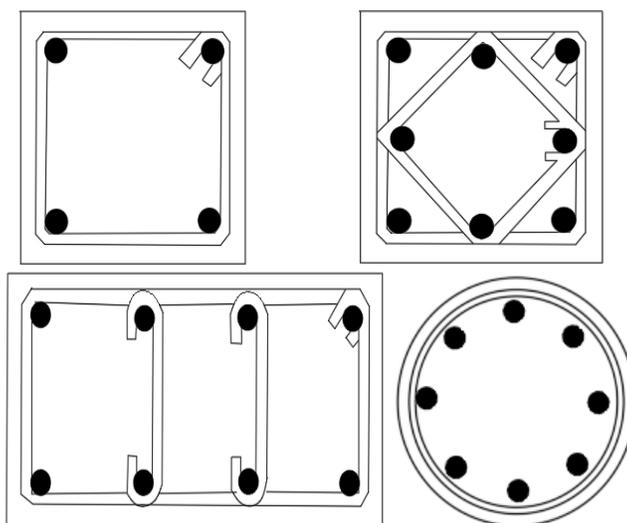


Figura 12. Distintas geometrías transversales de columnas”

Fuente: (Romo, 2008)

Según su comportamiento ante las sollicitaciones, existen fundamentalmente dos tipos de columnas de hormigón armado: columnas con estribos y columnas zunchadas (Romo, 2008). En la Figura 13 se muestra los tipos de columnas y estribos. Los estribos cumplen las siguientes funciones en las columnas:

- Definir la geometría de la armadura longitudinal.

- Mantener en su sitio al hierro longitudinal durante la construcción.
- Controlar el pandeo transversal de las varillas cuando están sometidas a compresión.
- Colaborar en la resistencia a las fuerzas cortantes.

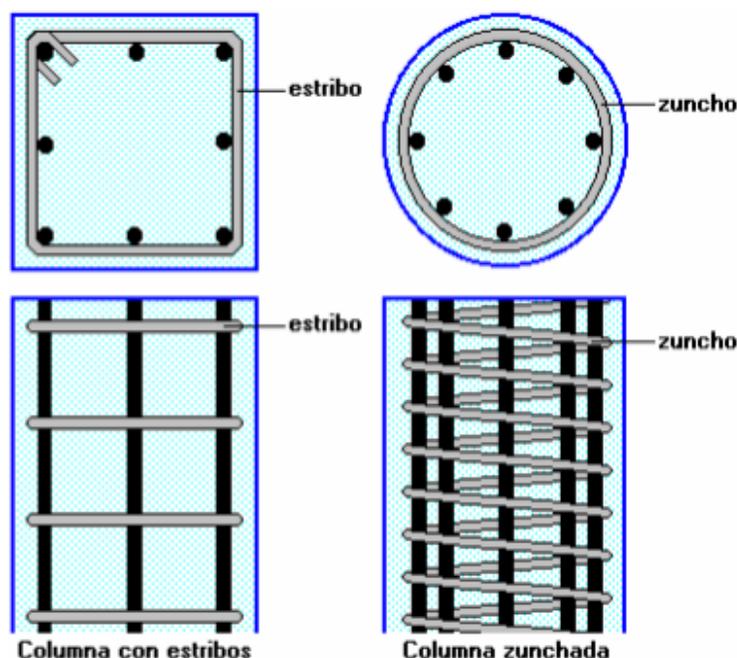


Figura 13. Columnas con estribos y columnas zunchadas
Fuente: (Romo, 2008)

Una columna corta es aquella en la que la carga axial última para una excentricidad dada depende exclusivamente de la capacidad de los materiales y las dimensiones de la sección transversal (Institute, 2011). Una columna larga es aquella en la cual la carga axial última está además influenciada por el efecto de esbeltez, el cual produce momentos flectores debido a las deformaciones transversales (Institute, 2011).

2.3.2. Consideraciones de diseño

La reglamentación vigente en el país para el diseño de estructuras de hormigón armado es la norma ecuatoriana de la construcción y su código NEC-SE-HM, aprobado y publicado por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, según registro oficial Nro. 413, de fecha 10 de enero

de 2015; es importante destacar que dentro de las referencias normativas técnicas se dispone acoger el Código ACI-318, “Building Code Requirements for Structural Concrete”; a su vez se estipula que los materiales de construcción, deberán ser evaluados y verificados por los organismos competentes, conforme al Reglamento Técnico Ecuatoriano (RTE. INEN) y la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN), así también los requisitos dados en las normas ASTM vigentes. En tal virtud de acuerdo con el protocolo técnico contemplado en el numeral 4.3 “Elementos en flexo-compresión”, se describe el procedimiento a seguir para diseñar elementos tipo columna de hormigón armado (MIDUVI, 2015).

El traslape mínimo de la armadura longitudinal será de 40 veces el diámetro de la varilla. El recubrimiento mínimo que garantice la no corrosión del acero debe ser de 4 cm o mayor. En la Figura 14 se muestra la distancia y medida del espaciamiento (Institute, 2011).

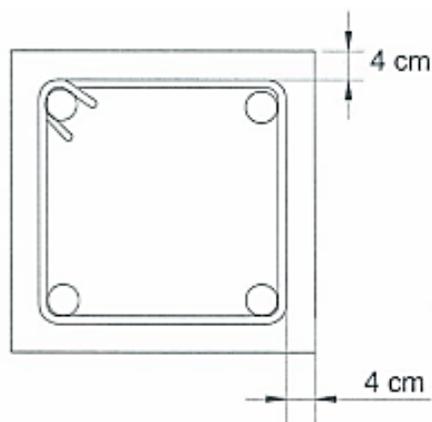


Figura 14. Columnas con estribos y columnas zunchadas

Fuente: (Institute, 2011)

Estos criterios tienen por objeto que el hormigón recubra adecuadamente a las varillas longitudinales de acero evitándose posibles discontinuidades en la adherencia del acero y el hormigón (Institute, 2011).

2.3.3. Resistencia a la compresión de columnas de hormigón armado

Experimentalmente se ha demostrado que la capacidad del concreto es menor que el correspondiente a la resistencia cilíndrica f'_c . La diferencia es lógica debido a la diferencia del espécimen en forma y tamaño, porque el hormigonado vertical de la columna lleva a la sedimentación de los materiales sólidos, en consecuencia, $K_c < 1$ (Romo, 2008).

Para la Carga Axial Nominal el ACI 318-11 considera el coeficiente de 0,85 como un valor seguro, de tal manera que el P_o (maxima capacidad de carga de la columna), puede ser expresado de la siguiente manera:

$$P_o = 0.85 * f'_c * (A_g - A_{st}) + A_{st} * f_y \quad (1)$$

Además, el ACI 318-11 menciona que las ecuaciones nominales que definen la capacidad de carga de una sección deben ser multiplicadas por los factores de reducción (ϕ) (Institute, 2011).

- $\Phi=0,65$ para columnas con estribos
- $\Phi=0,75$ para columnas con zunchos

El ACI 318-11 reduce la capacidad de carga axial P_o de columnas multiplicando al miembro de la derecha por un factor menor a uno (1), que es 0,80 (columnas con estribos) y 0,85 (columnas con zunchos). Para columnas con estribos se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_u = P_n \max = 0,80 \phi P_o \quad (2)$$

2.3.4. Carga Crítica de Pandeo

La carga axial que da inicio a la inestabilidad por pandeo en un elemento estructural se conoce como carga crítica de pandeo del elemento o carga de Euler (Institute, 2011). Se puede tomar como

referencia un elemento estructural de eje recto, sin imperfecciones del material ni del elemento, con una longitud L , de sección constante A e inercia I , constituido por un material lineal elástico cuyo módulo de elasticidad es E (Institute, 2011).

Al elemento seleccionado se le somete a una carga axial de compresión en el extremo del apoyo deslizante y se le proporciona en elástica de deformación flexionante continua similar a la que se observa en piezas de libre rotación en sus extremos debido a la inestabilidad por pandeo (Romo, 2008). En la Figura 15 se muestra la elástica de deformación.

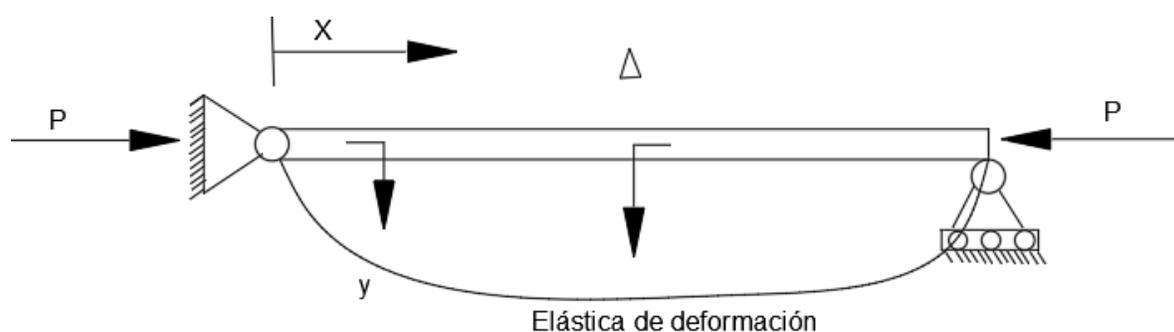


Figura 15. Elástica de deformación
Fuente: (Romo, 2008)

Para determinar la menor carga crítica se debe asociar con los valores de n , que para el caso del primer modo de deformación por pandeo se utiliza el $n=1$ (Institute, 2011). Para otros tipos de condiciones de borde, la ecuación básica de Euler para el primer modo de deformación se ve modificada por un factor de forma (k) de la elástica de deformación que afecta a la longitud de pandeo, como se indica en la Ecuación (3). En la Tabla 1 se describe el factor de forma de acuerdo a los tipos de apoyo de un elemento.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{(K L)^2} \quad (3)$$

Tabla 1
Factor de Forma

APOYOS	GRAFICO	K
Barra apoyada-apoyada		1,00
Barra empotrada-libre		2,00
Barra empotrada en los dos extremos		0,50
Barra empotrada-apoyada		0,70

Fuente: (Institute, 2011)

Para la determinación de la carga crítica de pandeo de una columna se debe utilizar dos hipótesis de comportamiento del hormigón: Hormigón no fisurado, sin agrietamiento de columnas sin refuerzo o poco refuerzo y Hormigón fisurado, es decir agrietado de columnas altamente reforzadas (Institute, 2011). En la Figura 16 se muestra la curva de la carga crítica y desplazamiento de un elemento estructural.

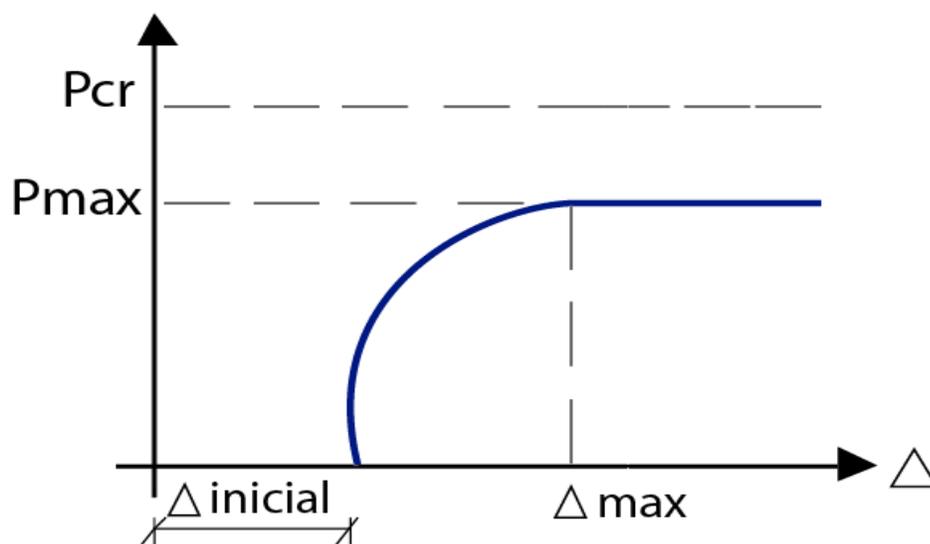


Figura 16. Curva carga crítica-desplazamiento

Fuente: (Institute, 2011)

2.3.5. Condición de Esbeltez

El comportamiento de una columna corta es posible en todos aquellos casos en los cuales los efectos de esbeltez, las condiciones de apoyo y arriostramiento, mayor o menor de la estructura no provoquen un serio problema de pandeo (Institute, 2011). La Ecuación (4) define la esbeltez de acuerdo a la siguiente relación:

$$\beta = \frac{k lu}{r} \quad (4)$$

Donde, β = es el coeficiente de esbeltez; r = radio de giro que el código recomienda calcular con la Ecuación (5) para columnas rectangulares se define en la siguiente expresión:

$$r = 0.30 * h \quad (5)$$

La esbeltez influye categóricamente en la estabilidad de la estructura, su magnitud es indicador útil en el diseño, dependiendo del grado de arriostramiento de la estructura, se reconoce dos casos (Institute, 2011). Para el caso de las columnas que pertenecen a sistemas no arriostrados puede despreciarse el efecto de la esbeltez con la Ecuación (6), y en el ACI se establece un valor máximo en la Ecuación (7) (Institute, 2011).

$$\frac{k * lu}{r} < 22 \quad (6)$$

$$\frac{k * lu}{r} < 100 \quad (7)$$

2.3.6. Flexo-Compresión

Columnas axialmente cargadas prácticamente son la combinación con los momentos flectores que están casi siempre presentes, sea por pequeñas desviaciones constructivas de los ejes de las

columnas, la manera como es aplicada la carga por losas y vigas y/o las introducidas debido a la continuidad de las columnas, la manera como es aplicada la carga (Institute, 2011). La combinación de una carga axial última P_u y el correspondiente momento flector último, es equivalente a una carga axial última P_u aplicada a una excentricidad del centroide plástico (Institute, 2011).

2.3.7. Factor de incremento dinámico (DIF)

Al diseñar bajo la acción de cargas explosivas (blast) una estructura o sus elementos, se debe considerar los incrementos en la resistencia última y de fluencia utilizando el factor de incremento dinámico (DIF), el mismo que representa la relación entre la resistencia dinámica y la resistencia estática; los valores contemplados se especifican en la Tabla 2 (Mays & Smith, 1995).

Tabla 2

Factores de incremento dinámico (DIF) para el diseño de elementos de hormigón armado y de acero estructural

Tipo de Esfuerzo	Hormigón armado	Barras de acero de refuerzo		Acero Estructural	
	f'_{dc} / f'_c	f_{dy} / f_y	f_{du} / f_y	f_{dy} / f_y *	f_{du} / f_y
Flexión	1.25	1.20	1.05	1.20	1.05
Corte	1.00	1.10	1.00	1.20	1.05
Compresión	1.15	1.10	x	1.10	x

*** El valor mínimo especificado de f_y para acero grado 50 o menos puede ser mejorado por el factor de incremento promedio de 1.10**

Fuente: (Mays & Smith, 1995)

Una vez que la respuesta estructural se obtenga del análisis matemático, se debe evaluar el nivel de daño asociado con esta respuesta. (Conrath, E. et al., 1999) en su investigación describió varios estados de daño en elementos estructurales basada en observaciones experimentales y simulaciones numéricas, como una función de varias deformaciones, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3*Criterios típicos de fallo para elementos estructurales*

ELEMENTO	MATERIAL	FALLA	CRITERIO DE FALLA	DAÑO		
				Ligero	Moderado	Severo
Columnas	Hormigón armado ($\rho > 0,5\%$ / cara)	Compresión	Reducción / altura	1%	2%	4%
	Acero	Compresión	Reducción / altura	2%	4%	8%
Muros Portantes	Hormigón armado ($\rho > 0,5\%$ / cara)	Compresión	Reducción / altura	1%	2%	4%
Muros de Corte	Hormigón armado ($\rho > 0,5\%$ / cara)	Compresión	Deformación por esfuerzo cortante promedio a través de la Sección	1%	2%	3%

Fuente: (Conrath, E. et al., 1999)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Metodología del desarrollo del proyecto

Para la ejecución de la investigación, se plantea un enfoque exploratorio que consiste en obtener información de un fenómeno que resulta desconocido desde nuevas perspectivas por medio de un primer acercamiento con dicho suceso, con el fin de identificar variables que puedan determinar aspectos cuantitativos y cualitativos del fenómeno en estudio (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010). Además, es pertinente mencionar que la investigación exploratoria identifica variables que se relacionan en el fenómeno de estudio y concluye al determinar las variables más relevantes (Cazau, 2006).

En la presente investigación se evaluó el proceso constructivo de las probetas tipo columna de hormigón armado partiendo del estudio del diseño estructural propuesto bajo normativa AISC (American Institute of Steel Construction) y ACI-318-14 (American Concrete Institute) en lo referente a las especificaciones técnicas y planos de diseño. Conjuntamente se establece un protocolo de ensayo que asocia la maniobrabilidad de la máquina de ensayos destructivos a compresión, instalación y destrucción de las columnas y el uso de cargas explosivas; antes, durante y después de cada ensayo. Para luego realizar mediciones en campo de deformaciones, pandeo, longitud de exposición del acero y fractura del hormigón.

La metodología aplicada es descriptiva y experimental. El ensayo experimental se planificó ejecutarlo dentro de un área militar y bajo las condiciones necesarias de seguridad y soporte técnico; razón por la cual se transporta el elemento al lugar de ensayo.

3.2 Metodología de diseño y construcción de probetas de ensayo

El presente proyecto tiene como objetivo realizar ensayos experimentales en probetas de hormigón armado tipo columna a escala real con explosivos, para lo cual fueron diseñadas y construidas 33 unidades, subdivididas en 6 grupos, de diferentes características, tanto físicas como mecánicas, basados en los tipos de columnas que son usados en la construcción de edificaciones en el país descritos en la Tabla 4.

Tabla 4

Descripción de las características de las probetas tipo columna

Grupo	Probeta tipo	Sección transversal cm	Longitud m	f'c kg/cm ²	Cantidad U
1	Columna	50x50	2.50	280	7
2	Columna	50x50	2.50	210	4
3	Columna	40x40	2.50	280	7
4	Columna	40x40	2.50	210	4
5	Columna	30x30	2.50	280	7
6	Columna	30x30	2.50	210	4

3.2.1. Diseño de las probetas

Las probetas de hormigón armado tipo columna fueron diseñadas acorde a lo que dispone la actual norma ecuatoriana de la construcción publicada en el 2015 (NEC-15) y el código (ACI 318S - 11, 2011), la cuantía asumida para todas las varillas fue de 1.5%, sabiendo que la cuantía mínima debe ser 1% y la cuantía máxima 3% en elementos tipo columna (NEC - SE - HM, 2015), (Mejía & Vasconez, 2017). Finalmente, los diseños de las probetas tipo columna están de acuerdo con lo estipulado en sus diseños finales, los que se presentan en la Figura 17, 18, 19 y 20. La planilla de aceros para la posterior construcción de las probetas es la que se presenta en la Tabla 5 (Mejía & Vasconez, 2017).

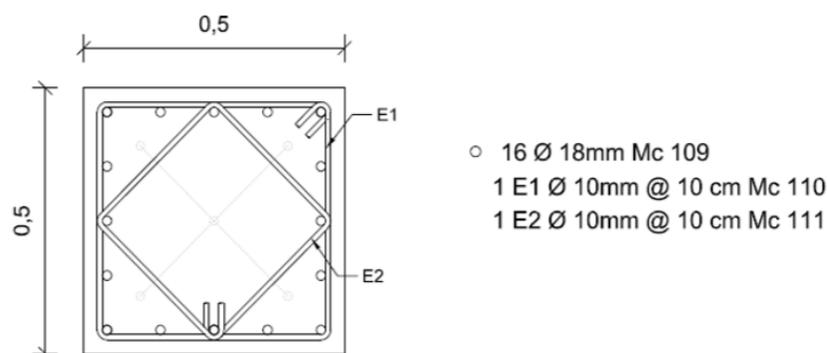


Figura 17. Armado de probetas de hormigón pertenecientes al Grupo 1 y 2
Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)

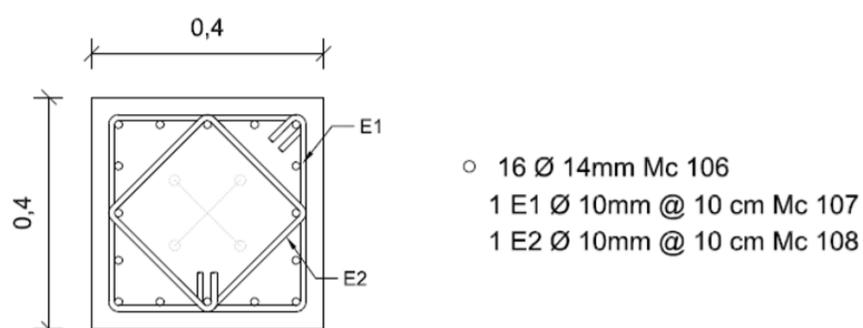


Figura 18. Armado de probetas de hormigón pertenecientes al Grupo 3 y 4
Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)

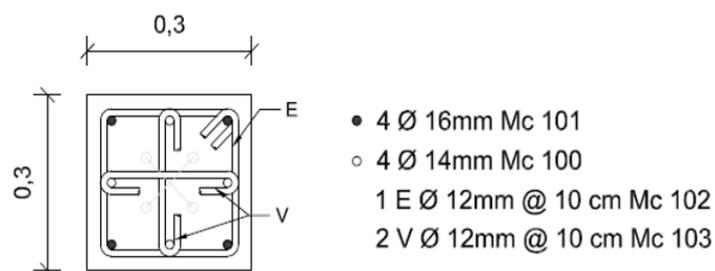


Figura 19. Armado de probetas de hormigón pertenecientes al Grupo 5
Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)

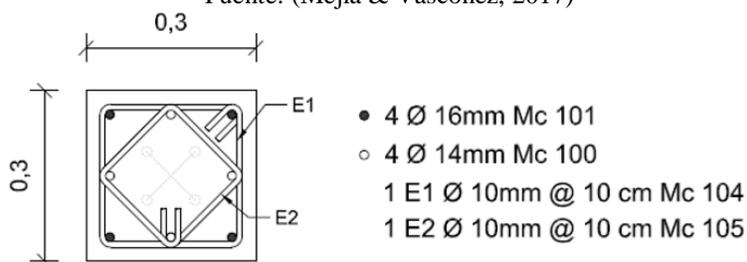


Figura 20. Armado de probetas de hormigón pertenecientes al Grupo 6
Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)

Tabla 5
Planilla de aceros de las probetas tipo columna

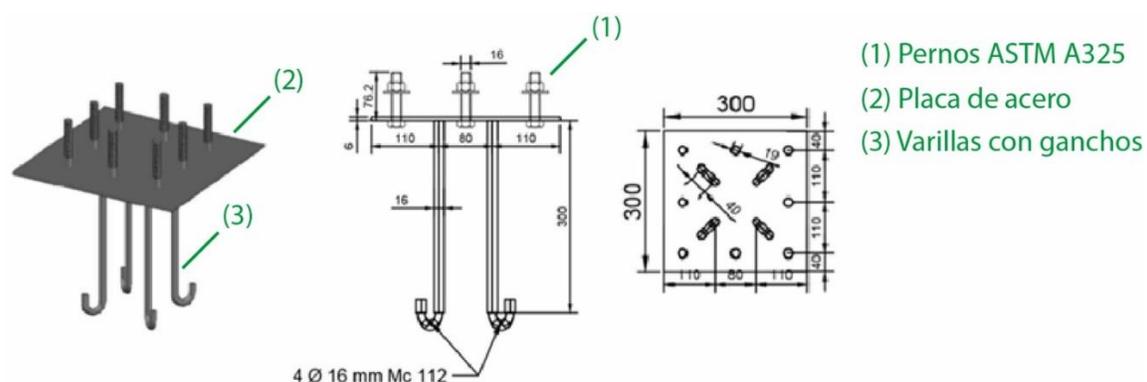
Planilla de Aceros									
Mc	Tipo	φ (mm)	N°	Dimensiones (m)				Longitud	
				a	b	c	g	Parcial (m)	Total (m)
<i>Columna 30 x 30 de 280 kg/cm²</i>									
100	I	14	4	1 x 2,44				2,44	9,76
101	I	16	4	1 x 2,44				2,44	9,76
102	O	12	25	2 x 0,24	2 x 0,24		2 x 0,05	1,06	26,50
103	C	12	50	1 x 0,24			2 x 0,05	0,34	17,00
112	J	16	8	1 x 0,30			1 x 0,05	0,35	2,80
113	U	12	4	2 x 0,25	1 x 0,10		2 x 0,05	0,70	2,80
<i>Columna 30 x 30 de 210 kg/cm²</i>									
100	I	14	4	1 x 2,44				2,44	9,76
101	I	16	4	1 x 2,44				2,44	9,76
104	O	10	25	2 x 0,24	2 x 0,24		2 x 0,05	1,06	26,50
105	O´	10	25	2 x 0,17	2 x 0,17		2 x 0,05	0,78	19,50
112	J	16	8	1 x 0,30			1 x 0,05	0,35	2,80
113	U	12	4	2 x 0,25	1 x 0,10		2 x 0,05	0,70	2,80
<i>Columna 40 x 40 de 280 kg/cm²</i>									
106	I	14	16	1 x 2,44				2,44	39,04
107	O	10	25	2 x 0,34	2 x 0,34		2 x 0,05	1,46	36,50
108	O´	10	25	2 x 0,24	2 x 0,24		2 x 0,05	1,06	26,50
112	J	16	8	1 x 0,30			1 x 0,05	0,35	2,80
114	U	12	4	2 x 0,30	1 x 0,10		2 x 0,10	0,90	3,60
<i>Columna 40 x 40 de 210 kg/cm²</i>									
106	I	14	16	1 x 2,44				2,44	39,04
107	O	10	25	2 x 0,34	2 x 0,34		2 x 0,05	1,46	36,50
108	O´	10	25	2 x 0,24	2 x 0,24		2 x 0,05	1,06	26,50
112	J	16	8	1 x 0,30			1 x 0,05	0,35	2,80
114	U	12	4	2 x 0,30	1 x 0,10		2 x 0,10	0,90	3,60
<i>Columna 50 x 50 de 280 kg/cm²</i>									
109	I	18	16	1 x 2,44				2,44	39,04
110	O	10	25	2 x 0,44	2 x 0,44		2 x 0,05	1,86	46,50
111	O´	10	25	2 x 0,31	2 x 0,31		2 x 0,05	1,34	33,50
112	J	16	10	1 x 0,30			1 x 0,05	0,35	3,50
115	U	12	4	2 x 0,35	1 x 0,10		2 x 0,15	1,10	4,40
<i>Columna 50 x 50 de 210 kg/cm²</i>									
109	I	18	16	1 x 2,44				2,44	39,04
110	O	10	25	2 x 0,44	2 x 0,44		2 x 0,05	1,86	46,50
111	O´	10	25	2 x 0,31	2 x 0,31		2 x 0,05	1,34	33,50
112	J	16	10	1 x 0,30			1 x 0,05	0,35	3,50
115	U	12	4	2 x 0,35	1 x 0,10		2 x 0,15	1,10	4,40

Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)

Se colocó placas de acero en la base superior e inferior de las columnas, dichas placas tendrán la función de distribuir uniformemente la carga ejercida en la columna. Para el caso de columnas

de 30 cm x 30 cm que pertenecen al grupo 5 y 6 se colocaron placas de 300 mm x 300 mm x 6 mm de acero A42 como se observa en la Figura 21. De igual manera para las columnas de 40 cm x 40 cm que pertenecen al grupo 3 y 4 se colocaron placas de 400 x 400 x 6 mm de acero A42 como se observa en la Figura 22.

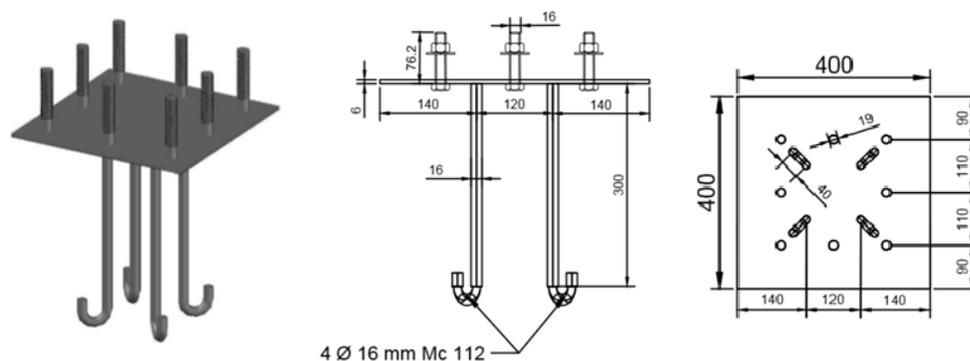
En los dos casos, a las placas se hicieron 8 perforaciones para colocar pernos ASTM A325 de 16 mm de diámetro y 3 pulgadas de largo. El anclaje hacia la columna se la hizo por medio de 4 varillas de 16 mm de diámetro dobladas con un gancho de 150 mm, como se observa en la Figura 21 y Figura 22 (Mejía & Vasconez, 2017).



(a) Vista 3D de la placa (b) Vista lateral (c) Vista superior

Figura 21. Detalle de la placa de 300 x 300 x 6 mm

Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)



(a) Vista 3D de la placa

(b) Vista lateral

(c) Vista superior

Figura 22. Detalle de la placa de 400 x 400 x 6 mm

Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)

Finalmente, para el caso de las columnas de 50 cm x 50 cm que pertenecen al grupo 1 y 2, se consideró colocar placas de 500 mm x 500 mm x 6 mm de acero A42. Al igual que a las anteriores, a las placas se hicieron 8 perforaciones para colocar pernos ASTM A325 de 16 mm de diámetro y 3 pulgadas de largo. El anclaje hacia la columna se la hizo por medio de 5 varillas de 16 mm de diámetro dobladas con un gancho de 150 mm, como se observa en la Figura 23 (Mejía & Vasconez, 2017).

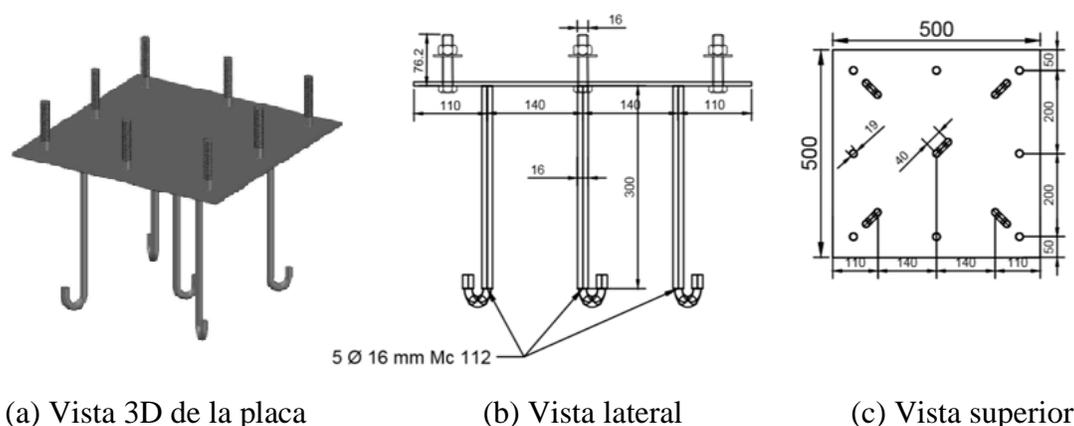
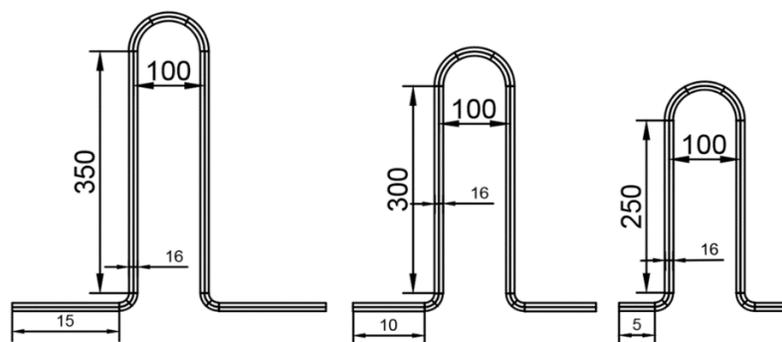


Figura 23. Detalle de la placa de 500 mm x 500 mm x 6 mm

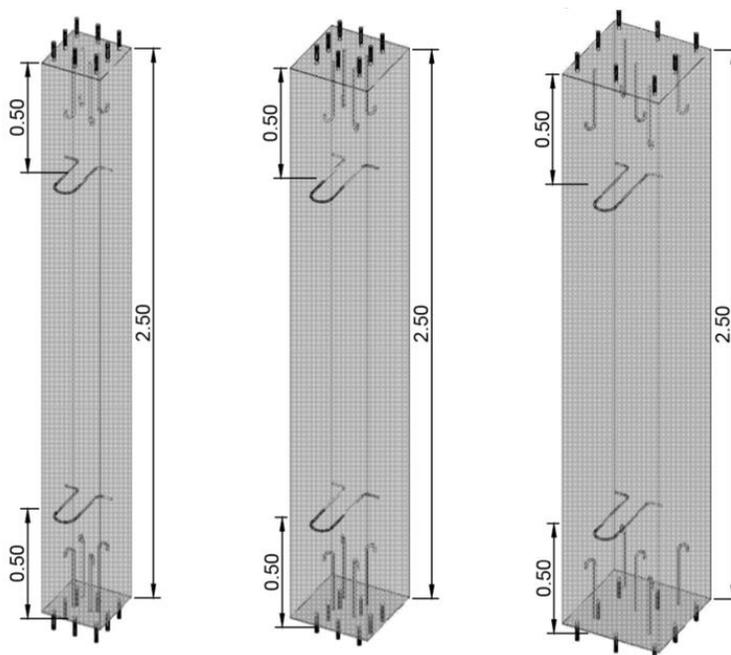
Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)

Para el transporte y manipulación de las probetas se diseñaron cuatro ganchos que se colocaron en cada columna, ubicados 2 ganchos a 1/5 de altura de la base superior y 2 ganchos a 1/5 de altura de la base inferior como se muestra en la Figura 24, los ganchos están constituidos por 2 varillas de 12 mm de diámetro dobladas como se muestra en la Figura 25 (Mejía & Vasconez, 2017). En el Anexo E se presenta la memoria técnica de cálculo de las probetas tipo columna de hormigón armado.



(a) Gancho ϕ 12 mm, columna 50x50 cm (b) Gancho ϕ 12 mm, columna 40x40 cm (c) Gancho ϕ 12 mm, columna 30x30 cm

Figura 24. Detalle de ganchos de transporte
Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)



(a) Columna 30 cm x 30 cm (b) Columna 40 cm x 40 cm (c) Columna 50 cm x 50 cm

Figura 25. Vista 3D de las probetas y ubicación de los ganchos de transporte
Fuente: (Mejía & Vasconez, 2017)

3.2.2. Tracción del acero, diseño de hormigones y ensayo de resistencia de compresión de cilindros.

La construcción y fiscalización de las probetas de hormigón armado tipo columna se realizó en el sector del Corazón, parroquia de Alóag, a cargo de ESPE Innovativa bajo supervisión de los

autores de esta investigación, verificando que se dé cumplimiento a las especificaciones técnicas de diseño establecidas. En los requerimientos de los aspectos técnicos de la construcción se detalla que el constructor debe presentar a fiscalización el diseño del hormigón, el ensayo de resistencia a la compresión del hormigón en cilindros y ensayos de tracción del acero en laboratorios certificados.

3.2.2.1. Ensayo de tracción de varillas de acero.

El ensayo de tracción del acero fue realizado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales pertenecientes a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se ensayaron un total de 15 muestras de acero corrugado grado AS 42 de 5 diámetros diferentes (10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm y 18 mm), cada una de ellas con una longitud inicial de 40 cm \pm 5 mm cumpliendo con lo establecido en la norma (NTE INEN - ISO 6892 - 1, 2017). Los ensayos se realizaron en la Máquina de Ensayos Universales marca MTS modelo 810 – 14 – 2 y los resultados son los que se presentan a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6

Resultados de los ensayos de tracción en varillas de acero corrugado (límite de fluencia)

Probetas (mm)	Fuerza medida			Promedio	Fuerza transformada (kg)	Sección de la Varilla (cm ²)	Resistencia de la Varilla (kg/cm ²)
	A	B	C				
10	52,50	54,00	55,00	53,83	3606,83	0,79	4592,36
12	74,00	73,00	77,00	74,67	5002,67	1,13	4423,33
14	42,00	43,00	43,00	42,67	7146,67	1,54	4642,56
16	57,00	56,00	57,00	56,67	9491,67	2,01	4720,77
18	74,00	73,00	73,00	73,33	12283,33	2,54	4827,04

Todas las varillas ensayadas anteriormente cumplieron con los límites mínimos y máximo establecidos por el Servicio Ecuatoriano de Normalización en la norma (NTE INEN 2167, 2011), los datos obtenidos de los ensayos fueron superiores al límite mínimo de fluencia entre un 9.3 % y

14.9 % como se muestra en la Figura 26, por tal motivo fueron aprobadas para la construcción de las probetas. El informe técnico de los ensayos a tracción se adjunta en el Anexo A.

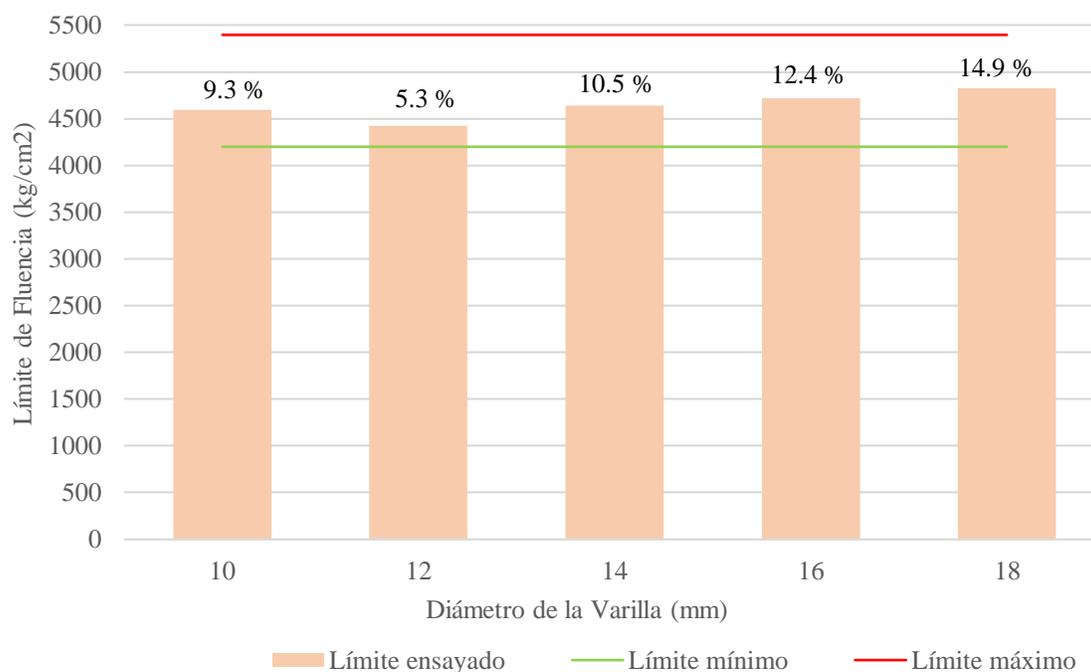


Figura 26. Límites de fluencia del acero corrugado grado AS 42

3.2.2.2. Diseño de hormigones de cemento Portland.

El diseño de hormigones para cemento Portland, tanto para la resistencia de 210 kg/cm² y de 280 kg/cm², estuvo a cargo del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, cumpliendo con lo estipulado en las especificaciones técnicas del contrato. Los agregados a utilizarse son provenientes de la cantera de Pintag y el cemento fue Portland tipo IP.

El contenido de humedad se ensayó según la norma (NTE INEN 862, 2011) y la norma (ASTM C566 - 97, 2004). El contenido de humedad evaporable se la calcula utilizando la Ecuación (8):

$$P = 100 * \frac{W - D}{D} \quad (8)$$

Dónde, P: es el contenido total de humedad evaporable de la muestra (%); W: es la masa de la muestra original (g), y; D: es la masa de la muestra seca (g). Los resultados del ensayo tanto para el árido grueso como para el árido fino son los que se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7
Contenido de humedad de árido fino y grueso

Muestra	Fino		Grueso	
Recipiente	17 A	48 A	29 A	22 A
Peso del recipiente (g)	120,19	119,67	119,96	121,77
Peso del recipiente + muestra húmeda (g)	224,37	220,63	231,33	232,68
Peso del recipiente + muestra seca (g)	221,21	217,62	228,46	229,65
Peso del agua (g)	3,16	3,01	2,87	3,03
Peso seco (g)	101,02	97,95	108,5	107,88
% Agua	3,13%	3,07%	2,65%	2,81%
% Agua media	3,10%		2,73%	

La densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino se la ensayó según la norma (NTE INEN 856, 2010) y la norma (ASTM C128, 2004). La densidad aparente se la calcula utilizando la Ecuación (9), la densidad saturada superficialmente seca (SSS) se la expresa utilizando la Ecuación (10), la densidad aparente se expresa en la Ecuación (11) y el porcentaje de absorción que se expresa con la Ecuación (12):

$$Densidad (SH) = \frac{\gamma * A}{B + S - C} \quad (9)$$

$$Densidad (SSS) = \frac{\gamma * S}{B + S - C} \quad (10)$$

$$Densidad aparente (SSS) = \frac{\gamma * A}{B + A - C} \quad (11)$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{S - A}{A} * 100 \quad (12)$$

Dónde, A: es la masa de la muestra seca al horno (g); B: es la masa del picnómetro lleno con agua (g); C: es la masa del picnómetro lleno con muestra y agua (g); γ : es el peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo (g/cm^3) y; S: es la masa de la muestra saturada con superficie seca (g). Los resultados del ensayo son los que se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados de densidad, densidad aparente y absorción de agua del agregado fino

Parámetros	Unidad	Resultado
Masa de la muestra saturada con superficie seca	g	500,00
Masa de la muestra seca al horno	g	484,19
Masa del picnómetro lleno con agua	g	680,30
Masa del picnómetro lleno con muestra y agua	g	980,68
Peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	g/cm^3	0,99845
Densidad aparente (Gravedad Específica Aparente)	g/cm^3	2,630
Densidad (Gravedad específica) SSS	g/cm^3	2,501
Densidad (Gravedad específica aparente)	g/cm^3	2,422
Absorción de agua	%	3,3%

La densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso se la ensayó según la norma (NTE INEN 857, 2010) y la norma (ASTM C128, 2004). La densidad aparente se la calcula utilizando la Ecuación (13), la densidad saturada superficialmente seca (SSS) se la calcula utilizando la Ecuación (14), la densidad aparente se la calcula utilizando la Ecuación (15) y el porcentaje de absorción se la calcula con la Ecuación (16):

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{\gamma * A}{B - C} \quad (13)$$

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{\gamma * B}{B - C} \quad (14)$$

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\gamma * A}{A - C} \quad (15)$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (16)$$

Dónde, A: es la masa en aire de la muestra seca al horno (g); B: es la masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (g); C: es la masa aparente en agua de la muestra saturada (g) y; γ : es el peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo (g/cm^3). Los resultados del ensayo son los que se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9

Resultados de densidad, densidad aparente y absorción de agua del agregado grueso

Parámetros	Unidad	Resultado
Masa en aire de la muestra seca al horno	g	4567,00
Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca	g	2679,50
masa aparente en agua de la muestra saturada	g	4418,50
Peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	g/cm^3	0,99845
Densidad aparente (Gravedad Específica Aparente)	g/cm^3	2,537
Densidad (Gravedad específica) SSS	g/cm^3	2,416
Densidad (Gravedad específica aparente)	g/cm^3	2,337
Absorción de agua	%	3,4%

La masa unitaria o peso volumétrico y el porcentaje de vacíos tanto para el agregado fino como para el agregado grueso se la ensayó según la norma (NTE INEN 858, 2010) y la norma (ASTM C29 - C29M, 2007). La masa unitaria o peso volumétrico se la calcula utilizando la Ecuación (17) y el contenido de vacíos se la calcula utilizando la Ecuación (18).

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (17)$$

$$\text{Vacíos (\%)} = \frac{S * M - Da}{S * Da} * 100 \quad (18)$$

Dónde, M: es la masa unitaria o peso volumétrico (g/cm^3); G: es la masa del árido más molde (g); T: es la masa del molde (g); V: es el volumen del molde (cm^3); S: es la gravedad específica (en condición seca) (adimensional) y; Da: es el peso específico del agua a la temperatura que se realizó

el ensayo (g/cm^3). Los resultados del ensayo son los que se presentan en la Tabla 10 para agregado fino y en la Tabla 11 para el agregado grueso.

Tabla 10*Densidad volumétrica y porcentaje de absorción del árido fino*

Densidad volumétrica suelta del agregado fino		
Peso del molde	2600,10	2600,10
Peso molde + suelo (g)	6422,70	6500,50
Peso suelo (g)	3822,60	3900,40
Volumen (cm^3)	2722,00	2722,00
Densidad suelta (g/cm^3)	1,404	1,433
Media		1,419
Densidad volumétrica varillada de agregado fino		
Peso del molde	2600,10	2600,10
Peso molde + suelo (g)	7085,80	7047,70
Peso suelo (g)	4485,70	4447,60
Volumen (cm^3)	2722,00	2722,00
Densidad suelta (g/cm^3)	1,648	1,634
Media		1,641
Porcentaje de vacíos		
Densidad Volumétrica	1640,94	kg/m^3
Densidad del agua	998,00	kg/m^3
Gravedad específica	2,426	-
% Vacíos	32,09%	%

Tabla 11*Densidad volumétrica y porcentaje de absorción del árido grueso*

Densidad volumétrica suelta del agregado grueso		
Peso del molde	7680,00	7680,00
Peso molde + suelo (g)	24580,00	24740,00
Peso suelo (g)	16900,00	17060,00
Volumen (cm^3)	14198,00	14198,00
Densidad suelta (g/cm^3)	1,190	1,202
Media		1,196
Densidad volumétrica varillada de agregado grueso		
Peso del molde	7680,00	7680,00
Peso molde + suelo (g)	26640,00	26690,00
Peso suelo (g)	18960,00	19010,00
Volumen (cm^3)	14198,00	14198,00
Densidad varillada (g/cm^3)	1,335	1,339
Media		1,337
Porcentaje de vacíos		
Densidad Volumétrica	1337,16	kg/m^3
Densidad del agua	998,00	kg/m^3
Gravedad específica	2,341	-
% Vacíos	42,63%	%

Finalmente, el análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos se los ensayó según la norma (NTE INEN 696, 2011) y la norma (ASTM C136 / C136M, 2014). Los resultados de los ensayos son los que se presentan en la Tabla 12 y en la Figura 27 para los agregados finos y en la Tabla 13 y en la Figura 28 para los agregados gruesos.

Tabla 12

Análisis Granulométrico de agregados Gruesos

Tamices	Peso retenido (g)	Retenido acumulado	% Retenido Acumulado	% Acumulado pasa total
3/8" (9,5 mm)	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 4 (4,76 mm)	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 8 (2,36 mm)	124,00	124,00	24,12	75,88
No. 16 (1,18 mm)	147,10	271,10	52,72	47,28
No. 30 (0,60 mm)	65,10	336,20	65,38	34,62
No. 50 (0,30 mm)	66,00	402,20	78,22	21,78
No. 100 (0,15 mm)	42,80	445,00	86,54	13,46
Pas No. 100	68,10	513,10		
Peso inicial de la muestra (g)			514,2	
Módulo de finura			3,08	

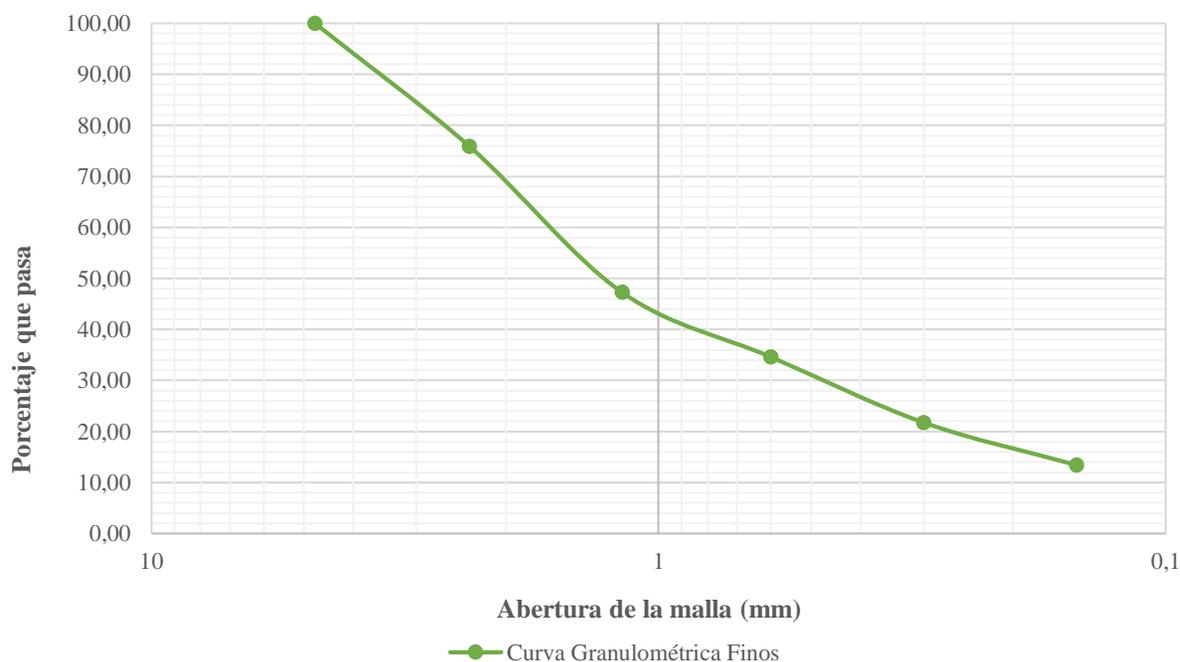
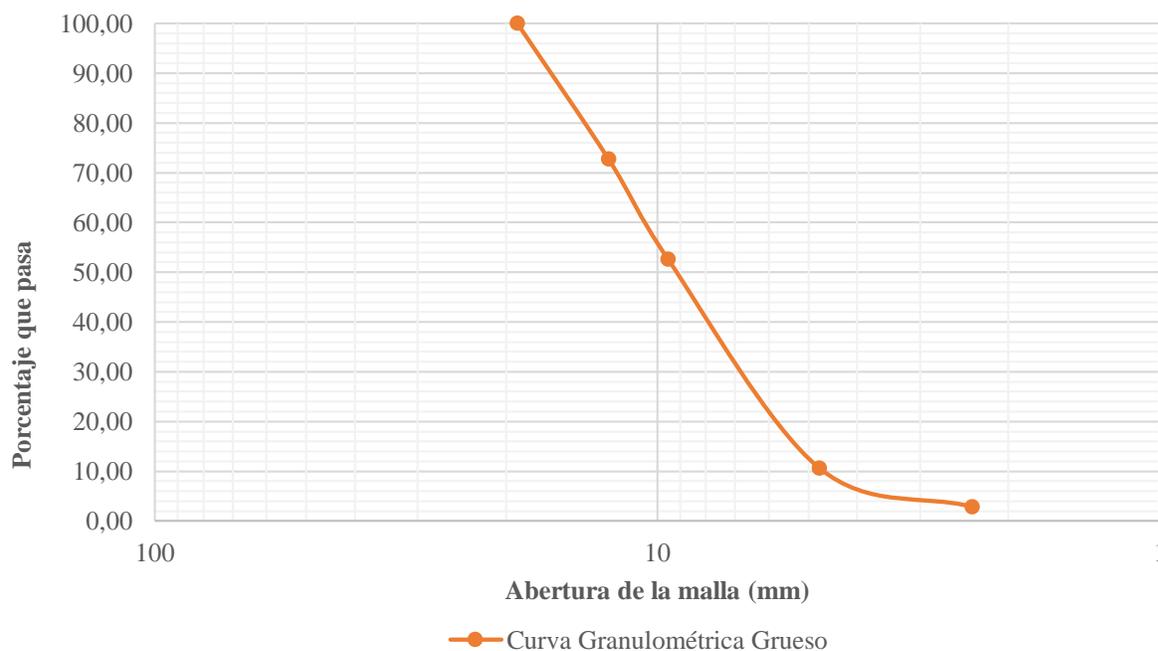


Figura 27. Curva granulométrica áridos finos

Tabla 13*Análisis Granulométrico de agregados Gruesos*

Tamices	Peso retenido (g)	Retenido acumulado	% Retenido Acumulado	% Acumulado pasa total
3" (76,1 mm)	0,00	0,00	0,00	100,00
2" (51,8 mm)	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2" (38,1 mm)	0,00	0,00	0,00	100,00
1" (25,4 mm)	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4" (19,0 mm)	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2" (12,5 mm)	827,70	827,70	27,30	72,70
3/8" (9,51 mm)	611,20	1438,90	47,46	52,54
No. 4 (4,76 mm)	1270,40	2709,30	89,37	10,63
No. 8 (2,36 mm)	236,40	2945,70	97,16	2,84
Pas No. 8	83,60	3029,30		
Peso inicial de la muestra (g)			3031,7	
Tamaño máximo nominal			3/4	

**Figura 28.** Curva granulométrica áridos finos

En resumen, la caracterización de los agregados es la que se presenta en la Tabla 14, con dichos datos se realizó la dosificación del hormigón para las diferentes resistencias aplicando el método

del (ACI 211, 2009) y los resultados son los que se presentan en la Tabla 15 y serán los utilizados para la construcción de las probetas de hormigón tipo columna. El Informe técnico del diseño del hormigón se adjunta en el Anexo B.

Tabla 14

Resumen de la caracterización de los agregados

Parámetros		Grueso	Fino
Densidad aparente (Gravedad Específica Aparente)	kg/m ³	2536,89	2630,10
Densidad (Gravedad específica) SSS	kg/m ³	2415,85	2500,88
Densidad (Gravedad específica)	kg/m ³	2337,30	2421,80
Absorción de agua	%	3,4%	3,3%
Módulo de finura			3,08
Tamaño máximo nominal		3/4	
% Agua	%	2,73%	3,10%
Densidad suelta	kg/m ³	1195,94	1418,63
Densidad varillada	kg/m ³	1337,16	1640,94

Tabla 15

Dosificación del hormigón con su respectiva resistencia a la compresión

Datos		Dosificación	
f'c	kg/cm ²	210	280
f'c dis.	kg/cm ²	264	334
Relación agua cemento	-	0,54	0,46
Asentamiento	cm	8 a 10	8 a 10
Agua	Gal.	7,51	6,38
Cemento	sacos	1	1
Arena	parihuelas	2,4	1,9
Ripio	parihuelas	2,6	2,2

3.2.2.3. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros.

Los ensayos de resistencia a la compresión fueron realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Politécnica Salesiana, el ensayo se basó en la norma (ASTM C39/C39M - 12, 2012), y los resultados son los que se presentan en la Tabla 16, 17, 18, 19 y 20. Los cilindros fueron tomados dependiendo la fecha en la que fueron fundidas las columnas, siendo tres cilindros en cada muestreo.

Tabla 16*Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 210 kg/cm²*

Características	Muestras		
Cilindro	1	2	3
Identificación	210 kg/cm ²	210 kg/cm ²	210 kg/cm ²
Fecha de Moldeo	06/11/2017	06/11/2017	06/11/2017
Fecha de Ensayo	11/12/2017	11/12/2017	11/12/2017
Edad (días)	35	35	35
Diámetro (mm)	152,00	153,00	151,00
Área (mm ²)	18145,8	18385,4	17907,9
Longitud (mm)	301,00	300,00	303,00
Masa (g)	11725	11621	11781
Volumen (cm ³)	5461,90	5515,62	5426,08
Densidad (g/cm ³)	2,15	2,11	2,17
Carga Máxima (KN)	451	459	449
Esfuerzo (Mpa)	24,9	25,0	25,1
Relación L/D	2	2	2
Factor	1	1	1
Esfuerzo corregido (Mpa)	24,9	25,0	25,1
Esfuerzo corregido (Kg/cm ²)	253,5	254,6	255,7
Tipo de falla	Fractura diagonal sin grietas	Fractura diagonal sin grietas	Fractura diagonal sin grietas

Tabla 17*Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 280 kg/cm²*

Característica	Muestras		
Cilindro	4	5	6
Identificación	280 kg/cm ²	280 kg/cm ²	280 kg/cm ²
Fecha de Moldeo	15/11/2017	15/11/2017	15/11/2017
Fecha de Ensayo	11/12/2017	11/12/2017	11/12/2017
Edad (días)	26	26	26
Diámetro (mm)	152,00	153,00	151,00
Área (mm ²)	18145,8	18385,4	17907,9
Longitud (mm)	298,00	300,00	305,00
Masa (g)	11780	11990	11960
Volumen (cm)	5407,5	5515,6	5461,9
Densidad (g/cm ³)	2,18	2,17	2,19
Carga Máxima (KN)	700	700	700
Esfuerzo (Mpa)	38,6	38,1	39,1
Relación L/D	2	2	2
Factor	1	1	1
Esfuerzo corregido (Mpa)	38,6	38,1	39,1
Esfuerzo corregido (Kg/cm ²)	393,5	388,4	398,7
Tipo de falla	Falla por neopreno	Falla por neopreno	Falla por neopreno

Tabla 18*Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 280 kg/cm²*

Característica	Muestras		
Cilindro	7	8	9
Identificación	280 kg/cm ²	280 kg/cm ²	280 kg/cm ²
Fecha de Moldeo	10/11/2017	10/11/2017	10/11/2017
Fecha de Ensayo	11/12/2017	11/12/2017	11/12/2017
Edad (días)	31	31	31
Diámetro (mm)	152,00	152,00	150,00
Área (mm ²)	18145,8	18145,8	17671,5
Longitud (mm)	301,00	298,00	302,00
Masa (g)	12050	11810	11820
Volumen (cm)	5461,9	5407,5	5336,8
Densidad (g/cm ³)	2,21	2,18	2,21
Carga Máxima (KN)	700	700	700
Esfuerzo (Mpa)	38,6	38,6	39,6
Relación L/D	2	2	2
Factor	1	1	1
Esfuerzo corregido (Mpa)	38,6	38,6	39,6
Esfuerzo corregido (Kg/cm ²)	393,5	393,5	404,0
Tipo de falla	Falla por neopreno	Falla por neopreno	Falla por neopreno

Tabla 19*Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 210 kg/cm²*

Característica	Muestras		
Cilindro	10	11	12
Identificación	210 kg/cm ²	210 kg/cm ²	210 kg/cm ²
Fecha de Moldeo	07/11/2017	07/11/2017	07/11/2017
Fecha de Ensayo	11/11/2017	11/11/2017	11/11/2017
Edad (días)	34	34	34
Diámetro (mm)	150,00	152,00	151,00
Área (mm ²)	17671,5	18145,8	17907,9
Longitud (mm)	298,00	304,00	304,00
Masa (g)	11630	11630	11820
Volumen (cm)	5266,1	5516,3	5444
Densidad (g/cm ³)	2,21	2,11	2,17
Carga Máxima (KN)	442	460	472
Esfuerzo (Mpa)	25,0	25,4	26,4
Relación L/D	2	2	2
Factor	1	1	1
Esfuerzo corregido (Mpa)	25,0	25,4	26,4
Esfuerzo corregido (Kg/cm ²)	255,1	258,6	268,8
Tipo de falla	Fractura diagonal sin grietas	Fractura diagonal sin grietas	Fractura diagonal sin grietas

Tabla 20*Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón de 280 kg/cm²*

Característica	Muestras		
Cilindro	13	14	15
Identificación	280 kg/cm ²	280 kg/cm ²	280 kg/cm ²
Fecha de Moldeo	08/11/2017	08/11/2017	08/11/2017
Fecha de Ensayo	11/11/2017	11/11/2017	11/11/2017
Edad (días)	33	33	33
Diámetro (mm)	153,00	151,00	153,00
Área (mm ²)	18385,4	17907,9	18385,4
Longitud (mm)	300,00	304,00	299,00
Masa (g)	12120	12070	11900
Volumen (cm)	5515,6	5444,0	5497,2
Densidad (g/cm ³)	2,20	2,22	2,16
Carga Máxima (KN)	700	700	700
Esfuerzo (Mpa)	38,1	39,1	38,1
Relación L/D	2	2	2
Factor	1	1	1
Esfuerzo corregido (Mpa)	38,1	39,1	38,1
Esfuerzo corregido (Kg/cm ²)	388,4	398,7	388,4
Tipo de falla	Falla por neopreno	Falla por neopreno	Falla por neopreno

Se ensayaron un total de 15 cilindros que cumplieron con la resistencia requerida; en todos los casos, la resistencia alcanzada en los ensayos fue superior a la de diseño. Los cilindros diseñados para soportar 210 kg/cm² resistieron en promedio 257.74 kg/cm², siendo dicha resistencia superior a la de diseño entre 20.7 % y 28 % como se puede observar en la Figura 29. Los cilindros, cuya resistencia fue de 280 kg/cm², alcanzaron una resistencia promedio de 394.11 kg/cm², siendo esta resistencia superior a la de diseño en un 38.7 % y 44.3 % como se puede observar en la Figura 30. El informe técnico de los ensayos a compresión se adjunta en el Anexo C.

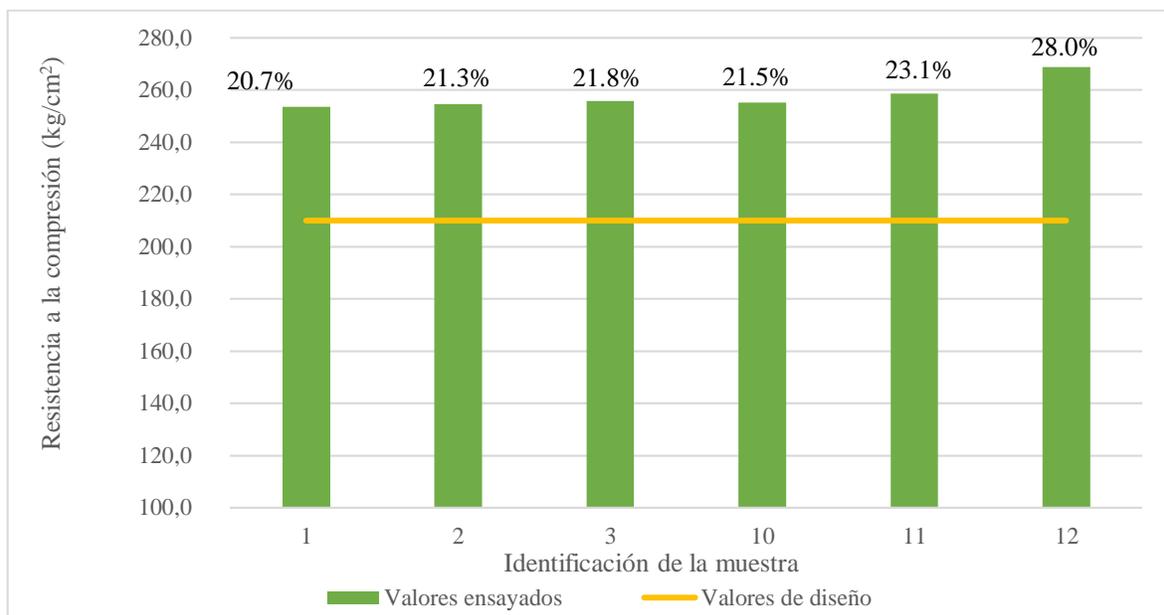


Figura 29. Ensayos de compresión del hormigón en cilindros de 210 kg/cm²

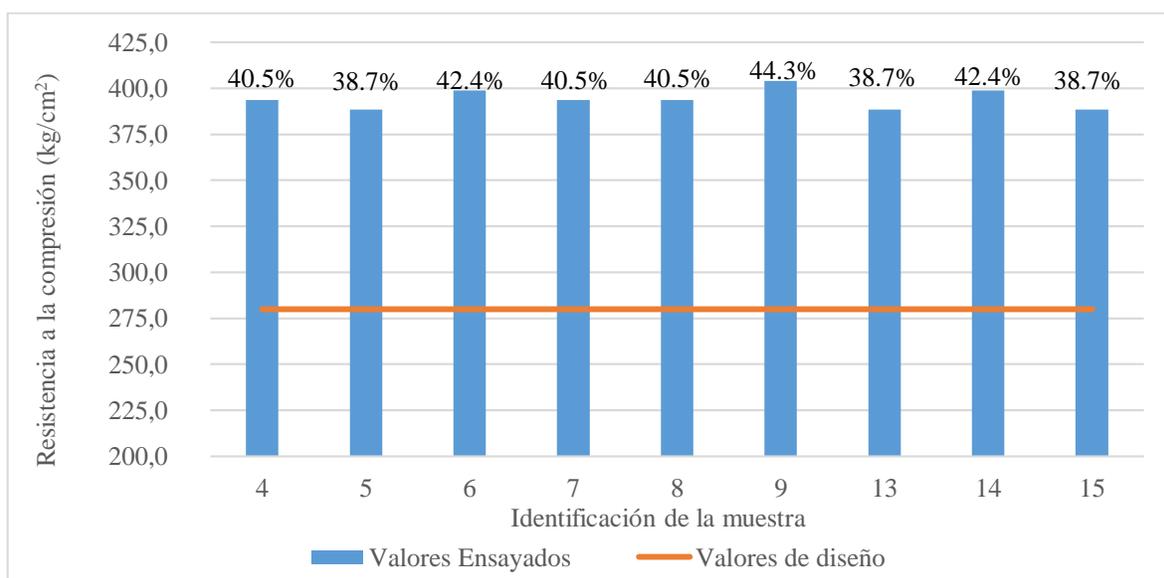


Figura 30. Ensayos de compresión del hormigón en cilindros de 280 kg/cm²

3.3 Construcción de probetas tipo columnas

La construcción de las probetas se la realizó en el sector “El Corazón” pensando en el posterior traslado a las instalaciones del Depósito de municiones “El Corazón” (DEPCOR). La obra inició

con la preparación del área de trabajo y la adquisición de los materiales para la construcción; los encofrados se los realizó de madera Tríplex 4818 C para tres caras de las probetas, además también de la adquisición del acero para realizar el corte y figurado del mismo. Durante el proceso de encofrado se realizó el armado de los tableros preparados, anclajes de los mismos, colocación de la armadura de acero de refuerzo, armado de placas de anclaje y pernos ASTM 325 como se especifican en los planos, dejando listo para el vertido del hormigón, como se puede apreciar en la Figura 31.



Figura 31. Encofrado de madera Tríplex 4818 C de 3 caras para probetas tipo columna

La elaboración del hormigón se la realizó mediante una Concretera de un saco y para cada parada de hormigón se realizó la corrección de la relación A/C por contenido de humedad de los agregados, vertiéndose el hormigón y compactándose sistemáticamente en la construcción de cada probeta. El proceso constructivo duró 5 días, 3 días para construir las probetas de 280 kg/cm^2 en los días 08/11/2017, 10/11/2017 y 15/11/2017; y 2 días para las probetas de 210 kg/cm^2 en los días 07/11/2017 y 11/11/2017 como se puede observar en la Figura 32.



Figura 32. Fundición de probetas tipo columna de hormigón armado

El proceso de desencofrado se lo realizó al día siguiente del vertido del hormigón, cumpliendo inmediatamente con el curado del hormigón, posterior a esto se colocó una membrana plástica para mantener la humedad en las probetas y se humedeció periódicamente las mismas hasta llegar a cumplir con el tiempo de curado dejándolas listas para el transporte, así como se puede observar en la Figura 33.



Figura 33. Desencofrado y curado de las probetas tipo columna de hormigón armado

3.4 Protocolo de Instructivos de ensayo y seguridad

En la fase experimental de la presente investigación se planificó realizar ensayos con explosivos en probetas de hormigón armado a escala real, para lo cual se cumplió con la documentación pertinente que requiere el Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas del Ecuador para el uso de explosivos. Documentación que permitió el cumplimiento de las normas y directivas en lo referente a seguridad, uso del polígono de demolición, equipo especial de explosivos, lugar de almacenamiento del explosivo y el acceso a lugares restringidos del personal de docentes e investigadores que participaron en las detonaciones.

3.4.1. Protocolo de ensayo

Previo a toda actividad en la cual intervienen explosivos se debe establecer protocolos de trabajo que especifique las situaciones técnicas de actividades y aspectos a controlar, además debe constar la situación operativa en la cual se describe los pasos a seguir en los ensayos con explosivos, todo trabajo a realizar debe estar mecanizado y cada integrante de los equipos de trabajo deben conocer con claridad cada acción que van a ejecutar en los ensayos y de esta forma evitar accidentes en el desarrollo de las operaciones.

Se realizó el Protocolo para ensayos en columnas con cargas explosivas en la Máquina de ensayos destructivos a compresión, el objetivo principal es realizar ensayos en probetas de hormigón armado a escala real con las dimensiones planificadas para las columnas y las cargas explosivas, documento que da cumplimiento a las normas de seguridad del MANUAL PARA USO DE EXPLOSIVOS Y DESACTIVACIÓN DE ARTEFACTOS EXPLOSIVOS EN ESTADO DE RIESGO (MT6-E1-00, 2017). Además, conocer las características y comportamiento de las columnas luego de aplicar las cargas explosivas. Se consideró las condiciones de evaluación de

lugar, tiempo, personal y materiales. En la situación técnica se consideró la evaluación de las actividades a realizar, la exigencia o metas alcanzar y el resultado que se espera obtener de los ensayos, además es importante obtener aspectos a controlar del marco técnico de evaluación de las actividades que se ejecutaran en los ensayos. En el Anexo D, se adjunta el protocolo para ensayos.

3.4.2. Instructivo para Ensayo

Para la ejecución de ensayos con explosivos se requiere presentar un instructivo con todas las normas de seguridad, actividades, personal a emplearse, material y equipo que se usó en el trabajo, además temas logísticos referentes a traslados y materiales de apoyo para las operaciones con explosivos. Las operaciones de detonación que se ejecutaron como parte de la fase III de la investigación se realizaron en el polígono de demoliciones del DEPCOR, unidad que pertenece a la Dirección de Logística del CC.FF.AA. Siendo esta una unidad militar se requiere de documentación legalizada y autorizada por las autoridades de la universidad.

Para la fase experimental de la investigación, se establecieron dos etapas, para lo cual se realizaron dos instructivos. Instructivo No. 2018-002-DCTC-ESPE-g-4 para la ejecución de los ensayos con explosivos en columnas a escala real del Proyecto de Investigación Militar, de fecha 22 de enero del 2018 y el Instructivo No 2018-007-DCTC-ESPE para la ejecución de la II fase de ensayos con explosivos en columnas a escala real del Proyecto de Investigación Militar, de fecha 14 de agosto del 2018, en sus componentes se detalla los antecedentes y referencias, finalidad, propósito, docentes responsables de la investigación, lugar y duración, orientación, disposiciones generales, instrucciones de coordinación y anexos.

Los anexos del instructivo son componentes que integran la documentación necesaria para la aprobación de las operaciones de los cuales deben constar el listado del personal que participan en

el proyecto, protocolo para ensayos, cronograma de actividades, normas de seguridad, administrativas y logísticas. Las normas de seguridad fueron tomadas del MANUAL PARA USO DE EXPLOSIVOS Y DESACTIVACIÓN DE ARTEFACTOS EXPLOSIVOS EN ESTADO DE RIESGO (MT6-E1-00, 2017) que se encuentra vigente desde el año 2017 para realizar demoliciones y además se detalla el equipo de protección que fue utilizado por el personal que participo en los ensayos. En el Anexo D se adjunta los instructivos.

3.5 Materiales, equipo y zona de ensayo

3.5.1 Materiales

Los materiales utilizados durante la ejecución de los ensayos experimentales son los que se especifican en la Tabla 21.

Tabla 21

Materiales utilizados durante los ensayos experimentales

Cant.	Material	Descripción	Imagen
33und.	Columnas de hormigón armado	Las características de las columnas se describen en la Tabla 4.	
4und.	Material explosivo	182 cargas diédricas de explosivo de 230 gr.	
		65 cargas cónicas de explosivo de 450 gr.	

Continúa...

33 Fulminantes Eléctricos.



20m Cordón Detonante de 10g.



1

Herramienta para empernar y destornillar la tapa superior de la máquina de ensayos.

Llave de pico, juego de llaves y juego de rachas.



100m

Conductor de energía

Cable de 22mm para el circuito eléctrico que se utiliza en el cebamiento eléctrico.



3und.

Equipos de comunicación portátil

Radios de comunicación tierra-aire ICOM IC-A24.



3.5.2 Equipos

Durante la ejecución de los ensayos fue necesario la implementación de los siguientes equipos detallados en la Tabla 22 tanto para la colocación de las probetas, equipo filmográfico y equipo de seguridad para todo el personal presente en dichos ensayos.

Tabla 22

Equipos utilizados durante los ensayos experimentales

Cant.	Equipo	Descripción
1	Mini cargadora BOBCAT S570	La mini cargadora utilizada para el transporte, montaje y desmontaje de las probetas tipo columna de hormigón armado como se muestra en la Figura 34.
1	Máquina de ensayos destructivos a compresión.	La máquina de ensayos se utilizó para ajustar las probetas de hormigón, simulando el empotramiento perfecto a través de las placas colocadas en la parte superior e inferior, dichas placas brindan la capacidad de empujar la columna y transmitir carga axial simulando el peso de una edificación. La máquina se muestra en la Figura 35.
1	Gato hidráulico con capacidad nominal.	Se utilizó un gato hidráulico de marca MEGA de 100 t que será la encargada de aplicar la carga, dicha gata incluye un manómetro que permite regular la carga que se aplicará a cada probeta. El gato hidráulico se observa en la Figura 34.
1	Cámara Phamton V2512	Siendo una cámara de alta velocidad, su función fue grabar cada uno de los ensayos a una distancia de 30 m para posteriores análisis de parámetros de onda y fragmentación del hormigón. La cámara Phamton V2512 es la que se la presenta en la Figura 36.
1	Vidrio templado de 10 líneas	La parte más frágil de la cámara Phamton V2512 es su lente, por lo tanto fue necesario la utilización de un vidrio templado de 10mm con resistencia al impacto por una fuerza de choque de una bola de acero de 500g, resistencia a la compresión por 10000kg/cm ² , resistencia a la torsión por un esfuerzo de 180 kg y la resistencia a la flexión para una tensión de rotura entre 1200 a 2000 kg/cm ² y la tensión de trabajo de 500 kg/cm ² (Cristalamedida, 2018), colocado como se muestra en la Figura 36 para que soporte algún impacto de un fragmento o reciba el efecto de la onda explosiva
1	Escudo anti fragmentos	En la parte superior de la cámara se colocó un escudo anti fragmentos como se muestra en la Figura 36, el objetivo de colocar el escudo fue evitar que fragmentos golpeen a la cámara y la pueda derribar.
1	Equipo de protección para explosivas	El equipo de protección para los explosivos se conformó por: casco y chaleco anti fragmentos EOD como se muestra en la Figura 37.

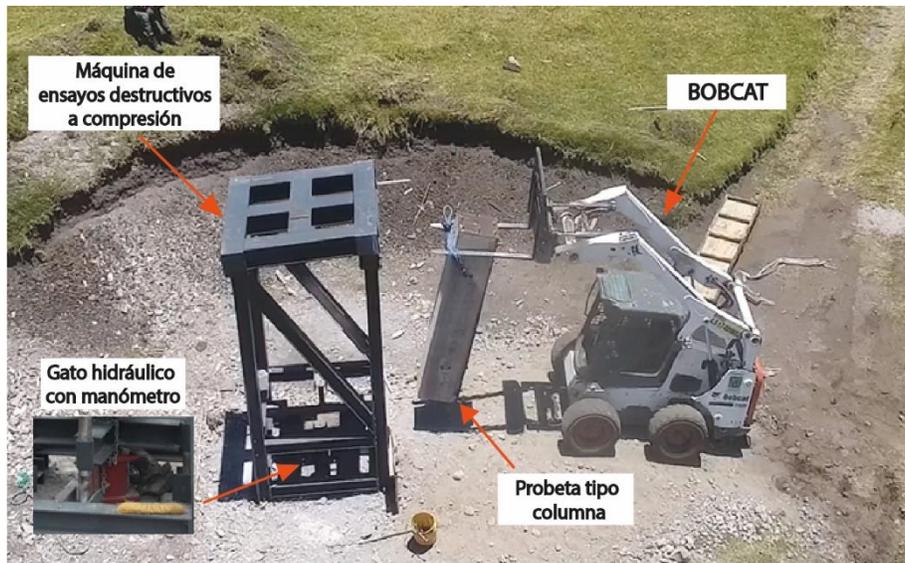


Figura 34. Equipos utilizados para la ejecución de ensayos



Figura 35. Máquina de ensayos destructivos a compresión



a) Equipo de filmación y protección

b) Cámara Phantom V2512



c) Escudo de protección anti fragmentos

Figura 36. Equipo filmográfico



Figura 37. Equipo de seguridad especializado para explosivitas

3.5.3 Zona de ensayo

Los ensayos se realizaron en el polígono de demoliciones del DEPCOR “El Corazón”, ubicado en el sector El Corazón de la parroquia de Alóag del Cantón Mejía, provincia de Pichincha. Polígono destinado para realizar operaciones con explosivos por parte de las Fuerzas Armadas del Ecuador y bajo autorización del Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas fue el sector destinado para las operaciones de demoliciones del proyecto de investigación. Dicho polígono cuenta con un área de 600m², con espacios abiertos y alejados de centros poblados al estar ubicado en la falda noreste del Volcán Corazón como se puede observar en la Figura 38. Se realizó un estudio de la vulnerabilidad del polígono para adecuar la zona de ensayo a las necesidades del proyecto.

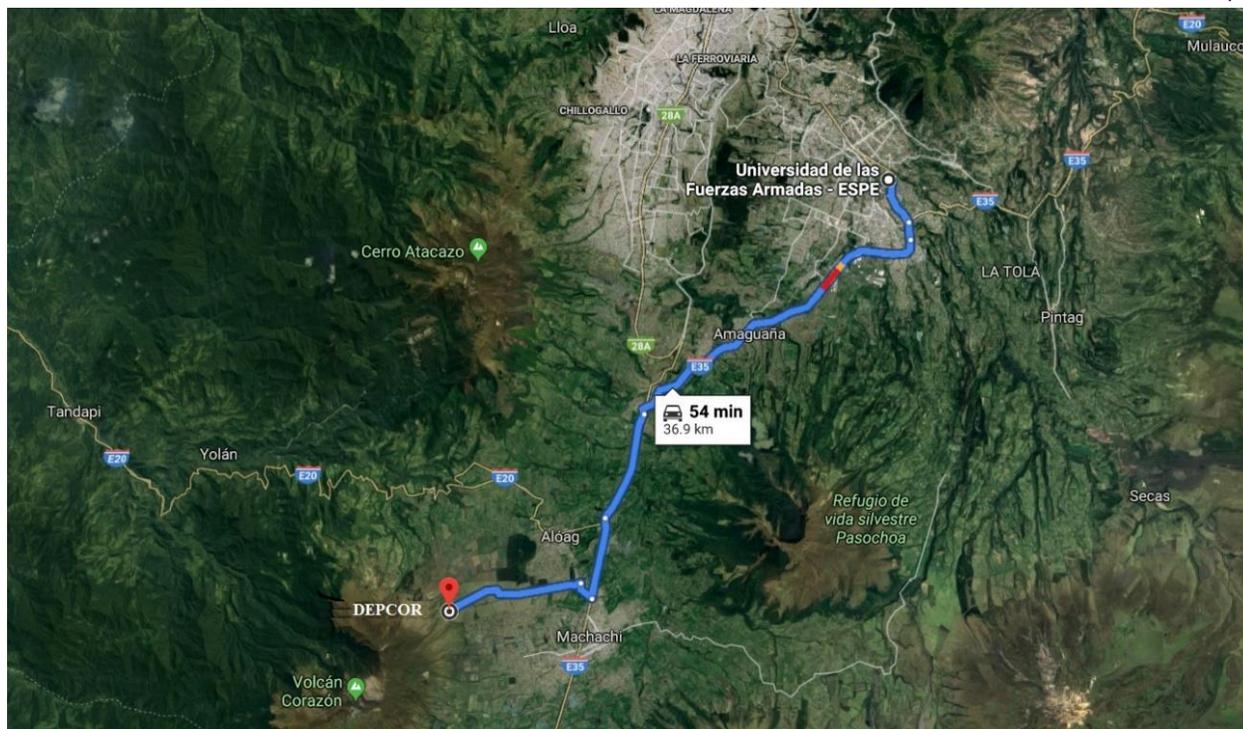


Figura 38. Ubicación geográfica del Depósito Conjunto de Municiones “El Corazón”
Fuente: (Google Maps).

Para ejecutar los ensayos se requiere tres posiciones de seguridad, la primera es el lugar donde se ubicará la máquina de ensayos a compresión para colocar la probeta tipo columna con la carga explosiva; la segunda posición de seguridad es donde se ubicará el equipo filmográfico que debe ser lo más cercano posible a la primera posición de seguridad. Finalmente, la tercera posición de seguridad debe ser lo más lejana posible para que garantice la integridad de las personas ocupando un mínimo equipo de protección.

Para la estimación del lugar donde se colocará cada una de las posiciones de seguridad se utilizará la metodología de (Peralta, Sarango, & Mejía, 2019), quienes calcularon la presión de incidencia para el TNT a diferentes distancias utilizando métodos empíricos para la caracterización de la onda explosiva basada en (UFC 3-340-02 , 2008) que se fundamenta en correlaciones experimentales proporcionadas por (DoDM, U.S., 2012), el manual técnico de (Kingery &

Bulmash, 1984) que provee los parámetros de la onda de choque en forma de diagramas y formas polinomiales, el modelo (Swisdak, 1994) que establece los mismos parámetros de (Kingery & Bulmash, 1984) en forma exponencial y los modelos (Henrych, 1979) y (Sadovsky, 2004) que presentan formas polinómicas para establecer la presión de incidencia (Peralta, Sarango, & Mejía, 2019). Dichas presiones fueron comparadas con rangos de presión a las cuales se produce afectaciones en el cuerpo humano. Al ser el estudio de (Peralta, Sarango, & Mejía, 2019) para TNT, se procedió a realizar la conversión de TNT a pentolita utilizando la metodología de (Karlos & Solomos, 2013) en la Ecuación (19).

$$W_e = W_{exp} * \left(\frac{H_{exp}^d}{H_{TNT}^d} \right) \quad (19)$$

Donde, W_e : es el peso equivalente de TNT (kg); W_{exp} : es el peso del explosivo actual (kg); H_{exp}^d : es el calor de detonación del explosivo actual (MJ/kg); H_{TNT}^d : es el calor de detonación del TNT (MJ/kg). El calor de detonación de la Pentolita al 50/50 es 5.86 MJ/kg y del TNT es de 4.10 a 4.55 MJ/kg, para lo cual asumimos 4.33 MJ/kg (Karlos & Solomos, 2013).

En el afán de determinar una zona de seguridad, se procede a calcular la carga máxima del explosivo que se utilizará en la ejecución de los ensayos experimentales, para lo cual se utiliza la Ecuación (20) presentada por (Mejía & Vasconez, 2017), en la que se relaciona la sección de hormigón con el peso de explosivo que se necesita para detonar dicha columna.

$$W_{exp} = 0.2724 * s^{2.4104} \quad (20)$$

Donde, W_{exp} : es el peso del explosivo pentolita (kg); y s : es la dimensión del elemento de hormigón armado (cm). Durante la presente investigación se utilizarán probetas cuya sección

máxima es de 50x50 cm, utilizando dicha sección en la Ecuación (20) se encuentra que el peso de pentolita que debería utilizarse es 3391.60 gr. A este valor se le afectó por un factor de seguridad de 1.3 estimado por los autores debido a que el estudio de (Mejía & Vasconez, 2017) se basó en probetas de menor tamaño a las del actual proyecto; la carga mayorada de explosivo se fijó en 4409.08 kg de pentolita. Las cargas explosivas conformadas de las que se dispone son de 1140 gr de pentolita por lo que a dicho valor calculado anteriormente se le redondea al número de cargas conformadas que representan, para este caso se redondearán a 4 cargas conformadas con un peso total de explosivo de 4560 gr.

Finalmente, se calcula la masa equivalente de TNT para una carga de pentolita de 4560gr aplicando la Ecuación (19), con lo que se obtiene que la masa equivalente es de 6.17 kg, con dicha masa equivalente se procede aplicar la metodología antes descrita de (Peralta, Sarango, & Mejía, 2019) obteniendo los resultados para los diferentes autores como se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

Presión de incidencia en las diferentes distancias de análisis para una masa equivalente de 6,17 kg de TNT

Parámetros		Presión de Incidencia (PI), (kPa)				
Distancia m	Z m/kg ^{1/3}	(Henrych, 1979)	(Sadovsky, 2004)	(Kingery & Bulmash, 1984)	(Swisdak, 1994)	(UFC 3-340-02 , 2008)
15	8,18	4,7414	16,3429	16,4037	19,7727	14,2250
30	16,36	-	6,5014	6,5317	7,8536	5,1648
50	27,26	-	3,5615	3,2524	4,0724	2,8179
100	54,52	-	1,6650	-	1,5361	-
300	163,55	-	0,5311	-	0,3276	-

Las presiones calculadas en la Tabla 23 se compararon con los rangos de presión presentados por (Zipf & Cashdollar, s.f.), (Kinney & Graham, 1985) y (White, Jones, Fletcher, & Richmond, 1971) con lo que se estimó las distancias a las que se colocaría cada una de las posiciones de seguridad. Cave recalcar que la carga explosiva utilizada es una carga direccionada, por tal motivo

la mayor afectación de la onda explosiva y del fenómeno de fragmentación ocurre en la dirección en la que se colocó la carga explosiva como se puede observar en la Figura 39.



Figura 39. Ubicación de las posiciones de seguridad
(Fuente: Google Maps)

La primera posición de seguridad se destinó para la realización de la detonación, en este lugar se colocó la máquina de ensayos destructivos a compresión, de igual manera se construyó una berma de seguridad ya que las cargas explosivas direccionadas se las colocaron a media altura del elemento (para el presente caso a 1.25m). La berma está constituida por el suelo de la misma zona

con 3 m de altura con relación a la base de la máquina de ensayos y protegiendo la dirección en la que se va a colocar la carga explosiva, como se puede apreciar en la Figura 40, esta berma se construyó para proteger la vía principal de acceso al polígono de demoliciones.



Figura 40. Posición de seguridad número uno, zona de ensayos

La segunda posición de seguridad se la colocó a 300m de la primera posición, esta distancia se la asumió partiendo del análisis realizado por (Peralta, Sarango, & Mejía, 2019) en la que se estima como una zona completamente segura para seres humanos y equipos, sin que sea necesario la utilización de equipo de protección especializado. Además, a esta distancia la situación geográfica permitía la construcción de una berma de protección, para su construcción se utilizó el suelo de la misma zona y a una altura de 3.0 m como se puede observar en la Figura 41.



Figura 41. Posición de seguridad número dos, berma de seguridad

Finalmente, la tercera posición de seguridad fue destinada para proteger en los ensayos a la cámara Phantom V2512. En la posición se construyó una protección tipo fosa de 1.50 m de profundidad, 4.00 m de largo y 1.00 m de ancho tomando en cuenta el espacio que requiere la cámara y el operador, como se puede apreciar en la Figura 42. La ubicación de esta posición de seguridad es a 30.00 m de distancia de la primera posición, se asumió dicha distancia con el fin de obtener las mejores tomas con la cámara sin que se ponga en riesgo tanto al equipo filmográfico como el operador (Peralta, Sarango, & Mejía, 2019).

Además, en la posición tipo fosa se colocó un vidrio templado de 10 líneas con el objetivo de proteger al lente de la cámara que es el elemento más sensible, en la parte superior se le adecuó un escudo anti fragmentos para impedir que algún residuo de hormigón impacte directamente a la cámara y pueda ocasionar algún daño. Por otra parte, los efectos de la onda explosiva fueron

cubiertos al encontrarse la cámara empotrada y protegida por el desnivel del suelo (Peralta, Sarango, & Mejía, 2019).



a) Vista aérea de la posición de seguridad

b) Vista frontal de la posición de seguridad

Figura 42. Posición de seguridad número tres, posición de seguridad tipo fosa

3.5.4 Preparación de explosivos

Para los ensayos experimentales con explosivos en las probetas de hormigón armado tipo columna a escala real, en la fase I del Proyecto de Investigación Militar 005 (PIM) “ Desarrollo de curvas de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de hormigón armado mediante simulación computacional y ensayos experimentales” se realizaron varias pruebas del tipo de explosivo a fin de determinar deformaciones, rupturas, desconfinamiento, pérdida de masa y demás aspectos que contribuirán a analizar el fenómeno de estudio; en cuanto a forma se disponen cargas de tipo: lineal, en barra, cónicas y diédricas (Mejía & Vasconez, 2017). Las pruebas ejecutadas en el PIM determinaron que el uso de cargas cónicas y diédricas de explosivo pentolita ocasionaron el efecto esperado en los parámetros antes mencionados.

Para los ensayos experimentales se utilizó cargas cónicas o rompedores cónicos APD de 450gr de pentolita, de diámetro de 12cm y una altura de 7,5cm; las características de la carga

explosiva determinadas por el fabricante EXPLOCEN C.A que se detallan en la Tabla 24. En la Figura 43 se muestra la carga cónica.

Tabla 24

Características del explosivo Pentolita

PARÁMETROS	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Densidad	g/cm ³	1,60
Volumen de gases	l/kg	777
Calor de explosión	Kcal/Kg	1300
Potencia	KJ/Kg	5443
Velocidad de detonación	m/s	7418
Presión de detonación	Kbar	220*
Resistencia al agua	-	Excelente
Ensanchamiento de Traulz	cm ³ /10g	400

Fuente: (EXPLOCEN, Catálogo de productos y servicios, 2018)

**Presión de detonación del explosivo pentolita determinado mediante los ensayos de Traulz, no se puede determinar como la presión de la carga cónica como efecto de su geometría.*



Figura 43. Carga cónica 450g

También, se utilizó cargas de barras diédricas con un peso de 230g de pentolita, con un diámetro de 4cm y una longitud de 12cm las características de la carga explosiva determinadas por el fabricante EXPLOCEN C.A que se detallan en la Tabla 24. En la Figura 44 se observa la barra diédrica.



a) Vista frontal de la barra diédrica

b) Vista posterior de la barra diédrica

c) Vista lateral barra diédrica

Figura 44. Carga Diédrica

En los ensayos experimentales con explosivos se utilizaron cargas conformadas, denominadas así por la unión de dos tipos de carga de diferentes geometrías con el mismo explosivo (pentolita). La carga conformada tiene las siguientes características: peso de 1140g, la configuración de una carga cónica de 450g con tres barras diedras de 230g, como se muestra en la Figura 45, las características de estas cargas se detallan en la Tabla 24 determinadas por el fabricante EXPLOCEN C.A.

Para obtener mayor potencia de detonación en los ensayos experimentales en las probetas de hormigón armado tipo columna y causar el efecto deseado para causar el colapso del elemento de hormigón, se planificó utilizar cargas conformadas, llamadas así por la unión de dos tipos de cargas con geometrías diferentes, pero del mismo tipo de explosivo pentolita.



Figura 45. Carga conformada 1140g

Las cargas conformadas se diseñaron para aumentar su efecto rompedor por la acción de la onda explosiva, es por ello que serán colocadas a media altura de la probeta tipo columna donde el momento flector es mayor y sin stand-off (distancia o separación de un elemento), de esta manera creando condiciones de carga no confinada (apoyada). En la Figura 46 se muestra la colocación de las cargas.



Figura 46. Colocación de las cargas a media altura en las probetas de hormigón armado tipo columna

CAPÍTULO IV

FASE EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Ensayos con explosivo en probetas de hormigón armado tipo columna.

4.1.1 Procedimiento de ensayo

Para la ejecución de los ensayos experimentales con explosivos en el Ecuador se requieren las autorizaciones respectivas del Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas (CC.FF.AA), para el uso del polígono de demoliciones del Destacamento Conjunto de Municiones “El Corazón” (DEPCOR) y previa coordinación con el Comando de Operaciones Terrestres (COT) del Ejército ecuatoriano para el empleo de explosivos y del equipo de Neutralización de Material Explosivo (NME). Además, se dio cumplimiento con los instructivos y protocolos aprobados para ensayos con explosivos en lo referente a seguridad, traslado y actividades a ejecutar. Se realizaron los ensayos con explosivos en las probetas de hormigón armado tipo columna en cuatro etapas.

4.1.1.1 Etapa I.- Preparación de áreas y puestos de seguridad.

En la etapa se realizaron las siguientes actividades:

- Preparación del área de demolición mediante la verificación de las bermas de seguridad que se encuentran ubicadas en el punto de detonación y zona de reunión del personal que participa en los ensayos.
- Preparación del puesto de seguridad tipo fosa para el equipo filmográfico como se muestra en la Figura 47.



Figura 47. Preparación puesto de seguridad tipo fosa para equipo filmográfico

4.1.1.2 Etapa II.- Traslado de probetas e instalación de equipos.

En la etapa se realizaron las siguientes actividades:

- Traslado de las columnas desde el lugar de su construcción hasta el polígono de demoliciones (DEPCOR) como se muestra en la Figura 48.
- Instalación del equipo filmográfico en el puesto de seguridad (cámara Phantom V2512, computadora portátil, UPS y equipo de protección) como se muestra en la Figura 49.



Figura 48. Traslado de las probetas de hormigón armado tipo columnas



Figura 49. Instalación de los equipos filmográficos en el puesto de seguridad

4.1.1.3 Etapa III.- Preparación de la máquina de ensayos destructivos, verificación de las columnas y explosivos.

En la etapa se realizaron las siguientes actividades:

- Preparación de la máquina de ensayos destructivos a compresión mediante la colocación del gato hidráulico como se muestra en la Figura 50, además el engrasado y la verificación del estado de vigas, columnas, cordones de suelda y condiciones de los pernos.
- Verificación del completamiento de las probetas de hormigón tipo de columna, la distribución por sección y resistencia que determinó el orden de los ensayos, en la Figura 51 se observan las probetas.
- Se realizó la inspección en los polvorines del DEPCOR, sobre las condiciones de almacenamiento de los explosivos tanto las cargas conformadas, cónicas y diédricas, así como también los fulminantes eléctricos y cordón detonante, además organizar la cantidad de explosivo que se van a utilizar en los ensayos.



Figura 50. Ubicación del gato hidráulico



Figura 51. 33 probetas de hormigón armado tipo columna

4.1.1.4 Etapa IV.- Procedimientos de los ensayos destructivos

En los ensayos experimentales con explosivos en las columnas de hormigón armado, se describen los pasos a seguir en cada ensayo con las 33 columnas en la Tabla 25, se realizaron de dos a tres ensayos por día de acuerdo a las condiciones meteorológicas y a la operatividad de la máquina de ensayos destructivos a compresión después de cada ensayo. Cabe mencionar que todos los ensayos se realizaron con la presencia de una ambulancia y personal de paramédicos, además del equipo de neutralización de material explosivo (NME) como apoyo en el manejo de explosivos.

Tabla 25*Descripción de los pasos a seguir en el ensayo de las 33 columnas*

PASOS	DESCRIPCIÓN	GALERÍA FOTOGRÁFICA
Paso 1	Levantamiento de la tapa superior de la máquina de ensayos destructivos a compresión.	
Paso 2	Colocación de la probeta tipo columna en la máquina de ensayos destructivos a compresión.	
Paso 3	Ajuste de pernos de la columna en la máquina de ensayos destructivos a compresión, y la colocación de la carga axial por medio del gato hidráulico.	

Continúa...

Paso 4

Empleo de esclerómetro en las columnas de hormigón armado realizando 20 golpes en posición horizontal (perpendicular a la probeta).



Paso 5

Colocación de las cargas explosivas a media altura de la probeta tipo columna.



Paso 6

Cebamiento de la carga (unir el fulminante eléctrico con la carga explosiva).



Continúa...

Paso 7

Preparación de la cámara de alta velocidad Phantom V2512 para la toma de imágenes y colocación de los equipos de protección.



Paso 8

Enlace entre equipos portátiles tierra-aire para la coordinación entre el personal que activara la carga explosiva con la grabación de imágenes, activación de la detonación con fuentes de energía (explosor).



Paso 9

Verificar daños en la probeta y realizar las mediciones de deformación, longitud de exposición del acero y fragmentación del hormigón, además verificar la cantidad de carga axial restante en el gato hidráulico.



Continúa...

Paso 10 Realizar el escaneo en 3D de la probeta tipo columna, colocando puntos de referencia para su empleo.



Paso 11 Retirar la columna ensayada de la máquina de carga axial



En la Tabla 26, se describe los resultados mediante imágenes de los ensayos con explosivos en las 33 columnas de hormigón armado, mediciones que más adelante serán detallados en tablas de datos.

Tabla 26*Imágenes de los resultados de los ensayos con explosivos***Ensayo de probeta tipo columna de 30x30, $f'c$ 210kg/cm² cuantía de 1,5%, 1 Carga cónica***Continúa...*

Ensayo de probeta tipo columna de 30x30, f'c 280kg/cm² cuantía de 1,5%, 1 Carga conformada



Continúa...

Ensayo de probeta tipo columna de 40x40, $f'c$ 210kg/cm² cuantía de 1,5%, 1 Carga conformada



Continúa...

Ensayo de probeta tipo columna de 40x40, f_c 280kg/cm² cuantía de 1,5%, 3 Cargas conformadas

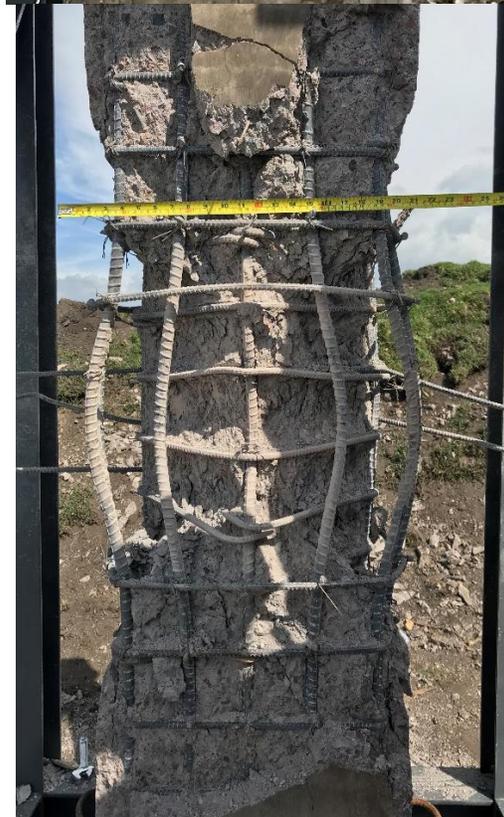


Continúa...

Ensayo de probeta tipo columna de 50x50, f_c 210kg/cm² cuantía de 1,5%, 2 Cargas conformadas



Ensayo de probeta tipo columna de 50x50, f_c 280kg/cm² cuantía de 1,5%, 3 Cargas conformadas



4.1.2 Medición de deformaciones

Se realizaron las mediciones en las columnas que estuvieron en contacto con el explosivo apoyadas en una sola cara, por tal motivo, en dicha cara es en la que se van a medir las deformaciones. Tras el ensayo se afectaron los dos materiales que componen las probetas, por una parte, el hormigón se fragmentó en la zona donde fue colocada la carga explosiva conocida como zona de fragmentación. El acero se deformó como se muestran en las Figuras: 52, 53, 54 y 55, dichas deformaciones se analizaron por medición directa con una tolerancia de $\pm 0,1\text{cm}$, como se representa en las Figuras: 52, 53, 54 y 55 dependiendo al grupo al que pertenecían cada probeta; y sus resultados se presentan en las Tablas 27, 28, 29, 30, 31 y 32.

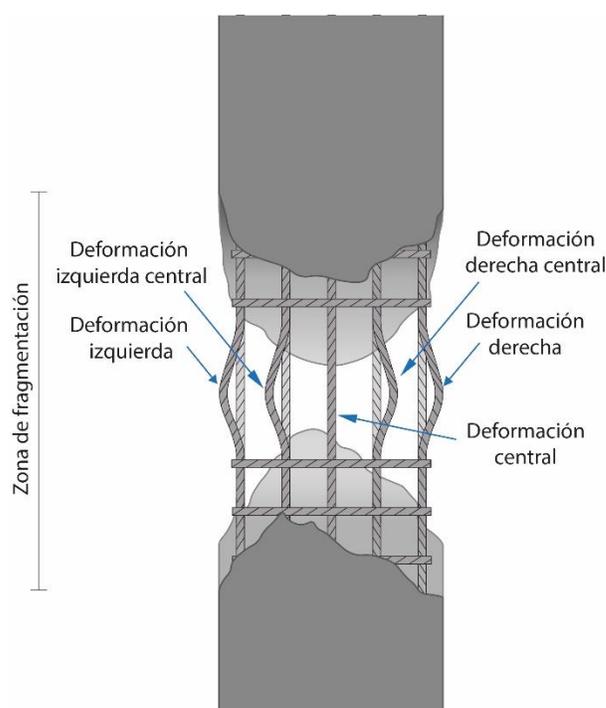


Figura 52. Metodología de medición de probetas del Grupo 1, 2, 3 y 4

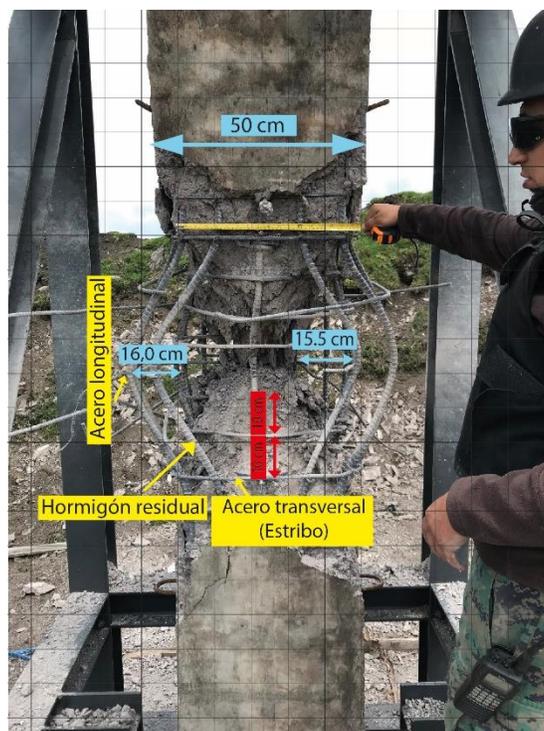


Figura 53. Columna de 50 cm x 50 cm post ensayo

Tabla 27

Resultados de los ensayos referentes al Grupo 1

Ensayo N°	Fecha de ensayo	Datos del ensayo			Deformaciones				
		Carga del explosivo	Carga aplicada	Carga residual	Central	Izquierda central	Izquierda	Derecha central	Derecha
		gr	Ton	Ton	cm	cm	cm	cm	cm
8	07/03/2018	3420	50	20	12,0	16,0	15,0	16,0	15,0
17	16/03/2018	2280	50	0	Corte	6,7	6,0	6,7	6,0
18	21/03/2018	3420	50	0	13,5	14,4	18,0	14,4	15,0
21	27/08/2018	3420	50	0	13,5	14,0	17,5	18,5	18,5
23	30/08/2018	3420	50	0	14,0	13,0	14,0	14,0	14,5
27	31/08/2018	2960	50	0	8,4	9,5	11,0	8,6	8,8
33	20/09/2018	4560	50	0	20,5	20,0	20,0	22,5	24,5

Tabla 28*Resultados de los ensayos referentes al Grupo 2*

Ensayo N°	Fecha de ensayo	Datos del ensayo			Deformaciones				
		Carga del explosivo	Carga aplicada	Carga residual	Central	Izquierda central	Izquierda	Derecha central	Derecha
		gr	Ton	Ton	cm	cm	cm	cm	cm
11	14/03/2018	2280	50	23	6,5	7,0	6,5	7,0	4,5
12	15/03/2018	3420	50	24	16,0	18,2	19,0	19,2	18,0
26	31/08/2018	2280	-	-	9,0	6,0	5,5	7,0	7,0
29	06/09/2018	2280	50	9,5	5,4	5,5	5,6	6,0	5,5

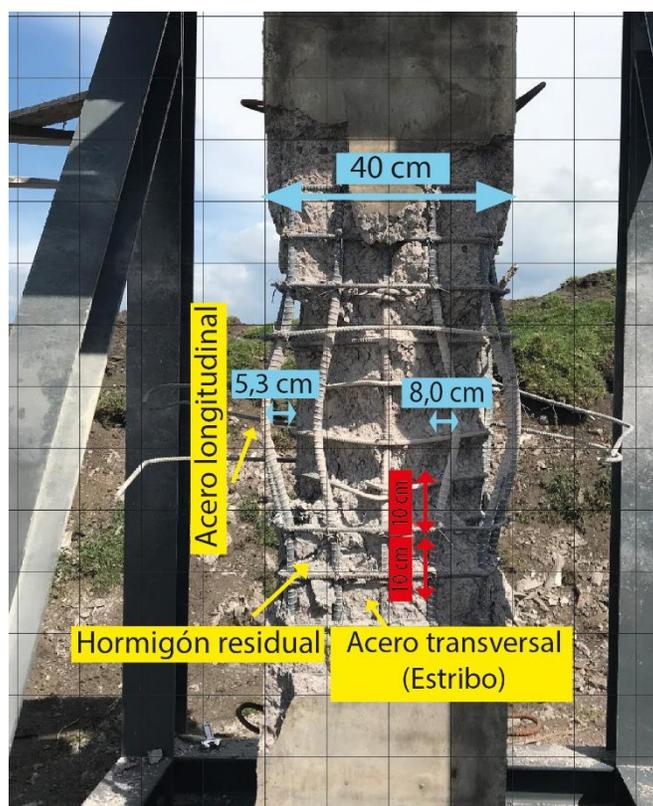
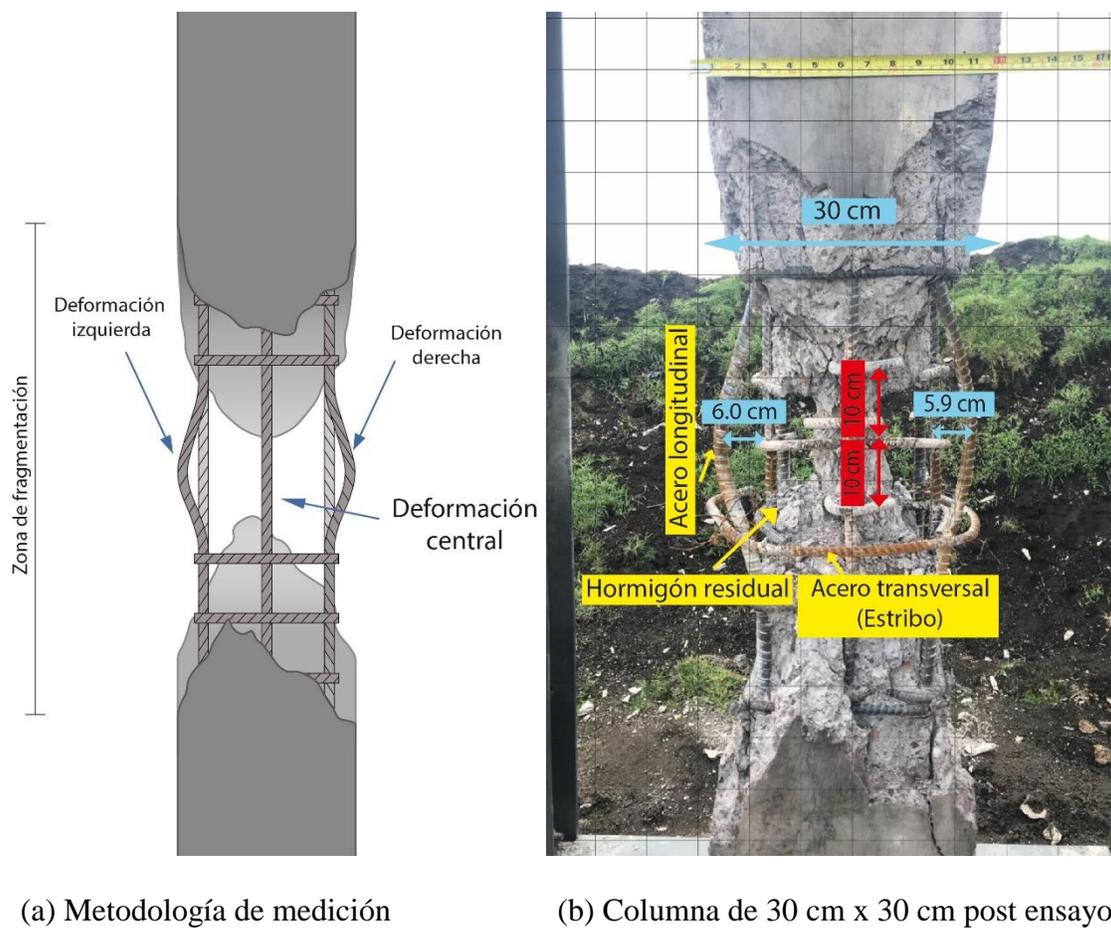
**Figura 54.** Columna de 40 cm x 40 cm post ensayo

Tabla 29*Resultados de los ensayos referentes al Grupo 3*

Datos del ensayo					Deformaciones				
Ensayo N°	Fecha de ensayo	Carga del explosivo	Carga aplicada	Carga residual	Central	Izquierda central	Izquierda	Derecha central	Derecha
		gr	Ton	Ton	cm	cm	cm	cm	cm
3	28/02/2018	1140	50	-	4,9	-	2	-	2
4	28/02/2018	2280	50	28	7	-	10	-	11
5	02/03/2018	3420	50	-	15,5	-	15	-	15
9	07/03/2018	2280	50	22	7,3	5,3	8	4,3	7
14	15/03/2018	2280	40	21		7,4	7	7,4	7
24	30/08/2018	2960	40	23,44	15	corde	15	13,6	14
28	04/09/2018	2280	40	0	-	9	7,5	-	8

Tabla 30*Resultados de los ensayos referentes al Grupo 4*

Datos del ensayo					Deformaciones				
Ensayo N°	Fecha de ensayo	Carga del explosivo	Carga aplicada	Carga residual	Central	Izquierda central	Izquierda	Derecha central	Derecha
		gr	Ton	Ton	cm	cm	cm	cm	cm
10	09/03/2018	2280	50	25	9,1	10,0	8,7	10,0	8,7
20	20/08/2018	2280	50	0	8,0	8,0	8,5	8,0	7,5
22	29/08/2018	2960	40	0	20,0	-	19,5	21,0	20,0
31	18/09/2018	1820	40	10	9,5	10,5	7,6	10,4	9,2



(a) Metodología de medición

(b) Columna de 30 cm x 30 cm post ensayo

Figura 55. Metodología de medición de probetas del Grupo 5 y 6**Tabla 31***Resultados de los ensayos referentes al Grupo 5*

Ensayo N°	Fecha de ensayo	Datos del ensayo			Deformaciones		
		Carga del explosivo	Carga aplicada	Carga residual	Central	Izquierda	Derecha
		gr	Ton	Ton	cm	cm	cm
1	01/02/2018	1140	50	-	8,0	3,5	3,0
6	02/03/2018	1140	50	28	5,0	7,0	7,0
13	15/03/2018	1140	40	-	5,0	9,4	9,4
16	16/03/2018	1140	50	20	6,0	8,7	7,3
25	31/08/2018	1140	40	50	5,7	5,0	5,2
30	18/09/2018	1140	40	0	5,8	7,4	6,8
32	19/09/2018	1140	40	5	9,4	10,0	9,2

Tabla 32*Resultados de los ensayos referentes al Grupo 6*

Ensayo N°	Fecha de ensayo	Datos del ensayo			Deformaciones		
		Carga del explosivo	Carga aplicada	Carga residual	Central	Izquierda	Derecha
		gr	Ton	Ton	cm	cm	cm
2	07/02/2018	1140	50	-	9,5	-	-
7	02/03/2018	450	50	32	2	3	3
15	16/03/2018	680	70	65	0,7	1,5	2
19	23/03/2018	1140	50	-	9	7	7

4.1.3 Esclerómetro

Las probetas tipo columnas de hormigón armado fueron diseñadas para cumplir con dos diferentes resistencias a la compresión, 12 columnas fueron diseñadas para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y 21 columnas para $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$. Como un instrumento de verificación a dichas resistencias se decidió realizar el ensayo de resistencia del hormigón con esclerómetro, dicho ensayo permite conocer en campo la resistencia a la compresión aproximada que posea un elemento de hormigón.

En la ejecución del ensayo se utiliza un martillo de acero impulsado por resorte tal como se estipula en la norma (ASTM C805, 2018), se realiza 20 golpes con dicho martillo, perpendicular a la cara de la superficie como se muestra en la Figura 56, registrando cada uno de ellos, en un área de mínimo 15 cm de diámetro procurando no hacer dos golpes en un mismo lugar. Los 20 golpes deben ser realizados por una misma persona y procurando utilizar la misma fuerza en cada uno de ellos.



Figura 56. Ensayo de resistencia del hormigón con el uso de esclerómetro

Para el procesamiento de la información se ordenan los 20 datos de mayor a menor y se elimina el valor máximo y mínimo; de los 18 restantes se obtiene el promedio con el cual se procede a calcular la resistencia del hormigón utilizando las Ecuaciones (21) y (22), dependiendo al sentido en el que se ejecutó el ensayo; y sus resultados son los que se presentan en la Tabla 33.

$$f'c = 0.0703 * (-0.0004 * R^4 + 0.0681 * R^3 - 2.2675 * R^2 + 210.74 * R - 2443.7) \quad (21)$$

$$f'c = 0.0703 * (2.3318 * R^2 + 75.362 * R - 2010.2) \quad (22)$$

Donde, $f'c$: es la resistencia medida con el esclerómetro (kg/cm^2); R: es el valor de rebote medido en el esclerómetro (adimensional). La Ecuación 21 se la utiliza cuando el sentido del golpe es como se muestra en la Figura 57 (a), es decir de forma horizontal. Por otra parte, si la dirección del golpe es como se muestra en la Figura 57 (b), es decir de forma vertical, se deberá utilizar la Ecuación (22).

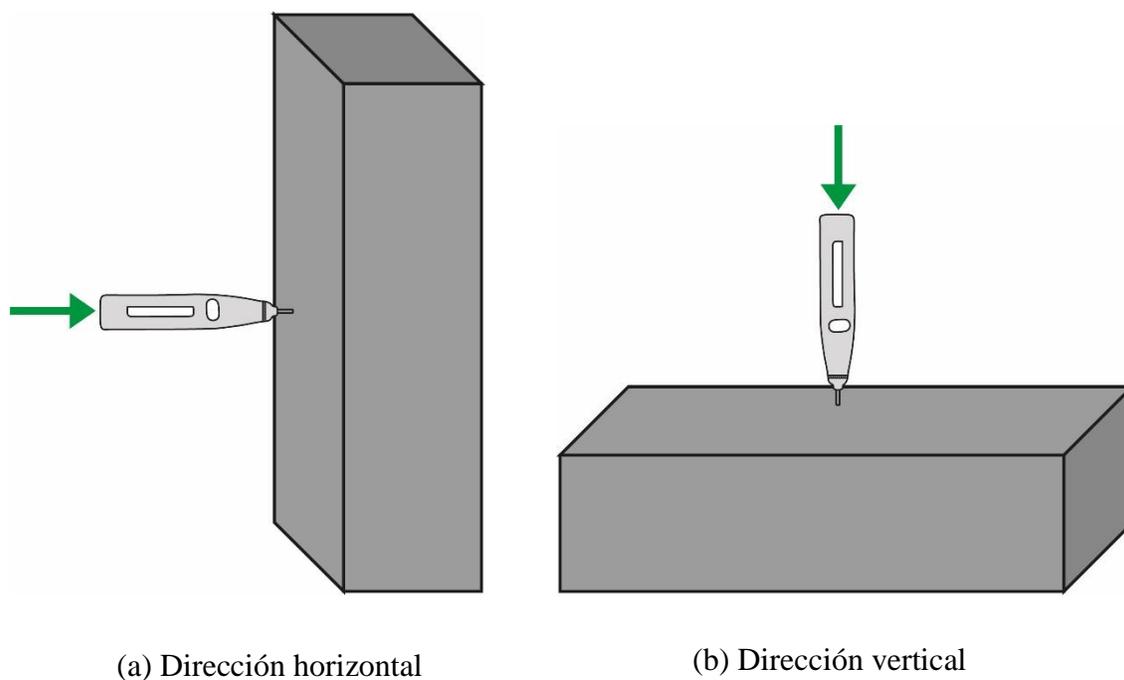


Figura 57. Dirección de golpe en el ensayo con esclerómetro

Tabla 33

Resultados de los ensayos de resistencia del hormigón con esclerómetro

Ensayo N°	Fecha	Resistencia de diseño	Rebote	Resistencia por esclerómetro	Dirección de golpe
1	01/02/2018	280	47	532,22	Horizontal
2	07/02/2018	210	32	266,45	Horizontal
3	28/02/2018	280	52	635,11	Horizontal
4	28/02/2018	280	47	532,22	Horizontal
5	02/03/2018	280	44	473,88	Horizontal
6	02/03/2018	280	49	572,54	Horizontal
7	02/03/2018	210	38	365,06	Horizontal
8	07/03/2018	280	50	593,12	Horizontal
9	07/03/2018	280	47	532,22	Horizontal
10	09/03/2018	210	32	266,45	Horizontal
11	14/03/2018	210	31	250,94	Horizontal
12	15/03/2018	210	32	266,45	Horizontal
13	15/03/2018	280	44	473,88	Horizontal
14	15/03/2018	280	52	635,11	Horizontal
15	16/03/2018	210	31	250,94	Horizontal
16	16/03/2018	280	45	493,03	Horizontal
17	16/03/2018	280	45	493,03	Horizontal
18	21/03/2018	280	48	552,24	Horizontal

Continúa...

19	23/03/2018	210	34	298,23	Horizontal
20	20/08/2018	210	31	250,94	Horizontal
21	27/08/2018	280	42	436,44	Horizontal
22	29/08/2018	210	34	298,23	Horizontal
23	30/08/2018	280	48	552,24	Horizontal
24	30/08/2018	280	39	382,47	Horizontal
25	31/08/2018	280	46	512,48	Horizontal
26	31/08/2018	210	36	331,09	Horizontal
27	31/08/2018	280	50	593,12	Horizontal
28	04/09/2018	280	38	365,06	Horizontal
29	06/09/2018	210	37	347,93	Horizontal
30	18/09/2018	280	45	429,04	Vertical
31	18/09/2018	210	39	314,63	Vertical
32	19/09/2018	280	44	409,15	Vertical
33	20/09/2018	280	42	370,36	Vertical

4.2 Pruebas post ensayos con explosivos en probetas tipo columna

Posterior a los ensayos con explosivos, se realizaron pruebas para analizar el estado y características de los materiales de las probetas (hormigón y acero), para posteriormente compararlos con los ensayos realizados antes de las detonaciones y examinar el efecto causado por el explosivo.

4.2.1 Ensayo de tracción de acero

El objetivo de realizar el ensayo de tracción del acero, es determinar las características mecánicas debido a esfuerzos de tracción en varillas de acero corrugado utilizadas en la construcción de las probetas, dicho ensayo se lo realizó en el laboratorio de Ensayo de Materiales perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Se ensayaron un total de 18 muestras de 3 diámetros diferentes (14mm, 16mm y 18mm), cada una de ellas con una longitud inicial de 40cm aproximadamente, la longitud inicial no se la toma como verdadera debido a la deformación

que presentan dichas varillas como se muestra en la Figura 58, cumpliendo con la norma (NTE INEN - ISO 6892 - 1, 2017).



(a) Colocación de la muestra



(b) Rotura de la varilla post ensayo

Figura 58. Ensayo de tracción del acero

Las muestras fueron extraídas de las probetas ya ensayadas ante cargas explosivas, tomadas de seis columnas de un total de 33. El ensayo de tracción se lo realizó en la Máquina de Ensayos Universales marca MTS modelo 810-14-2 el día 7 de noviembre de 2018. Dichas probetas fueron colocadas en la Máquina de Ensayo Universal donde se le aplicó fuerza en tracción hasta llegar a la falla del elemento, durante el ensayo se registraron los datos automáticamente en las hojas de papel milimetrado y en un voltímetro. Siendo los resultados los que se presentan en las Figuras 59, 60 y 61.

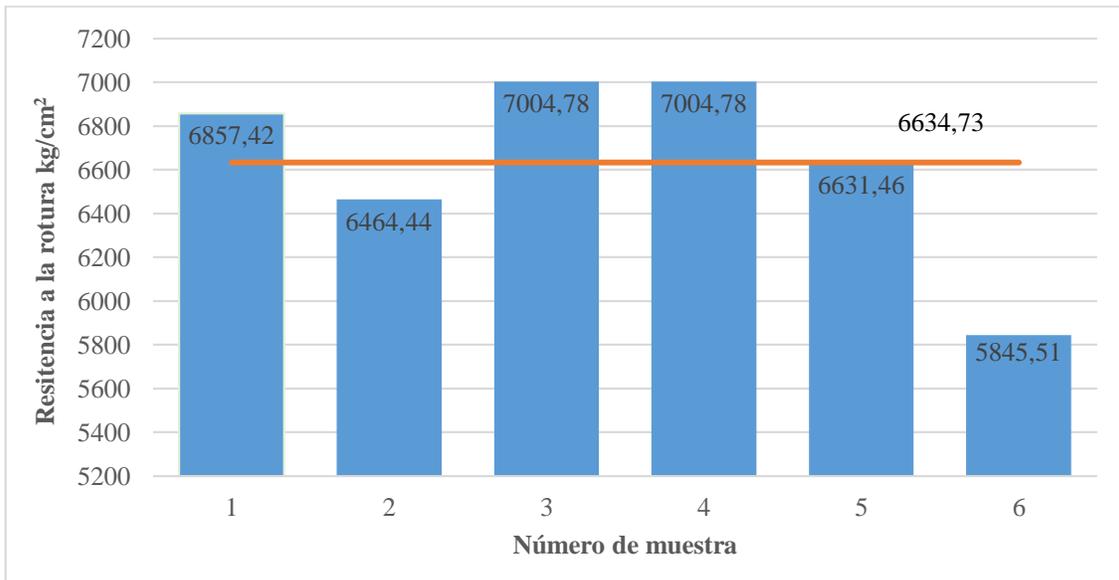


Figura 59. Resultados del ensayo de tracción de las varillas de 18mm

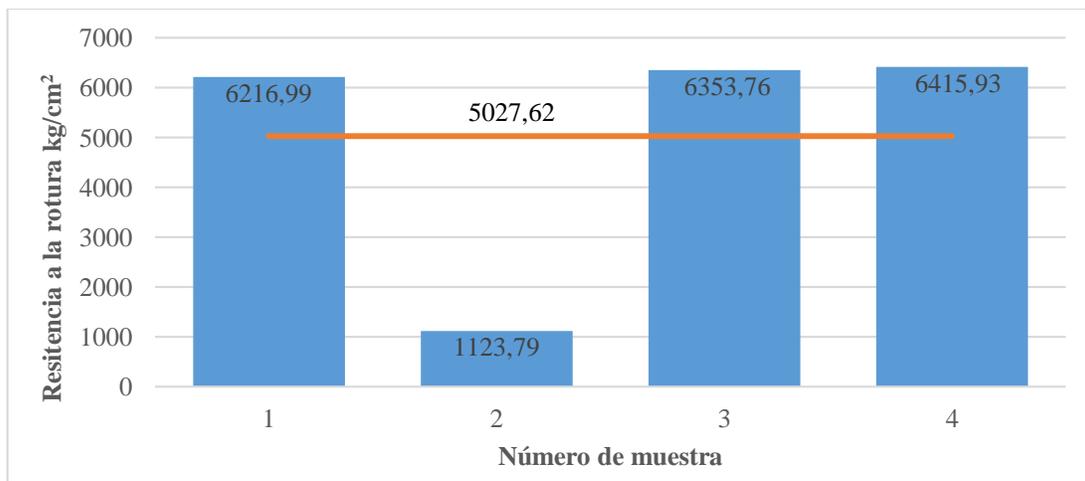


Figura 60. Resultados del ensayo de tracción de las varillas de 16mm

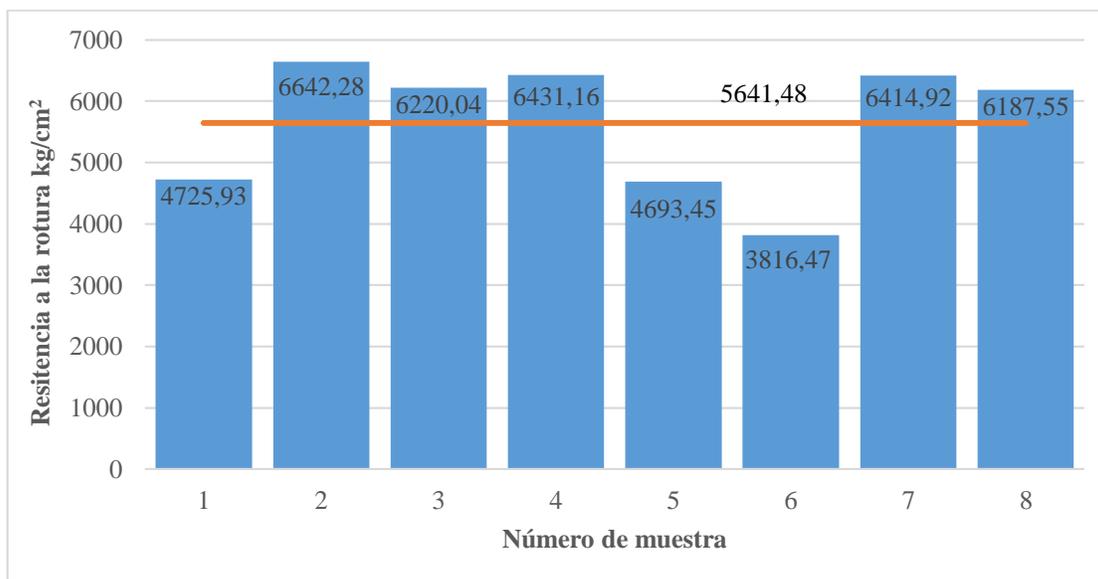


Figura 61. Resultados del ensayo de tracción de las varillas de 14mm

Los rangos en los que fluctuó la resistencia a la rotura son los que muestran en la Tabla 34, encontrándose el promedio dentro del valor establecido por el proveedor y amparándose en la norma NTE INEN 2167, (2017) que es 5500 kg/cm², cave recalcar que para lograr realizar el ensayo se manipularon las varillas para que puedan ser colocadas en la máquina de ensayos universal, lo que provoca que las varillas pierdan más resistencia; se puede observar que las varillas de mayor diámetro fueron menos afectadas a pesar que son las que estuvieron afectadas por mayor cantidad de explosivo; esto se debe a que tenían un mayor recubrimiento de hormigón y mejor confinamiento.

Tabla 34

Resultados de los ensayos de tracción de las varillas de acero

Díámetro de la varilla	Resistencia a la rotura
Φ 18 mm	6634.73 kg/cm ²
Φ 16 mm	5027.62 kg/cm ²
Φ 14 mm	5641.47 kg/cm ²

4.2.2 Ensayos de núcleos de hormigón

Se realizó la extracción de núcleos de hormigón de las probetas tipo columna detonadas en los ensayos con explosivos de acuerdo con lo que determina la Norma (ASTM C42, 2012) con el fin de realizar el ensayo de resistencia a la compresión, para ello se eligieron cinco (5) probetas detonadas de acuerdo al siguiente detalle: 02 columnas de sección 50 cm x 50 cm con un $f'c=280\text{kg/cm}^2$, 02 columnas de sección 50 cm x 50cm con un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ y 01 columna de sección 40 cm x 40 cm con un $f'c=210\text{kg/cm}^2$.

En el ensayo se debe tomar en cuenta que la resistencia del hormigón armado es afectada por la ubicación del hormigón en el elemento estructural, los núcleos que hayan resultado dañados durante la extracción no deberán ser usados para el ensayo de compresión a menos que se corte la parte dañada y la longitud del espécimen resultante cumpla la relación largo-ancho mínima requerida, los núcleos que contengan acero de refuerzo embebido, fibras u otros objetos embebidos no deberán ser usados para el ensayo, además los núcleos deben ser extraídos de manera perpendicular a la superficie y al menos 150mm alejados de juntas de unión de elementos estructurales (ASTM C42, 2012).

Para los núcleos perforados la medición de la muestra debe tener un diámetro de al menos 95mm (3.75 pulg) y para elementos no portantes o cuando es imposible obtener núcleos con relación longitud/diámetro (L/D) igual o mayor que 1, el diámetro puede ser de 5 mm (1/4 pulg). La longitud ideal de la muestra debe ser entre 1.9 a 2.1 veces el diámetro y la relación longitud-diámetro sea $L/D>1.75$, muestras con longitudes menores al diámetro no deberán ser ensayados (ASTM C42, 2012).

Los ensayos se realizaron en el sector del CICTE con la extracción de los núcleos de hormigón de las probetas antes elegidas, como se observa en la Figura 62, en el cual se utilizó la máquina de extracción de núcleos eléctrica con el taladro de 5cm debido al acero de refuerzo y los estribos que se encontraban embebidos en las columnas, para obtener muestras solo de hormigón que permita realizar los ensayos a compresión.



Figura 62. Máquina de extracción de núcleos en columna de 50 cm x 50 cm, $f'c$ 210kg/cm²

En la Figura 63 se muestra la preparación de la máquina y el uso en las columnas mediante la medición del lugar de perforación como se observa en la Figura 64, procedimiento que evita topar los aceros. La perforación se realizó con agua a una profundidad de 18cm, para cumplir con la longitud mínima de la probeta siendo este el doble del diámetro (2d), ya que por el proceso de perforación se pueden producir fracturas internas en los cilindros.



Figura 63. Perforación de los núcleos en las probetas tipo columna



Figura 64. Medición del área de perforación

Los cilindros obtenidos son retirados del taladro u orificio de la probeta revisado y señalado para el siguiente proceso los ensayos de compresión. En la Figura 65 se observa las muestras obtenidas en las perforaciones, cinco (5) cilindros de 4.4cm de diámetro y de diferente longitud. Las muestras se obtuvieron en las áreas de las columnas no afectadas por el explosivo además los

ensayos se realizaron con las probetas en posición horizontal y la perforación fue perpendicular de esta manera cumpliendo con las generalidades y descripciones mencionadas en los párrafos anteriores sobre la aplicación de la Norma (ASTM C42, 2012).



Figura 65. Muestras obtenidas en perforaciones

La preparación de las muestras para los ensayos de compresión se inició con el corte de los cilindros a la longitud establecida ($2d$) en la norma como se muestra en la Figura 66 y se permitió la evaporación de la humedad. Se realizó los ensayos de compresión de cuatro cilindros, como se muestra en la Figura 67, puesto que la muestra 2 se fracturó al realizar el corte de los cilindros en la máquina. En la Figura 68 se muestra el momento de falla del cilindro por la aplicación de carga a la probeta. En la Tabla 35 se detallan los resultados de los ensayos a compresión.



Figura 66. Corte de los cilindros



Figura 67. Ensayos a compresión



(a) Muestra de falla real



(b) Muestra de falla cámara Phantom

Figura 68. Falla de la muestra**Tabla 35***Resultados de los ensayos a compresión de los núcleos de hormigón*

Parámetros	Muestras				
Cilindro	M1	M2	M3	M4	M5
Identificación	210	280	210	280	210
Fecha de extracción	18/4/2019	18/4/2019	18/4/2019	18/4/2019	18/4/2019
Fecha de Ensayo	22/4/2019	22/4/2019	22/4/2019	22/4/2019	22/4/2019
Diámetro (mm)	43,83	-	44,00	44,00	44,00
Área (mm ²)	1509,0	-	1520,5	1520,5	1520,5
Longitud (mm)	95,00	-	97,00	88	98,00
Masa (g)	300,3	-	310,6	287,4	313,4
Volumen (cm ³)	143,36	-	147,49	133,81	149,01
Densidad (g/cm ³)	2,09	-	2,11	2,15	2,10
Carga Máxima (kg)	2810	-	3010	5630	2880
Esfuerzo (Mpa)	18,6	-	19,8	37,0	18,9
Relación L/D	2,17	-	2,20	2,00	2,23
Factor	1	-	1	1	1
Esfuerzo corregido (Mpa)	18,6	-	19,8	37,0	18,9
Esfuerzo corregido (kg/cm ²)	186,2	-	198,0	370,3	189,4

Para correlacionar los datos obtenidos en la extracción de los núcleos de hormigón se utilizó el esclerómetro para determinar la resistencia, se aplicó este procedimiento a cada muestra realizando veinte (20) golpes distribuidos en un área central de la sección de las probetas tipo columna, la posición del esclerómetro con relación a la columna fue perpendicular (90°). En la Figura 69 se muestra el modelo de esclerómetro que se usó en los ensayos. En la Tabla 36 se detalla los resultados de los valores obtenidos mediante los ensayos del esclerómetro en las probetas.



Figura 69. Modelo de Esclerómetro

Tabla 36

Valores obtenidos mediante los ensayos del esclerómetro en las probetas

Ensayo N°	Fecha	Resistencia de diseño	Rebote	Resistencia por esclerómetro	Dirección de golpe
M1	22/04/2019	210	46	478,47	Vertical
M2	22/04/2019	280	52	569,53	Vertical
M3	22/04/2019	210	48	502,70	Vertical
M4	22/04/2019	280	47	494,58	Vertical
M5	22/04/2019	210	44	446,86	Vertical

CAPÍTULO V

MODELOS MATEMÁTICOS

Para establecer los parámetros de la onda choque del explosivo tipo pentolita, se determinó el estudio de la presión de incidencia, para lo cual se aplicarán tres métodos: teórico o empírico, experimental y la simulación computacional obtenida del Proyecto de Investigación Militar. De esta forma, dicha metodología permitirá determinar el efecto de la onda de choque de una carga explosiva conformada en elementos estructurales de hormigón armado.

5.1 Presión de Incidencia

5.1.1 Presión de Incidencia Teórica

Con el afán de calcular la presión de incidencia teórica o empírica se basó en el análisis realizado por (Peralta, Sarango, & Mejía, 2019) que establecieron diversos modelos matemáticos estableciendo efectos de daño para infraestructura y personas como se muestra en la Figura 70, del cual se puede determinar que el modelo matemático de (Swisdak, 1994), es el más conservador en distancias cortas (menores a 100m), por tal motivo es el que se utilizará para los posteriores cálculos, dicho modelo aplica la Ecuación (23):

$$P_I = e^{A+B*\ln(Z)+C*\ln(Z)^2+D*\ln(Z)^3+E*\ln(Z)^4+F*\ln(Z)^5+G*\ln(Z)^6} \quad (23)$$

Donde, P_I es la presión de incidencia (kPa); A , B , C , D , E , F y G son constantes adimensionales que se muestran en la Tabla 37; Z es la distancia escalada que se calcula mediante la Ecuación (24) establecida por (Kingery C. , 1966) ($m/kg^{1/3}$); R es la distancia a la posición de detonación (m); y W es la masa del explosivo (kg).

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (24)$$

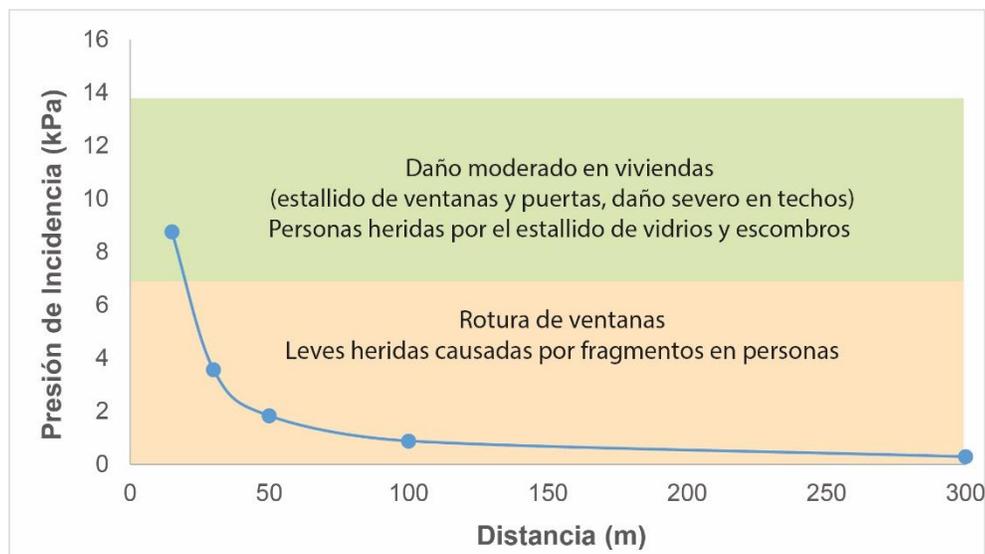


Figura 70. Efecto de daño para infraestructura y personas para 1 kg de TNT.
Fuente: (Peralta, Sarango, & Mejía, 2019)

Tabla 37

Constantes utilizadas por Swisdak en su estudio para determinar la presión de incidencia

Presión de Incidencia, PI (Unidades: kPa (psi))							
Z	A	B	C	D	E	F	G
0,2~2,9 (0,5~7.25)	7,2106 (6,9137)	-2,1069 (-1,4398)	-0,3229 (-0,2815)	0,1117 (-0,1416)	0,0685 (0,0685)	0 (0)	0 (0)
2,9~23.8 (7,25~60)	7,5938 (8,8035)	-3,0523 (-3,7001)	0,40977 (0,2709)	0,0261 (0,0733)	-0,01267 (-0,01267)	0 (0)	0 (0)
23,8~198.5 (60~500)	6,0536 (5,4233)	-1,4066 (-1,4066)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

Fuente: (Swisdak, 1994)

Para aplicar esta metodología con el explosivo de tipo pentolita se requiere realizar la equivalencia en peso de explosivo a TNT. Para dicho procedimiento se aplica la Ecuación (19) que se especifica en el presente trabajo. La aplicación de estas ecuaciones es para cargas de geometría esféricas detonadas a aire libre, que nos dará una referencia de la presión de incidencia de una carga

explosiva con pentolita. A continuación, se detalla los cálculos de equivalencia del explosivo utilizando los datos empleados en el Capítulo III:

$$W_e = W_{exp} * \left(\frac{H_{exp}^d}{H_{TNT}^d} \right)$$

$$W_e = 1.14 [kg] * \left(\frac{5.86}{4.33} \right)$$

$$W_e = 1.543 [kg]$$

El peso equivalente de la carga conformada es 1.543 kg, con este peso se ingresa en la Ecuación (24) a diferentes distancias. Finalmente, dichos resultados se los grafica entre la Presión de Incidencia vs Distancia y se obtiene la curva presente en la Figura 71, ésta curva describe el comportamiento de la presión a diferente distancias medidas desde el punto de detonación. La presión máxima es de 12.3 MPa a una distancia de 0.3 m y posterior a eso decae considerablemente hasta que a partir de los 1.4 m la presión es menor a 1 kPa.

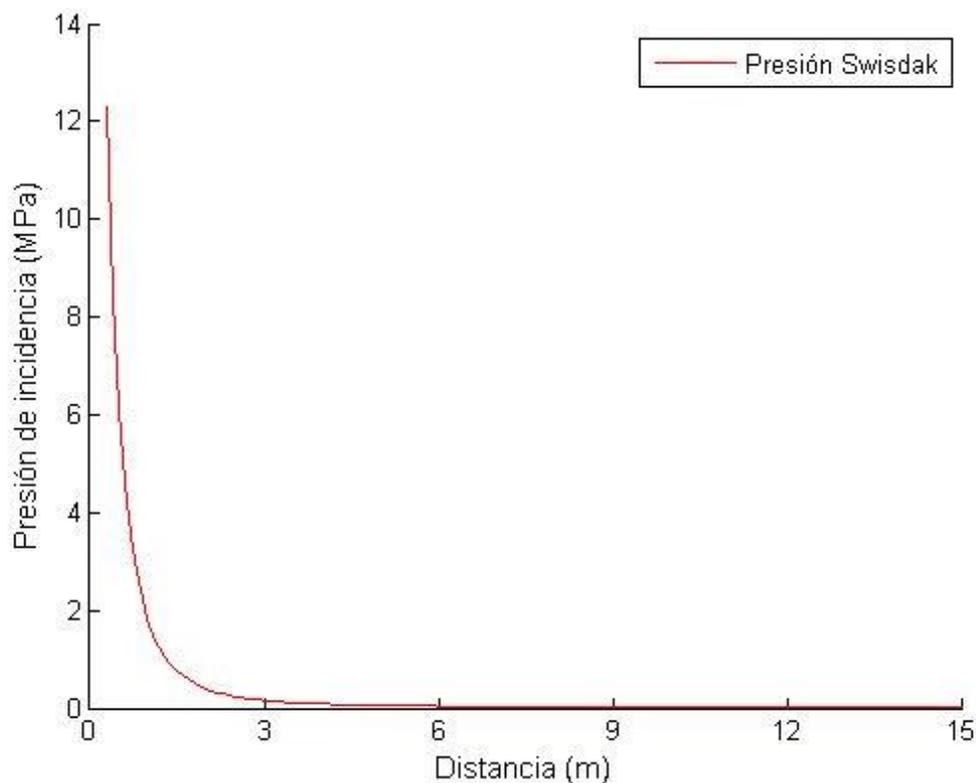


Figura 71. Comportamiento de la Presión de Incidencia vs Distancia

5.1.2 Presión de Incidencia de Campo o experimental

Durante los ensayos experimentales con explosivos, se utilizó la cámara Phamton que tiene las características de captar imágenes a 25000 fps a una resolución de 1280x800, además cuenta con un Software que permite realizar mediciones. En las imágenes se puede observar los gases que emite el explosivo durante la detonación; es por ello que con los parámetros obtenidos de la cámara más los datos del material explosivo se obtuvo la presión de incidencia máxima o presión de detonación aplicando las Ecuaciones (25) y (26) establecidas en (ENGINEERS, 2016), que se usan para determinar los parámetros de la onda explosiva una vez liberada de la carga al aire y en contacto con el elemento de hormigón siendo este un procedimiento experimental.

$$V_d = \left(\frac{M}{\rho * \Delta t * s} \right) \quad (25)$$

Donde, V_d es la velocidad de detonación de la onda de choque del explosivo [m/s]; ρ es la densidad (masa volumétrica) del explosivo [kg/m³]; Δt es la variación de tiempo de los gases del explosivo [s]; s es la superficie donde se aplica la carga [m²]; y M es la masa del explosivo (inmóvil) en [kg].

$$P_d = K * \rho * V_d \quad (26)$$

Donde, P_d es la presión de detonación (presión de incidencia máxima); K es el factor Dufour (efectos de la difusión térmica del material); ρ es la densidad del explosivo; V_d es la velocidad de detonación de la onda de choque.

La variación de gases fue obtenida de la cámara Phantom V2512, en la cual mediante el procesamiento de imágenes por el software del equipo permite realizar las mediciones del efecto de la detonación en la emanación de gases producidos por el explosivo como se detalla en la Tabla 38, este fenómeno se puede observar en la Figura 72; para este cálculo se utilizó la superficie de apoyo de la carga de 12 cm x12 cm.

Tabla 38

Datos de ensayo y medidas de la primera onda explosiva

Características Ensayo		Primera Onda								
N.-	ENSAYO	Sección (cm x cm)	F'c (kg/cm ²)	Explosivo (g)	Cuadro Inicial	Tiempo Inicial (us)	Cuadro Final	Tiempo Final (us)	ΔT (us)	ΔT (s)
2	E2.0 COL30X30-FC-210-1-CARGA	30 x 30	210	1140	20455	2045500	20457	2045700	200	2,00E-04

Fuente: (Zapata & Salazar, 2019)

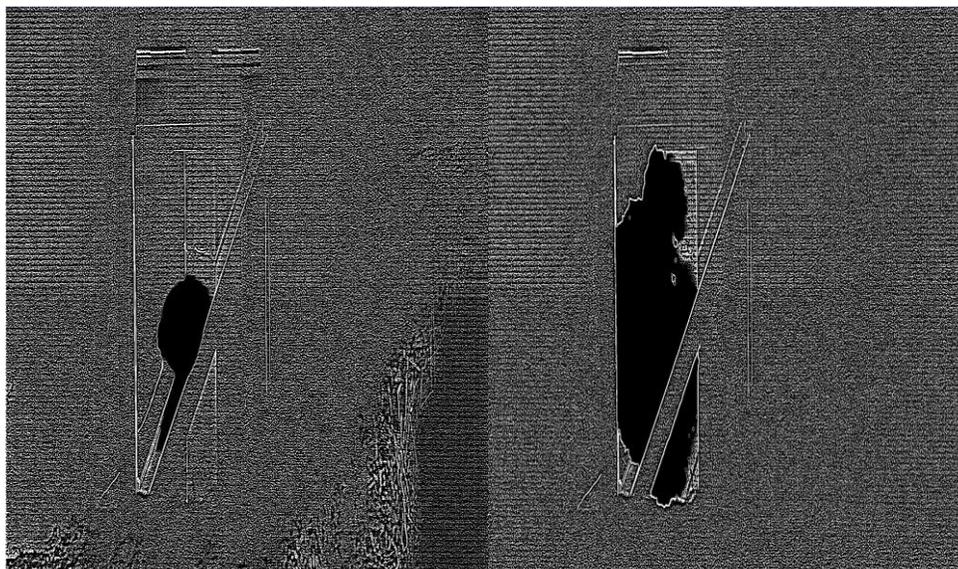


Figura 72. Variación de gases de la carga explosivo conformada
Fuente: (Zapata & Salazar, 2019)

La densidad adoptada para la pentolita es de 1700 kg/m^3 , la masa de una carga conformada es de 1.140 kg de pentolita.; para K se utilizó el valor de 1/4 es el factor de la velocidad de partícula que se utiliza para material rocoso y de hormigón armado; la velocidad de detonación (onda de explosiva o de choque) calculada es $2,31 \cdot 10^2 \text{ m/s}$. De esta manera obteniendo una presión de detonación (presión de incidencia máxima de la onde de choque) de 23MPa.

5.1.3 Presión de Incidencia por simulación computacional

Como parte del proyecto de investigación militar, (Tapia & Madrid, 2019) realizaron la simulación computacional del fenómeno de la detonación en columnas de hormigón armado con cargas explosivas conformadas de pentolita apoyadas sobre la columna de hormigón armado a media altura usando el programa LS-DYNA, estableciendo la presión de incidencia máxima bajo las mismas condiciones que se realizaron los ensayos experimentales obteniendo el siguiente resultado de 14 GPa, valor obtenido en el punto de detonación. En la Figura 73 se muestra la curva de presión de incidencia calculada por la simulación el programa LS-DYNA.

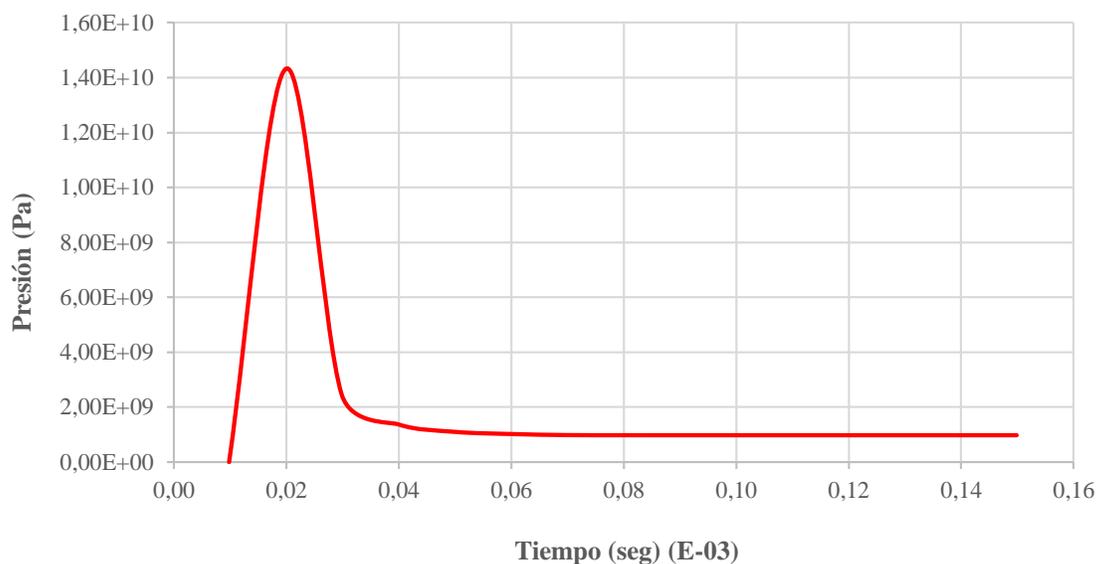


Figura 73. Presión de incidencia máxima calculada en la simulación computacional
Fuente: (Tapia & Madrid, 2019)

5.2 Criterios de falla de las probetas tipo columna

Para analizar el colapso de las probetas tipo columna de hormigón armado en esta investigación, se determinaron cuatro métodos de evaluación: 1) Deformación de los aceros de refuerzo, 2) Porcentaje de fragmentación del hormigón, 3) Carga crítica de pandeo por la longitud de exposición del acero, 4) Aplicación de los criterios de falla por Conrath.

5.2.1 Deformaciones de los aceros de refuerzo

Con el fin de establecer parámetros para estimar el fallo de las probetas tipo columna, en primera instancia se tomaron las medidas de las deformaciones del acero de refuerzo posterior a la detonación aplicando la metodología de medición que se muestra en las Figuras 52 y 55 del Capítulo IV del presente trabajo, determinando zona de fragmentación y detalle de las posiciones del acero de refuerzo de los diferentes armados de las columnas. Para luego estimaron porcentajes de deformación del acero de refuerzo, mediante la relación entre la medida tomada en los ensayos

y la sección de la columna para de esta manera determinar los rangos que permitan establecer la cantidad de explosivo para causar daño en la columna.

5.2.2 Fragmentación de las probetas tipo columna.

El segundo método empleado para la verificación de falla de las probetas se basó en la medición del porcentaje de fragmentación del hormigón que se produjo posterior a la explosión, dicha medición se la realizó tomando en cuenta a la longitud de exposición del acero y de allí estimando el volumen de hormigón que ha perdido comparando con la sección y el volumen de la columna antes de la detonación. La metodología de estimación se muestra en la Figura 74.

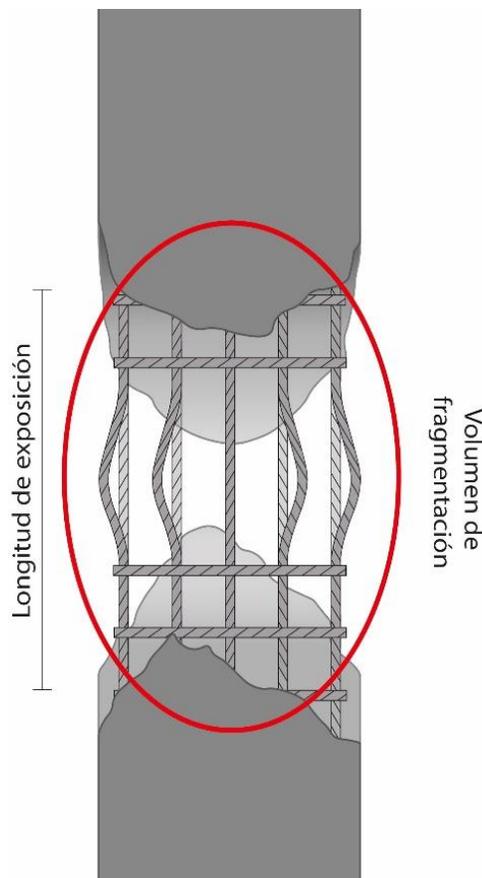


Figura 74. Estimación de la fragmentación del hormigón y medición de la longitud de exposición del acero.

Los porcentajes de fragmentación del hormigón en las probetas permiten la exposición del acero y están directamente relacionados entre sí a mayor porcentaje de fragmentación mayor será la longitud de exposición del acero.

5.2.3 Carga crítica de pandeo por la longitud de exposición del acero

Otro método para determinar el colapso de las probetas de hormigón armado se estableció modelos matemáticos que permitan demostrar que por la acción de la carga explosiva el daño realizado a la columna será la suficiente para que el elemento estructural pierda su capacidad de carga y falle por efecto de la gravedad, además tomando en consideración que el daño provocado no realice corte en los aceros de refuerzo, ya que el colapso esperado es de forma vertical.

Siguiendo el esquema del comportamiento de estructuras dañadas localmente por la explosión, la explosión no corta las varillas de refuerzo, sino que solo rompe el concreto (Luca, 2010). La tipología de colapso que se estimó para esta investigación es el caer en el propio lugar o que la estructura colapse por sí mismo, debido a que por lo general las edificaciones no tienen el suficiente espacio para permitir la caída lateral al encontrarse estructuras alrededor, esta técnica produce una menor fragmentación por la caída interior de los escombros (Luca, 2010).

Para verificar si un elemento estructural vertical puede colapsar por la carga crítica después de haberse aplicado cargas explosivas, se debe determinar la longitud de exposición de los aceros de refuerzo, esto se puede expresar mediante la Ecuación de Euler (3), que se detalló en el Capítulo II del presente trabajo para cargas críticas de pandeo y de esta manera determinar el porcentaje de fragmentación que se debe conseguir tras la explosión para provocar que el acero de refuerzo longitudinal entre en crisis con la carga axial aplicada en los ensayos experimentales.

(Fujikake & Aemlaor, 2013) menciona que la resistencia a la compresión de la columna después de ser detonada disminuye significativamente, ya que pierde área de hormigón y solamente las varillas de refuerzo longitudinal soportarán el esfuerzo a compresión al que están siendo sometidas. Dicha resistencia a la compresión post ensayo es la resistencia al pandeo considerando únicamente la longitud de exposición de las varillas y la relacionan mediante la Ecuación (28) de fuerza crítica por pandeo.

$$f_{cr} = \frac{\pi^2 * E_s * \phi_L^2}{4 * L_{exp}^2} \quad (25)$$

Donde, f_{cr} es la fuerza crítica de pandeo luego de la fragmentación del hormigón (kg/cm²); E_s el módulo de elasticidad del acero (kg/cm²); ϕ_L es el diámetro de cada tipo de varilla que se encuentra expuesta en el área fragmentada (cm); y L_{exp} es la longitud de exposición del acero de refuerzo en el área fragmentada (cm).

Por facilidad de interpretación, se calculó la carga crítica que puede soportar la columna antes que falle por pandeo utilizando la Ecuación de pandeo de Euler (3), que es aplicada para el área fragmentada de la columna por la carga explosiva, en el cual se empleó el módulo de elasticidad del acero, la longitud de exposición utilizando el método de medición como se muestra en la Figura 74 y la inercia de las varillas sin aplicar el teorema de Steiner ya que las varillas no cumplen con la teoría de concordancia, por lo que se asume que las varillas trabajan de forma independiente.

5.2.4 Criterio de falla de Conrath

El modelo de criterio de falla de (Conrath, E. et al., 1999), utiliza la Tabla 3 presentada en el Capítulo II del presente trabajo; en el cual las columnas expuestas a una carga dinámica lateral como la explosión, pueden sufrir fallas por flexión y corte directo, bajo estas condiciones despreciar

las deformaciones laterales excesivas, es por ello que la relación entre el acortamiento de la longitud con la altura de la columna toma en cuenta el efecto p-delta, los momentos secundarios generados por el efecto combinado de la carga axial y las flexiones laterales, basados en las extensiones de daño (Allahverdi, 2010).

En las estimaciones realizadas para calcular la carga crítica por pandeo se detalla las medidas tomadas en los ensayos experimentales de reducción de la altura de la columna, los cálculos de acortamiento entre la altura y la altura reducida, y la aplicación de los criterios de falla por los porcentajes y rangos establecidos.

CAPITULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis de la presión de incidencia máxima

En el Capítulo V de la presente investigación, se aplicaron modelos matemáticos para obtener las presiones de incidencia máxima de una carga explosiva pentolita (PENT 50% y TNT 50%), con dos tipos de condiciones:

- a) Como una carga esférica al aire libre y,
- b) Con una carga conformada cónica con las condiciones de borde apoyada a un elemento de hormigón armado.

Con los resultados obtenidos en los calculos de presión de incidencia teorica se determinó el peso equivalente de la carga conformada a TNT de 1.543 kg para la primera condición, dichos resultados se los grafica entre la Presión de Incidencia vs Distancia y se obtiene la curva que se muestra en la Figura 71. Ésta curva describe el comportamiento de la presión a diferente distancias medidas desde el punto de detonación, el valor máximo es de 12.3 MPa a una distancia de 0.3 m y posterior a eso decae considerablemente hasta que a partir de los 1.4 m la presión es menor a 1 kPa.

Para la segunda condición de cargas conformadas de 1140g se aplicaron dos metodos: el experimental que determinó la velocidad de onda de choque de $2,31 \cdot 10^2$ m/s y la simulación computacional determinada por la curva Presión de Incidencia vs Tiempo que se presenta en la Figura 73. En la Tabla 39 se muestra los resultados de las presiones de incidencia máxima o presiones de detonación de los diferentes métodos de cálculo.

Tabla 39
Presiones de Incidencia Máxima

DESCRIPCIÓN		MÉTODO DE CALCULO		
Condiciones	Distancia	Teórico	Experimental	Simulación
Primera condición (carga esférica-aire libre)	0.3 m	12.3 MPa		
Segunda condición (carga conformada-ensayos experimentales)	0.2m		23MPa	
	Punto detonación (0 m)			14 GPa

En los resultados obtenidos de las presiones de incidencia, el valor más alto es de 14 GPa analizado con la segunda condición y en el punto de detonación determinado en el Programa LS-DYNA.

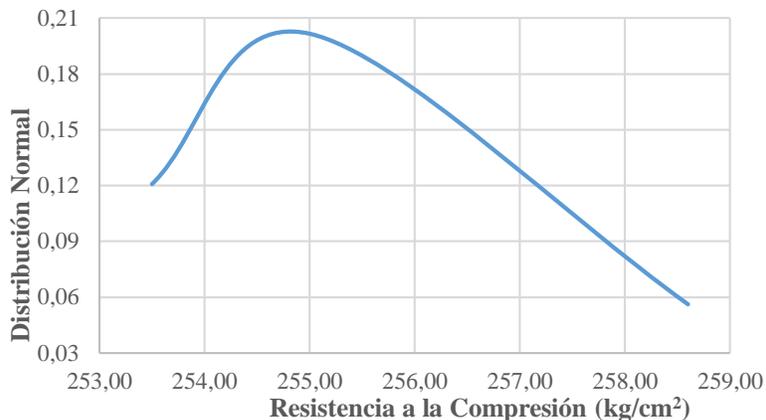
6.2 Análisis de las probetas tipo columna de hormigón armado

6.2.1 Análisis de la resistencia a la compresión de las columnas

Con los resultados obtenidos del primer ensayo de cilindros testigo de hormigón de la resistencia de 210 kg/cm^2 que se presentaron en las Tablas 16 y 19 del Capítulo III del presente trabajo, con un total de 6 cilindros ensayados, se obtuvo una resistencia media de 255.50 kg/cm^2 , ningún dato se repitió y según el análisis estadístico presentado en la Tabla 40, los resultados obtenidos del ensayo describen una curva de distribución asimétrica a la izquierda, dichos datos se encuentran agrupados en corto rango alrededor de la media, la desviación estándar representa que no existe una gran dispersión entre los datos obtenidos; por lo tanto, es correcto asumir la resistencia media como dato representativo del ensayo para posteriores comparaciones.

Tabla 40*Análisis de resultados de los cilindros testigo de 210 kg/cm²*

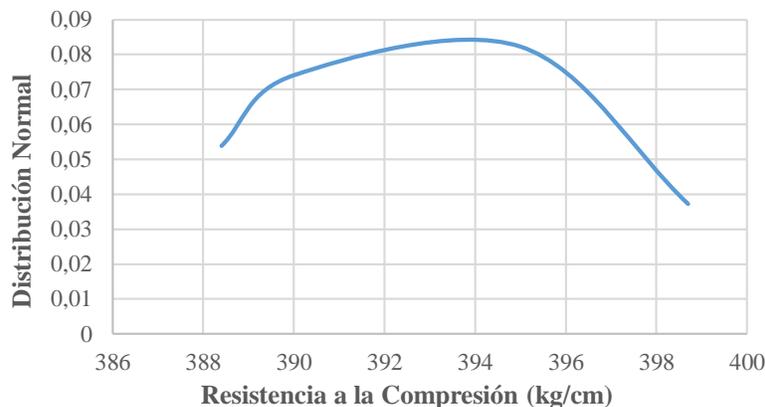
Resultados estadísticos, curva de distribución normal de datos	
Media	255,50
Mediana	255,10
Moda	Sin datos
Desviación estándar	1.91
Varianza de la muestra	3.66
Curtosis	2.20
Coefficiente de asimetría	1.25
Rango	5.10
Mínimo	253,50
Máximo	258,60
Cuenta	5,00



Del mismo modo, se analizó los datos obtenidos del ensayo de cilindros testigo para las probetas de 280 kg/cm² de resistencia, los resultados de los ensayos se presentaron en las Tablas 17, 18 y 20 del Capítulo III del presente trabajo, se analizaron un total de 9 cilindros. Con esos datos se procedió a realizar un análisis estadístico que se presentan en la Tabla 41 con el fin obtener un resultado representativo del ensayo. De la evaluación realizada se obtuvo que la resistencia media es 392.89 kg/cm², la resistencia que más se repitió (moda) fue de 393.50 kg/cm², la desviación estándar nos indica que no existe mucha dispersión entre los datos y finalmente el rango que se obtiene alrededor de la media no es muy amplio; por lo tanto, la resistencia media asumimos como la resistencia representativa.

Tabla 41*Análisis de resultados de los cilindros testigo de 280 kg/cm²*

Resultados estadísticos, curva de distribución normal de datos	
Media	392,89
Mediana	393,50
Moda	393,50
Desviación estándar	4.29
Varianza de la muestra	18.44
Curtosis	-1.37
Coefficiente de asimetría	0,29
Rango	10.30
Mínimo	388,40
Máximo	398,70
Cuenta	9,00

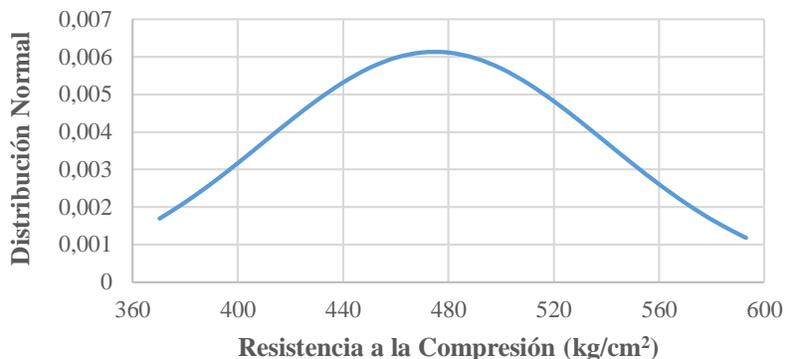


En los resultados obtenidos en el segundo ensayo con el esclerómetro de la resistencia del hormigón durante los ensayos con explosivos se presentan en la Tabla 33 perteneciente al Capítulo IV del presente trabajo, de dicha tabla se separaron los datos en base a las dos resistencias. Se realizó un análisis estadístico por separado de cada uno de los grupos de datos; por una parte, el análisis de las 21 probetas de hormigón de 280 kg/cm² de resistencia que se presenta en la Tabla 42. A partir de dicho análisis, podemos observar que los datos tienen una desviación estándar alta, por ende el rango en el que se encuentran separados los datos de la media es muy amplio, la resistencia media es de 474.88 kg/cm² que es muy cercano a la moda que fue de 473.88 kg/cm², en este caso tomando un criterio más conservador se asume como dato representativo a la moda.

Tabla 42

Análisis de resultados del ensayo con el uso del esclerómetro en probetas de 280 kg/cm²

Resultados estadísticos, curva de distribución normal de datos	
Media	474,88
Mediana	473,88
Moda	473,88
Desviación estándar	65,06
Varianza de la muestra	4232,98
Curtosis	-0,93
Coefficiente de asimetría	0,24
Rango	222,76
Mínimo	370,36
Máximo	593,12
Cuenta	19,00

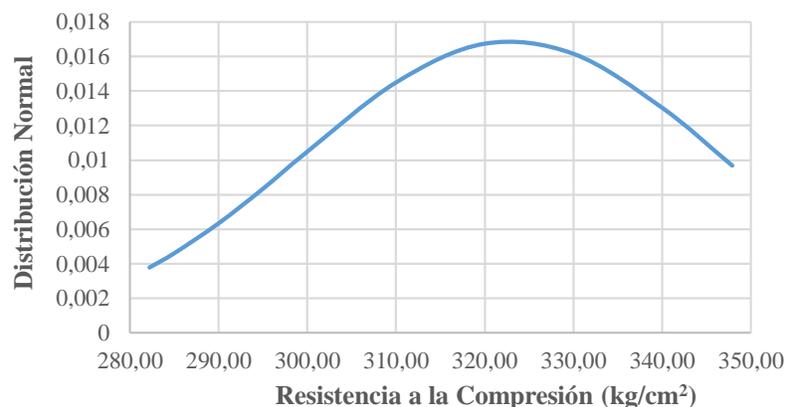


De igual manera, se realizó el análisis de 12 probetas de hormigón de 210 kg/cm² de resistencia, dicho análisis se lo presenta en la Tabla 43. La desviación estándar en este análisis es menor que el de las probetas de 280 kg/cm², el rango de dispersión de los datos sigue siendo amplio en relación a la media, la resistencia media fue de 323.04 kg/cm² y el valor de la moda fue de 347.93 kg/cm²; de igual manera se asume un criterio conservador para asumirlo como valor representativo.

Tabla 43

Análisis de resultados del ensayo con el uso del esclerómetro en probetas de 210 kg/cm²

Resultados estadísticos, curva de distribución normal de datos	
Media	323,04
Mediana	331,09
Moda	347,93
Desviación estándar	23,62
Varianza de la muestra	558,02
Curtosis	-1,04
Coefficiente de asimetría	-0,54
Rango	65,73
Mínimo	282,21
Máximo	347,93
Cuenta	10,00



Posterior a los ensayos con cargas explosivas se realizaron dos ensayos para analizar la resistencia a la compresión tales como: extracción de núcleos de hormigón y ensayo con esclerómetro. Los ensayos se realizaron en 5 probetas de diferentes secciones, los resultados de dichos ensayos se presentaron en la Tabla 35 del Capítulo IV del presente trabajo. De igual manera, se requiere obtener valores representativos de dichos ensayos, para lo cual se ha procedido a obtener un promedio ya que no se posee una fuente amplia de datos para poner analizar de otra forma, los resultados se presentan en la Tabla 44.

Tabla 44*Resultados de ensayos post detonación*

Núcleos de hormigón		Ensayo de esclerómetro	
<i>Resistencia de 210 kg/cm²</i>			
M1	186,20	M1	478,47
M3	198,00	M3	502,70
M5	189,40	M5	446,86
Promedio	191,20	Promedio	476,01
<i>Resistencia de 280 kg/cm²</i>			
M2	Ruptura de cilindro	M2	569,53
M4	370,30	M4	494,58
Promedio	370,30	Promedio	532,06

En la Tabla 44 se muestra los resultados del ensayo del esclerómetro en el cual, existe un aumento a la resistencia de diseño de 47 % y 12 % para 210 kg/cm² y 280 kg/cm² respectivamente, entre los ensayos realizados antes y después de la explosión. Finalmente, en la Figura 75 se presenta el resumen de las resistencias a la compresión representativas para los diferentes ensayos.

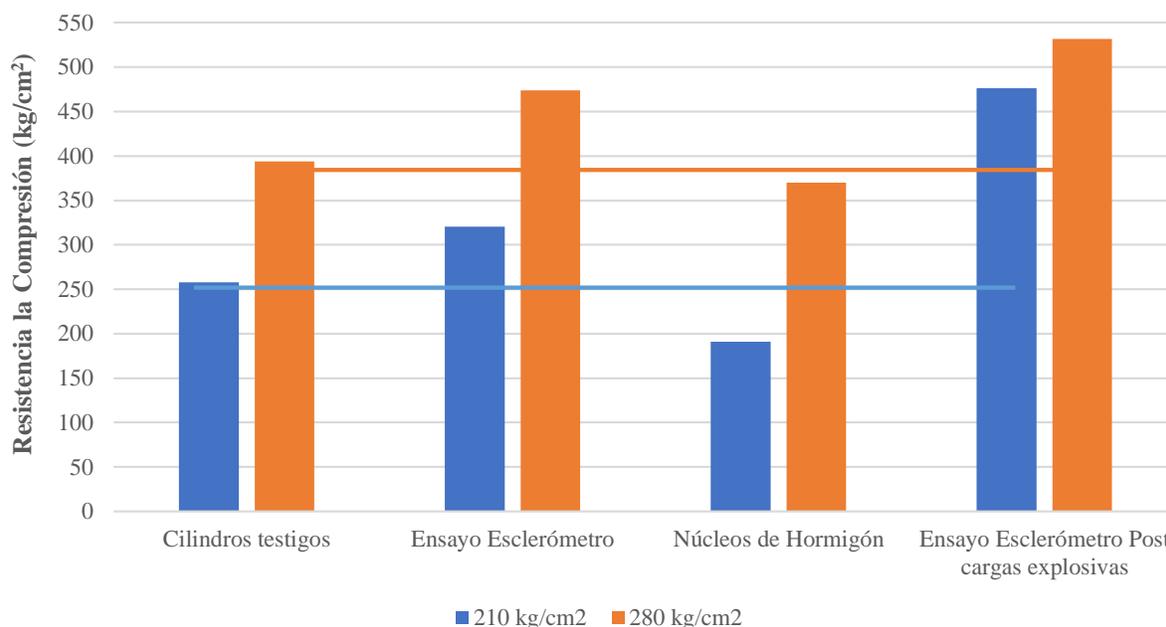


Figura 75. Resumen de ensayos de resistencia de hormigón

El promedio de la resistencia a la compresión de tres o más núcleos de hormigón puede ser menor a la de cilindros testigos hasta en un 15 % y un núcleo de hormigón podrá ser tomado en cuenta para dicho promedio si no alcanza una resistencia mínima de 75% de la resistencia original (Hincapié & Vidal, 2003), (Haro, 2014) y (NSR - 98, 1998). Para el presente proyecto la diferencia entre los núcleos de hormigón y los cilindros testigo es de 25 % para una resistencia de 210 kg/cm² y de 6 % para la resistencia de 280 kg/cm². Se debe considerar que la resistencia a la compresión que se analiza en los núcleos de hormigón es una resistencia que ya ha sido afectada por cargas explosivas.

Luego del análisis de resultados realizado de los diferentes ensayos la tendencia que presenta la Figura 75, para la resistencia a la compresión es de 250kg/cm² para las columnas que fueron diseñadas con un $f'c$ 210kg/cm²; y de 390 kg/cm² para las columnas que fueron diseñadas con un $f'c$ 280 kg/cm².

6.2.2 Análisis de las cargas axiales restantes

Tras la ejecución de los ensayos con cargas explosivas el 87% de las probetas fallaron a carga axial, este criterio se estimó en el campo debido a que se verificaba la carga axial que se aplicaba antes de ensayar la columna con explosivo y después de realizado el ensayo, se medía la diferencia entre la carga residual y la carga aplicada, finalmente se volvía aplicar carga axial a la columna y al no resistir la carga habría perdido su capacidad portante.

Los datos medidos de cargas axiales se presentaron en las Tablas 27, 28, 29, 30, 31 y 32; de dichas tablas podemos observar que un total de 16 probetas perdieron el 100% de su capacidad de carga tras la explosión, lo que representa el 52% de la muestra, el otro 48 % de la muestra se mantuvo en un rango de 93% a 13 % de capacidad portante. De igual manera se pudo observar que las columnas que perdían más del 40% de la carga axial tras la explosión, ya no podían llegar a soportar la carga aplicada inicialmente, por ende, son las que se considera que fallaron.

6.2.3 Análisis de las pruebas de tracción del acero

Como parte de la verificación de los materiales utilizados en el proceso constructivo de las probetas tipo columna, se realizó el análisis de la resistencia a la tracción de las varillas de acero; en la Tabla 6 presentada en el Capítulo III se detalla el resultado obtenido de dicho ensayo y se puede destacar que todas las muestras cumplieron con el límite de fluencia mínimo de 4200 kg/cm², dando como resultados en un rango de 4423.33 kg/cm² a 4827.04 kg/cm².

Se realizaron ensayos a la resistencia última y los resultados de dichos ensayos se los presentó en las Figuras 59, 60 y 61 del Capítulo IV del presente trabajo. Los resultados muestran que las varillas que más afectación tuvieron fueron las de menor diámetro, ya que estas varillas se

encontraban en elementos de menor calidad de hormigón y menor armado, se pudo observar que la falla no ocurrió en la zona de deformación y en promedio la resistencia entra dentro del mínimo establecido por la norma (NTE INEN 2167, 2011).

6.3 Análisis de los criterios de falla de las probetas tipo columna

6.3.1 Deformaciones de las probetas tipo columna

En las Tablas 27, 28, 29, 30, 31 y 32 se detallan las mediciones de las deformaciones del acero de las probetas tipo columna que fueron ensayadas con cargas explosivas, en la cual se puede observar deformaciones en el rango de 0,70cm a 20,5cm del acero de refuerzo central aplicando la metodología de medición que se muestra en la Figura 52 del Capítulo IV del presente trabajo, se analizó a esta varilla como la más crítica por la posición de la carga apoyada en la parte central de una cara de la columna.

De acuerdo a la metodología de cálculo presentada en el Capítulo V del presente trabajo, en la Tabla 45 se muestra los porcentajes de deformación del acero de refuerzo, los valores obtenidos están en el rango de 2,33% al 50%. Además, se puede observar que existió corte en las varillas centrales de 3 probetas, estos datos no serán tomados en cuenta para la investigación.

Tabla 45

Porcentajes de deformación del acero de refuerzo

Nº Ensayo	Dimensión de columna (cm)	Resistencia del hormigón (kg/cm ²)	Carga del explosivo (g)	Deformación del acero de refuerzo central (cm)	% de deformación
1	30X30	390	1140	8	26,67%
2	30X30	250	1140	9,5	31,67%
3	40X40	390	1140	4,9	12,25%
4	40X40	390	2280	7	17,50%
5	40X40	390	3420	15,5	38,75%
6	30X30	390	910	5	16,67%

Continúa...

7	30X30	390	450	2	6,67%
8	50X50	390	3420	12	24,00%
9	40X40	390	2280	7,3	18,25%
10	40X40	250	2280	9,1	22,75%
11	50X50	250	2510	6,5	13,00%
12	50X50	250	3420	16	32,00%
13	30X30	390	1140	5	16,67%
14	40X40	390	2280	0	corte
15	30X30	250	680	0,7	2,33%
16	30X30	390	1140	6	20,00%
17	50X50	390	2280	-	corte
18	50X50	390	3420	13,5	27,00%
19	30X30	250	1140	9	30,00%
20	40X40	250	2050	8	20,00%
21	50X50	390	3420	13,5	27,00%
22	40X40	250	2960	20	50,00%
23	50X50	390	3420	14	28,00%
24	40X40	390	2960	15	37,50%
25	30X30	390	1140	5,7	19,00%
26	50X50	250	2730	9	18,00%
27	50X50	390	2960	8,4	16,80%
28	40X40	390	2280	-	corte
29	50X50	250	2280	5,4	10,80%
30	30X30	250	1140	5,8	19,33%
31	40X40	250	1820	9,5	23,75%
32	30X30	390	1590	9,4	31,33%
33	50X50	390	4560	20,5	41,00%

6.3.2 Análisis de la fragmentación del hormigón.

De acuerdo a la metodología de medición del volumen de fragmentación del hormigón, en la Tabla 46 se expresa los porcentajes de fragmentación del hormigón estimado en campo una vez detonada la carga explosiva, encontrando valores en el rango del 10% al 100%, datos obtenidos de las 33 probetas tipo columnas analizadas, además se puede determinar que 26 probetas se encuentran en el rango del 40% al 80% de fragmentación.

Tabla 46*Mediciones de longitud de exposición y fragmentación*

Ord.	Dimensión de probetas tipo columna (cm)	Resistencia del hormigón (kg/cm ²)	Carga del explosivo (g)	Fragmentación
1	30X30	390	1140	60,00%
2	30X30	250	1140	90,00%
3	40X40	390	1140	30,00%
4	40X40	390	2280	50,00%
5	40X40	390	3420	80,00%
6	30X30	390	910	70,00%
7	30X30	390	450	80,00%
8	50X50	390	3420	70,00%
9	40X40	390	2280	60,00%
10	40X40	250	2280	60,00%
11	50X50	250	2510	70,00%
12	50X50	250	3420	30,00%
13	30X30	390	1140	50,00%
14	40X40	390	2280	90,00%
15	30X30	250	680	10,00%
16	30X30	390	1140	80,00%
17	50X50	390	2280	80,00%
18	50X50	390	3420	20,00%
19	30X30	250	1140	80,00%
20	40X40	250	2050	70,00%
21	50X50	390	3420	70,00%
22	40X40	250	2960	100,00%
23	50X50	390	3420	60,00%
24	40X40	390	2960	60,00%
25	30X30	390	1140	80,00%
26	50X50	250	2730	50,00%
27	50X50	390	2960	40,00%
28	40X40	390	2280	60,00%
29	50X50	250	2280	40,00%
30	30X30	250	1140	40,00%
31	40X40	250	1820	60,00%
32	30X30	390	1590	80,00%
33	50X50	390	4560	80,00%

6.3.3 Análisis de carga crítica de pandeo del área fragmentada.

Aplicando la metodología del Capítulo V del presente trabajo, para expresar la carga crítica de pandeo que toma en cuenta la longitud de exposición del acero. En la Tabla 47 se detallan las mediciones de la longitud de exposición del acero tomadas en los ensayos experimentales y la carga crítica de pandeo calculada en base a los aceros expuestos luego de la detonación.

Tabla 47

Cálculo de la carga crítica por pandeo del área fragmentada

Dimensión de columna	f'c real	Carga del explosivo	Longitud exposición (cm)	Es (kg/cm ²)	P crítico (ton)
30X30	390	1140	69	2100000	8,89
30X30	250	1140	98	2100000	4,40
40X40	390	1140	50	2100000	25,01
40X40	390	2280	69	2100000	13,13
40X40	390	3420	90	2100000	7,72
30X30	390	910	56	2100000	13,49
30X30	390	450	53	2100000	15,06
50X50	390	3420	96	2100000	18,54
40X40	390	2280	69	2100000	13,13
40X40	250	2280	60	2100000	17,37
50X50	250	2510	88	2100000	22,07
50X50	250	3420	110	2100000	14,12
30X30	390	1140	57	2100000	13,02
40X40	390	2280	72	2100000	12,06
30X30	250	680	40	2100000	26,44
30X30	390	1140	66	2100000	9,71
50X50	390	2280	90	2100000	21,10
50X50	390	3420	97	2100000	18,16
30X30	250	1140	69,5	2100000	8,76
40X40	250	2050	71	2100000	12,41
50X50	390	3420	99	2100000	17,44
40X40	250	2960	87	2100000	8,26
50X50	390	3420	105	2100000	15,50
40X40	390	2960	77	2100000	10,55
30X30	390	1140	59	2100000	12,15
50X50	250	2730	96	2100000	18,54
50X50	390	2960	92	2100000	20,19
40X40	390	2280	80	2100000	9,77
50X50	250	2280	87	2100000	22,58
30X30	250	1140	61	2100000	11,37

Continúa...

40X40	250	1820	72	2100000	12,06
30X30	390	1590	72	2100000	8,16
50X50	390	4560	104	2100000	15,80

En los resultados que se presentan en la Tabla 47, se determinó que la capacidad de carga disminuye significativamente en un rango del 75% al 95,6%, además que se encuentra por debajo de la carga axial (40, 50 y 70ton) aplicada para los ensayos. Los rangos de carga crítica de pandeo para la zona afectada luego de la detonación de las 33 probetas van del 4,40 al 26,44 ton.

6.3.4 Análisis del Criterio de falla de Conrath

En la Tabla 48 se detalla las medidas tomadas en los ensayos experimentales de reducción de la altura de la columna, los cálculos de acortamiento entre la altura y la altura reducida, y la aplicación de los criterios de falla por los porcentajes y rangos establecidos.

Tabla 48

Aplicación de los criterios de falla de Conrath

Ensayo N°	Datos del ensayo					Criterio de falla Conrath		
	Dimensión de columna	f _c kg/cm ²	Altura (m)	Altura reducida (m)	Acortamiento (m)	Acortamiento /altura	Daño	
							%	Rango
1	30X30	390	2,5	2,472	0,028	0,0112	1,12	Moderado
2	30X30	250	2,5	2,38	0,12	0,048	4,8	Fuera de rango
3	40X40	390	2,5	2,483	0,017	0,0068	0,68	Ligero
4	40X40	390	2,5	2,47	0,03	0,012	1,2	Moderado
5	40X40	390	2,5	2,485	0,015	0,006	0,6	Ligero
6	30X30	390	2,5	2,474	0,026	0,0104	1,04	Moderado
7	30X30	390	2,5	2,482	0,018	0,0072	0,72	Ligero
8	50X50	390	2,5	2,453	0,047	0,0188	1,88	Moderado
9	40X40	390	2,5	2,471	0,029	0,0116	1,16	Moderado
10	40X40	250	2,5	2,468	0,032	0,0128	1,28	Moderado
11	50X50	250	2,5	2,472	0,028	0,0112	1,12	Moderado
12	50X50	250	2,5	2,483	0,017	0,0068	0,68	Ligero
13	30X30	390	2,5	2,473	0,027	0,0108	1,08	Moderado
14	40X40	390	2,5	2,395	0,105	0,042	4,2	Fuera de rango
15	30X30	250	2,5	2,467	0,033	0,0132	1,32	Moderado
16	30X30	390	2,5	2,464	0,036	0,0144	1,44	Moderado
17	50X50	390	2,5	2,485	0,015	0,006	0,6	Ligero

Continúa...

18	50X50	390	2,5	2,465	0,035	0,014	1,4	Moderado
19	30X30	250	2,5	2,495	0,005	0,002	0,2	Ligero
20	40X40	250	2,5	2,462	0,038	0,0152	1,52	Moderado
21	50X50	390	2,5	2,449	0,051	0,0204	2,04	Severo
22	40X40	250	2,5	2,13	0,37	0,148	14,8	Fuera de rango
23	50X50	390	2,5	2,468	0,032	0,0128	1,28	Moderado
24	40X40	390	2,5	2,49	0,01	0,004	0,4	Ligero
25	30X30	390	2,5	2,46	0,04	0,016	1,6	Moderado
26	50X50	250	2,5	2,465	0,035	0,014	1,4	Moderado
27	50X50	390	2,5	2,462	0,038	0,0152	1,52	Moderado
28	40X40	390	2,5	2,475	0,025	0,01	1	Ligero
29	50X50	250	2,5	2,468	0,032	0,0128	1,28	Moderado
30	30X30	250	2,5	2,487	0,013	0,0052	0,52	Ligero
31	40X40	250	2,5	2,47	0,03	0,012	1,2	Moderado
32	30X30	390	2,5	2,48	0,02	0,008	0,8	Ligero
33	50X50	390	2,5	2,422	0,078	0,0312	3,12	Severo

En los resultados obtenidos en la Tabla 48, se puede determinar que los porcentajes del criterio de falla medidos de las 33 probetas varían entre el 0,2% al 14,8%, de los cuales 3 probetas se encuentran fuera de los rangos establecidos por los criterios de falla de Conrath, 10 probetas en el rango de daño ligero (>1%), 18 probetas en el rango de daño de moderado (1-2%) y 2 probetas en el rango de daño severo (2-4%). La tendencia de los resultados de las probetas evaluadas es de daño moderado.

6.4 Curvas de daño por impacto con cargas explosivas en elementos de hormigón.

Para establecer las probetas tipo columna de hormigón armado que colapsaron, se determinaron cuatro métodos de evaluación: deformación de los aceros de refuerzo, fragmentación del hormigón, carga crítica de pandeo del área fragmentada y aplicación de los criterios de falla por Conrath. En la Tabla 49 se detalla las probetas que fallaron por los métodos aplicados.

Tabla 49*Criterios de falla de probetas tipo columna de hormigón armado*

Nº ensayo	Carga explosiva (g)	Long. Exposición (cm)	Deformación (%)	Fragmentación (%)	Conrath (Criterio de falla)	P crítica (Ton)
15	680,00	40	2,33%	10,00%	Moderado	26,44
6	910,00	56	16,67%	70,00%	Moderado	13,49
16	1140,00	66	20,00%	80,00%	Moderado	9,71
31	1820,00	72	23,75%	60,00%	Moderado	12,06
20	2050,00	71	20,00%	70,00%	Moderado	12,41
9	2280,00	69	18,25%	60,00%	Moderado	13,13
11	2510,00	88	13,00%	70,00%	Moderado	22,07
26	2730,00	96	18,00%	50,00%	Moderado	18,54
27	2960,00	92	16,80%	40,00%	Moderado	20,19
8	3420,00	96	24,00%	70,00%	Moderado	18,54

Para relacionar la carga explosiva óptima de la Tabla 49 con la resistencia a la compresión del elemento y la sección transversal, se decidió encontrar un coeficiente de hormigón que relacione la resistencia a la compresión con la sección transversal, dicho coeficiente se lo calculó aplicando la Ecuación (29).

$$ch = \frac{0.79 * \sqrt{f'c}}{4200} * s^2 \quad [cm^2] \quad (26)$$

Donde, ch es un coeficiente de hormigón que relaciona la resistencia del hormigón con la sección del elemento (cm^2); $f'c$ es la resistencia a la compresión del hormigón (kg/cm^2); y s es la sección del elemento de hormigón armado (cm).

En el análisis de los resultados obtenidos en la Tabla 49, se determinó que 10 probetas tipo columna cumplieron con los cuatro métodos analizados de colapso, probetas en las cuales todas se encuentran en el rango de daño moderado, la fragmentación se encuentra en un rango del 40 al 80%, la longitud de exposición entre 40 a 96cm, deformaciones entre el 16,67 y 24% y la carga

crítica de pandeo en el rango de 9,71 a 26,44ton. En la probeta del ensayo 15 su porcentaje de deformación es del 2,33% que se encuentra fuera del rango de las columnas analizadas.

Finalmente, se construyó la curva de daño por impacto de la carga explosiva (carga cónica de pentolita) vs coeficiente de hormigón que se presenta en la Figura 76 y la ecuación que describe a dicha curva es la Ecuación (30).

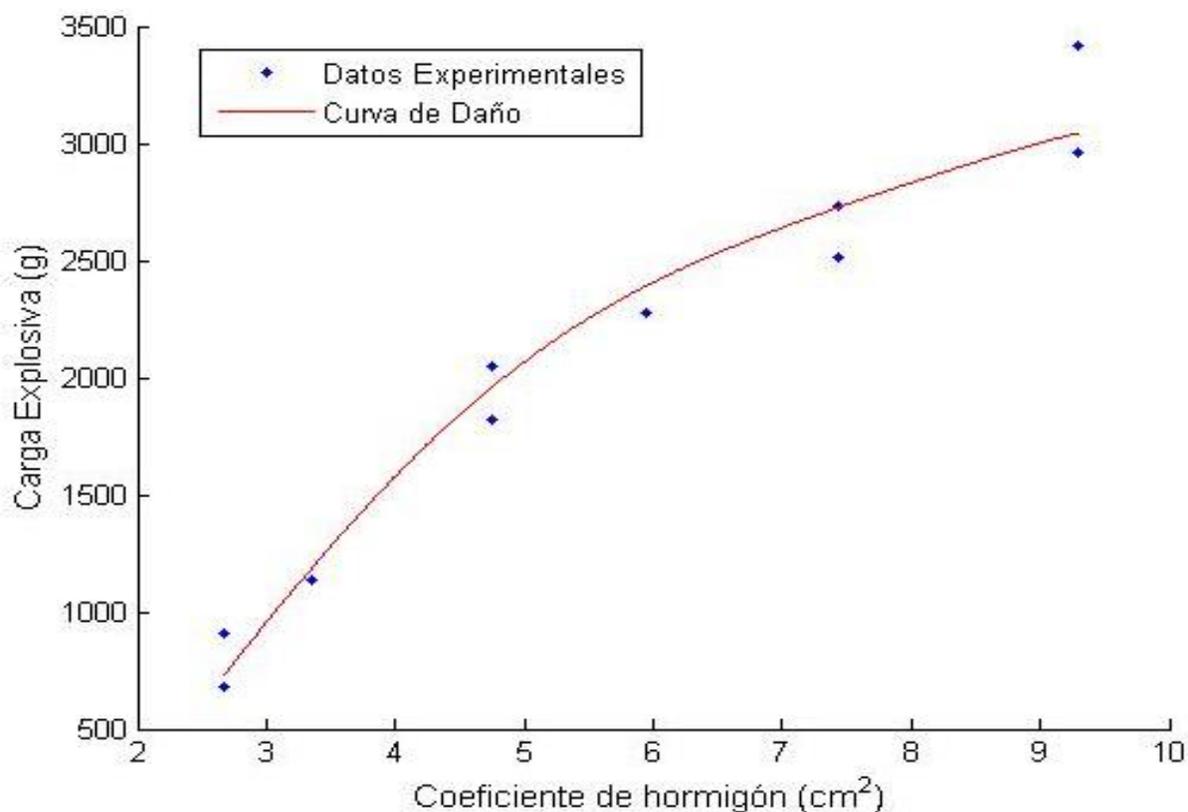


Figura 76. Curva de daño por impacto por cargas explosivas en elementos de hormigón

$$Q_{PENT} = 70.44 * \sin(ch - \pi) - 42.99 * (ch - 10)^2 + 3073 \quad [g] \quad (27)$$

Donde, Q_{PENT} es la cantidad de explosivo pentolita necesaria para la demolición del elemento (g); y ch es un coeficiente de hormigón que relaciona la resistencia del hormigón con la sección del elemento (cm²).

El coeficiente de determinación (R^2) de la curva de daño es 0.964, al ser dicho coeficiente cercano a 1 nos indica que el modelo de regresión es adecuado para describir la relación que existe entre la cantidad de explosivo (variable dependiente) y el coeficiente de hormigón (variable independiente).

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Se evaluó el proceso constructivo de las 33 probetas tipo columna de hormigón armado las cuales cumplieron con sus especificaciones de diseño principales de 2,5m de altura, 1,5% de cuantía, diferente sección transversal (30 cm x 30 cm, 40 cm x 40 cm, 50 cm x 50 cm), armado longitudinal transversal y estribos de acuerdo a los planos; y con la caracterización de los agregados y demás especificaciones para la dosificación del hormigón de acuerdo al método del ACI 211, para obtener resistencias de diseño de 210 y 280 kg/cm².
- En lo referente a los dos tipos de resistencia a la compresión de 210 y 280 kg/cm², existe una variación del 21% y del 40% en cada resistencia respectivamente en los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión del hormigón de los cilindros testigos, luego de obtener los análisis estadísticos de los ensayos se obtuvo que la resistencia media llegó a valores de 255,50 y 392,89 kg/cm² asumiendo estos valores debido a que la dispersión en sus datos es mínima por su desviación estándar, concluyendo que estos valores son las resistencias representativas para el primer análisis del tipo de resistencia a la compresión que se utilizó en la investigación.
- En los ensayos con esclerómetro para determinar la resistencia del hormigón de 21 probetas ensayadas se obtuvo una resistencia de 473,88 kg/cm², tomando como dato representativo a la moda debido a la alta desviación estándar y de 12 probetas se obtuvo una resistencia de 347,93 kg/cm² siendo la moda el dato más representativo por su alta desviación estándar. Se puede determinar que los datos obtenidos con el esclerómetro antes de ejecutar el ensayo no son

confiables por su análisis estadístico muy disperso y por detalles como la calibración del esclerómetro.

- En los post-ensayos realizados para obtener la resistencia del hormigón y corroborar los resultados con los ensayos realizados antes de las detonaciones, se ejecutó la extracción de los núcleos de hormigón obteniendo una resistencia de 192,20 kg/cm² para las probetas de diseño inicial de 210kg/cm² y de 370,30kg/cm² para las probetas de diseño inicial de 280kg/cm². Con los datos obtenidos se puede determinar que los resultados obtenidos en los núcleos de hormigón presentan alta confiabilidad debido a que cumplen el porcentaje mínimo de resistencia del 75% con respecto a los resultados obtenidos en los cilindros testigos de hormigón.
- Además, en los post-ensayos se ejecutaron ensayos con el esclerómetro en las probetas analizadas para las resistencias de diseño iniciales de 210 y 280 kg/cm², obteniendo resultados de 476,01 y 532,06 kg/cm² respectivamente. Determinando que los datos obtenidos son mayores en 110% a la resistencia de diseño y 47% a la resistencia de los cilindros testigos de hormigón. Las resistencias obtenidas con el esclerómetro antes y después de las detonaciones y las altas variaciones se deben a varias razones entre ellas las siguientes:
 - La primera razón es debido a que los ensayos se realizaron utilizando dos esclerómetros diferentes entre las pruebas realizadas antes y después de ser detonadas las probetas, dichos esclerómetros tienen diferentes curvas de ajuste para obtener los resultados.
 - La segunda razón es debido a la dirección de golpe con la que se realizó cada uno de los ensayos, en el primer ensayo las columnas se encontraban colocadas en sentido vertical, por tal motivo el golpe se realizó en sentido horizontal; en el segundo ensayo las columnas se encontraban apoyadas horizontalmente en el suelo, por tal motivo el golpe se ejecutó

de forma vertical. Finalmente se puede también añadir que el ensayo con esclerómetro brinda una resistencia aproximada a la compresión, el ensayo por su naturaleza no es muy exacto debido a que intervienen diferentes factores que salen de las manos de los ensayistas, es por esta razón se justifica la diferencia entre los resultados de 47 % y 12 % para las resistencias de 210 kg/cm² y 280 kg/cm² respectivamente, entre los ensayos realizados antes y después de la explosión.

- Una vez analizados todos los resultados de los ensayos para la resistencia del hormigón, se determinó que los datos de los cilindros testigos y los núcleos de hormigón tienen relación y cumplen tanto en sus normativas como en sus análisis estadísticos, siendo estos datos los más confiables y descartando los datos obtenidos con el esclerómetro por su dispersión y su alta variación con respecto a la resistencia de diseño y resultados de los otros ensayos. Estableciendo una tendencia de resistencia a la compresión de 250kg/cm² para el diseño inicial de 210 kg/cm² y 390 kg/cm² para el diseño inicial de 280 kg/cm², concluyendo que una de las razones para esta variación es por el asentamiento debido que para la dosificación del hormigón se solicitaba de 8 a 9cm y en obra se obtuvo asentamientos de 6 a 7cm, de esta manera se justifica el aumento de la resistencia a la compresión.
- Para el análisis de los resultados de los ensayos experimentales con explosivos de la presente investigación se adoptó la siguiente resistencia del hormigón $f'_c = 250$ y 390 kg/cm², basado en lo expuesto en la conclusión anterior.
- En lo referente al acero de refuerzo la evaluación realizada en la construcción se cumplió con las especificaciones técnicas del material y en los ensayos a tracción cumplió con el límite mínimo de fluencia de 4200kg/cm² en porcentajes mayores entre 9,3% y 14,9%. Además, se cumplieron con los requerimientos de las placas de acero, ganchos de transporte y pernos de

ajuste establecidos en los planos de diseño, materiales usados para la colocación de la columna en la máquina de ensayos a carga axial.

- Se establecieron protocolos e instructivos para los ensayos experimentales que fueron ejecutados en el polígono de demoliciones del DEPCOR “El Corazón”, antes, durante y después de las operaciones con explosivos se cumplieron con las normas de seguridad establecidas para el material, equipo y personal obteniendo como resultado final cero accidentes.
- Para establecer las zonas de seguridad de los protocolos de ensayo se aplicaron métodos empíricos, correlaciones experimentales y manuales técnicos para la carga conformada de pentolita realizada la conversión a TNT donde se estableció tres posiciones de 30m para equipo filmográfico, 125m para explosivitas y 300m para el personal investigador, con las distancias establecidas se determinaron zonas de fragmentación y posiciones de seguridad libres de accidentes.
- Se ejecutaron 33 ensayos experimentales de las columnas de hormigón armado con explosivos, cumpliendo con todos los requerimientos para esta investigación; ajustando la columna a la máquina de ensayos a compresión (condición de empotramiento), colocando carga axial (40, 50 y 70 ton) y la aplicación de cargas conformadas de pentolita colocadas a media altura de la probeta, se variaron cantidades para determinar los efectos del explosivo en el hormigón.
- Una vez aplicados los diferentes modelos matemáticos para la presión de incidencia máxima de la carga cónica conformada de 1140g, se determinó que los valores obtenidos de 14Gpa en la simulación, es el valor que vamos asumir para este tipo de cargas explosivas, ya que el análisis en el método antes mencionado se lo realizó en el punto de detonación siendo este el pico más alto en la presión de incidencia, que nos permitirá a futuro determinar las distancias

de fragmentación, ondas de vibración y sonido para evitar la afectación a otras infraestructuras al momento de una demolición controlada.

- Para los ensayos experimentales se utilizó las cargas conformadas de explosivo pentolita de geometría cónica de 450g y diédrica de 230g, determinando en las operaciones que los efectos de la onda tienen relación a las geometrías al estar apoyadas en el elemento de hormigón, la carga diédrica pierde su característica de corte (debe tener stand-off) y su función en la carga conforma es el de aumentar el efecto destructivo, siendo la geometría que predomina en la detonación la carga cónica. Es por ello que la cantidad de explosivo a la que se refiere esta investigación es a cargas conformadas (cónicas) de pentolita, así como la presión de incidencia asumida en la conclusión anterior.
- En la recolección de datos de los ensayos posterior a la detonación se analizaron las cargas axiales restantes, pruebas de tracción del acero, deformaciones de los aceros, fragmentación del hormigón, carga crítica de pandeo y acortamiento de la altura de las probetas tipo columna con esta información se evaluó el nivel de daño de las columnas que por medio de una observación directa se determinó que los ensayos existió pérdida de masa, fragmentación y pandeo de las columnas para el fallo de las probetas.
- Se realizaron los ensayos a tracción del acero de 18 muestras obteniendo una resistencia a la rotura de 5500kg/cm^2 valor por encima del límite establecido de esta forma determinando que el acero se deforme, pero no cambio en sus propiedades mecánicas. Concluyendo que el acero como material no tuvo ningún daño en su composición.
- Luego de la detonación se analizó que las cargas axiales aplicadas por el sistema hidráulico a las columnas se redujeron en un 40% o más, esto determinó que la probeta ya no pueda soportar nuevamente la carga inicial lo que significa que la columna perdió su capacidad portante.

- En el análisis de las deformaciones del acero de refuerzo se determinó porcentajes entre la medición de deformaciones del acero y la sección de las columnas para establecer valores en los cuales el acero quede expuesto a recibir carga axial y su capacidad portante disminuya, asumiendo el rango de 16,67% hasta 28% valores significativos que muestran el daño de deformación del acero se necesitó para que unido a otros factores falle el elemento de hormigón.
- Uno de los parámetros más importantes al momento del análisis de fallo de un elemento de hormigón es su fragmentación estableciendo en los ensayos los valores más representativos entre el 40% y 100%, porcentajes que junto a otros parámetros se determinó el colapso de las columnas.
- Al obtener la longitud de exposición del acero medido en las probetas ensayadas se determinó aplicar métodos empíricos para expresar la carga crítica de pandeo de las varillas de acero del área fragmentada de la columna, esta metodología nos permitió determinar que la capacidad de carga de la probeta disminuyó entre un 75% y 95,6% dato fundamental para establecer que columnas colapsaron.
- En los ensayos experimentales se realizaron las mediciones de la longitud de la columna luego de la detonación, determinando que sufrieron acortamiento debido al pandeo, con estos datos se aplicaron los criterios de Conrath para evaluar el daño estableciendo que las columnas que se encuentran en los rangos de moderado y severo junto a otros parámetros provocaran su colapso. Además, cabe mencionar que las probetas que se encuentran en su porcentaje de daño mayor al rango severo (2-4%), se descartaron para las curvas de diseño por impacto ya que sus aceros de refuerzo sufrieron corte y elemento estructural tiene a una caída lateral.

- Para establecer con exactitud las probetas que colapsaron se analizaron los cuatro criterios determinando los siguientes rangos: rangos de daño de Conrath mediano, longitud de exposición 40 a 96cm y su capacidad de carga crítica de pandeo que está dada entre 9,71 a 26,44 ton, porcentaje de fragmentación 40% a 80% y la deformación del acero que está dentro de los porcentajes de 2,33% a 24%. De las 33 probetas ensayadas, 10 cumplieron con los rangos antes mencionados, concluyendo que dichas muestras fallaron por carga axial, las mismas que colapsaran provocando la caída vertical del elemento de hormigón causando el efecto deseado en la investigación.
- Para determinar el resultado final se buscaron variables que permitan relacionar las especificaciones del hormigón en un solo coeficiente, en la investigación se encontró la expresión que contiene a la sección transversal y a la resistencia del hormigón para relacionar con la cantidad de explosivo tomando en cuenta las probetas que fallaron, construyendo de esta manera la curva de daño por impacto. Mencionada curva se encuentra descrita por una ecuación que permitirá evaluar con cualquier especificación del hormigón la cantidad de explosivo que se requiere para el colapso de una columna a escala real. Por los datos obtenidos en experimentación, los análisis de criterios de falla y el coeficiente de determinación cercano al 1 se puede concluir que la curva de daño por impacto con cargas explosivas es confiable en un 97%.
- Los resultados presentados en esta investigación por los análisis realizados permitirán establecer los parámetros de daño por cargas explosivas apoyadas (no confinadas) en elementos de hormigón tipo columna para su colapso y que como parte de una estructura por su carga axial fallen en caída vertical produciendo de esta forma una demolición controlada de estructuras. Esta investigación es la base para incursionar en las demoliciones controladas de

estructuras, además que el uso de las curvas de daño será de utilidad para las operaciones militares en el cumplimiento de las misiones de movilidad, contra movilidad, ingeniería en general y supervivencia y apoyo a la gestión de riesgo.

7.2 Recomendaciones

- Para obtener en la experimentación las mismas condiciones de diseño, se deben realizar varios ajustes en el transcurso de la construcción de los elementos de hormigón como en el análisis de los agregados y los contenidos de humedad para de esta manera controlar que las especificaciones iniciales de la investigación se mantengan durante la ejecución de las fases experimentales. Es importante que para este tipo de investigación que se utilizaron placas y varillas de anclaje a las columnas, se debe realizar el diseño de los cordones de suelda de unión entre placas y varillas para que no falle al momento de la detonación y se pierda la condición de empotramiento que se determinó para la investigación.
- Realizar el rediseño de la Máquina de ensayos destructivos a compresión debido a que durante los ensayos experimentales los cordones de suelda fallaron en las placas superiores donde se ajusta la columna, cabe mencionar que el esfuerzo que resistió la máquina fue de 56740g de explosivo pentolita con una presión aproximada de 697GPa. Además, se debe tomar en cuenta el mejoramiento del sistema de carga axial por inyectores de presión continua, para que esta carga se mantenga luego de la detonación y se pueda observar el momento de colapso de la columna.
- El uso de equipos de medición con mayor precisión para la toma de datos de deformaciones y volúmenes de fragmentación de las probetas detonadas en el momento de los ensayos experimentales.

- Con los resultados obtenidos en esta investigación para elementos de hormigón armado (columnas) es la base para continuar con el estudio de las demoliciones controladas de estructuras, utilizando cargas apoyadas (no confinadas) aplicadas a columnas en condiciones óptimas. Es importante continuar con la experimentación de cargas confinadas para verificar su efecto y daño en los elementos estructurales (vigas, columnas, muros) y de esta manera culminar con la detonación controlada de edificaciones en caída vertical.
- La importancia que la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE promuevan investigaciones de impacto que estimulen a sus estudiantes a buscar proyectos con nuevas técnicas y métodos científicos aplicados a la Seguridad y Defensa, Estructuras y Construcciones, con el fin de ser implementados en operaciones militares, apoyo a la gestión de riesgos y en la organización urbanística mediante las demoliciones controladas, cumple con el aporte fundamental de la academia al país para mejorar su estilo de vida y el ahorro de recursos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 211. (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009)*.
- ACI 318S - 11. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. C. 318, Ed.
- Allahverdi, N. (2010). *Coupled simulation of loading and response of columns under extreme events*. New Jersey: Faculty of New Jersey Institute of Technology.
- American Society of Civil Engineers. (2011). *Blast Protection of Building's*. Virginia: Library of Congress.
- Army, D. o. (2007). *Explosives and Demolitions*. Washington, DC: Army USA.
- Army, U. S. (1990). Technical Manual (5-1300). *Structures to resist the effects of accidental explosions*. Washington, Washington, DC, United State of America: U.S. Government.
- Army, U. S. (1992). Field Manual (5-250). *Explosives and demolitions*. Washington, Washington, DC, United State of America: U.S. Government.
- Astarlioglu, S., Krauthammer, T., Morency, D., & Tran, T. (2013). Behavior of reinforced concrete columns under combined effects of axial and blast-induced transverse loads. *Engineering Structures*, 26-34.
- ASTM C128. (2004). *Historical Standard: Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos*.
- ASTM C136 / C136M. (2014). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- ASTM C29 - C29M. (2007). *Historical Standard: Método de ensaye estándar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de huecos en los agregados*.
- ASTM C39/ C39M - 12. (2012). *Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*.
- ASTM C42. (2012). *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*. United States: Department of Defense.
- ASTM C566 - 97. (2004). *Historical Standard: Estándar Método de ensayo para medir el contenido total de humedad en agregados mediante secado*.
- ASTM C805. (2018). *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*.
- Berta, G. (1996). *L'Esplosivo Strumento di Lavoro*. Milano: La Moderna.

- Brode, H. (1955). Numerical Solution of Spherical Blast Wave. *Journal of Applied Physics*.
- Cazau, P. (2006). *Introducción a la investigación en ciencias sociales* (Tercera ed.). Buenos Aires, Argentina.
- CEDE. (2015). Manual MI3-TASE1-02. *Conducción Militar*. Quito, Pichincha, Ecuador: Comando de Educación y Doctrina (Ejército - Ecuatoriano).
- Conrath, E. et al. (1999). Structural Design for Physical Security. *State of the Practice report, (Conrath, E.J., Krauthammer, T., Marchand, K., A., Mlakar, P., F. and Structural Engineering Institute)*. Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers ASCE.
- Cristalamedida. (2018). *Cristal a medida*. Retrieved from <https://www.cristalamedida.com/vidrio/336/venta/246/vidrio-templado-de-10mm>
- DoDM, U.S. (2012). *DoDM Manual 6055.09-M-VI, An DoDM Manual, Ammunition and Explosives Safety Standards: General Explosives Safety Information and Requirements*. Washington, DC, USA.
- Ejercito, C. d. (2017). *Cuerpo de Ingenieros del Ejército*. Retrieved from <http://cuerpodeingenierosdelejercito.mil.ec/index.php/la-institucion/historia>
- ENGINEERS, I. S. (2016). *Blasters' Handbook*. Tennessee: ISEE18.
- EXPLOCEN. (2017). Explosivos Encartuchados. *Catalogo de productos y servicios*, 15-16.
- EXPLOCEN. (2018). Catálogo de productos y servicios. Latacunga: Explocen C.A.
- Explorable. (2008, Octubre 9). *Investigación Experimental*. Retrieved from <https://explorable.com/es/investigacion-experimental>
- Fujikake, K., & Aemlaor, P. (2013). Damage of reinforced concrete columns under demolition blasting. *Engineering Structures*, 116-125.
- Haro, J. F. (2014). *Estudio comparativo para determinar la reducción del esfuerzo a compresión simple de los núcleos de hormigón comparados con la resistencia de cilindros normalizados de hormigón*. Quito: Universidad Internacional del Ecuador .
- Henrych, J. (1979). *The dynamics of explosion and its use* . New York: Elsevier.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2010). *Metodología de la Investigación*. México.
- Hincapié, Á. M., & Vidal, J. (2003). Resistencia al hormigón: núcleos vs. cilindros. *Revista Universidad EAFIT Vol. 39*, 87-95.
- INEC. (2017). *Reconstruyendo las cifras luego del sismo Memorias*. Quito: INEC.

- Institute, A. C. (2011). *Bulding Code Requirements for structural concrete*. EEUU.
- Karlos, V., & Solomos, G. (2013). *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Kingery, C. (1966). *Air blast parametres versus distance for hemispherical TNT surface bursts (No. BRL-1344)*. Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground MD.
- Kingery, C., & Bulmash, G. (1984). *Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst*. Maryland: US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground,.
- Kinney, G. F., & Graham, K. J. (1985). *Explosive shocks in air*. Berlín y Nueva York: Springer-Verlag.
- Luca, G. (2010). *Metodologie di demolizione: applicazioni e valutazioni*. Turin: Politecnica di Torino.
- Manabí, R. R. (2016, agosto 04). 29 kilos de explosivos de utilizarán para la implosión del Centro Médico del Pacífico. *El Telégrafo*.
- Mays, G. C., & Smith, P. D. (Eds.). (1995). Blast effects on buildings. *Design of building to optimize resistance to blast loading*, ISBN: 0727720309. London, UK: Thomas Telford Publications.
- Mejía, R., & Vasconez, E. (2017). *Desarrollo de curvas de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de hormigón armado*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- MIDUVI. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción. *Código NEC-SE-HM*. Ecuador: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Mora, C. H. (2013). *Manual del vigilante de explosivos* (2a. ed.). España: Editorial Club Universitario. Retrieved from <httpwww.ebrary.com>
- MT6-E1-00. (2017). *Manual de desactivación y destrucción de artefactos explosivos en estados de riesgo (E.O.D) Comando de Educación y Doctrina del Ejército*. Quito: Comando de Educación y Doctrina del Ejército.
- Navia, F., & Morales, E. (2017). *Simulación computacional de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de hormigón armado*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- NEC - SE - HM. (2015). *Estructuras de Hormigón Armado*.

- Newmark, N., & Hansen, R. (1961). Design of blast resistant structures. *Shock and Vibration Handbook*.
- NSR - 98. (1998). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*. Santa Fe de Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- NTE INEN - ISO 6892 - 1. (2017). *Materiales metálicos - Ensayo de tracción - Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente (ISO 6892 - 1: 2016, IDT)*. Quito, Ecuador : Servicio Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 2167. (2011). *Varillas con resaltes de acero de baja aleación, soldables, laminadas en caliente y/o termotratadas para hormigón armado*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 696. (2011). *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 856. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del árido fino*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 857. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 858. (2010). *Áridos. Determinación de la masa unitaria (Peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 862. (2011). *Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Peralta, R., Sarango, A., & Mejía, N. (2019). Parámetros de seguridad para zonas de trabajo con explosivos. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 1-14.
- Puerta, C. C. (2016). Clasificación y características de los explosivos. Bogota, Colombia.
- Romo, M. (2008). *Temas de Hormigón Armado*. Quito: Espe.
- Sadovsky, M. (2004). *Mechanical effects of air shockwaves from explosions according to experiments*. Nauka Press, Moscow: Sadovskiy MA Selected works: Geophysics and physics of explosion.
- SENPLADES. (2016). *Resultados de la evaluación del sismo del 2016*. Quito.

- Siba, F. (2014). Near-Field Explosion Effects on Reinforced Concrete Columns: An Experimental Investigation. *Affairs in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science in Civil Engineering*. Ottawa, Ontario, Canada: Carleton University.
- Swisdak, M. (1994). *Simplified Kingery Airblast Calculations*. Indian Head, USA: Naval Surface Warfare Center.
- Tapia, R., & Madrid, K. (2019). *Modelación de daño en columnas de hormigón armado a escala real por efecto de cargas explosivas mediante simulación numérica y computacional*. Quito: Espe.
- Thiele, R. (2007). *Ejecución de faenas de Demolición sobre Estructuras de Hormigón*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Tran, T. (2009). *Effect of short-duration-high-impulse variable axial and transverse loads on reinforced concrete column*. Florida.
- Tzu, S. (1730). *El Arte de la Guerra*.
- UFC 3-340-02 . (2008). *Structures to resist the effects of accidental explosions*. usa: u.s. Army Corps of Engineers, Unified Facilities Criteria.
- Universia. (2017, septiembre 04). *Universia costarica*. Retrieved from <http://noticias.universia.cr/educacion/noticia/2017/09/04/1155475/tipos-investigacion-descriptiva-exploratoria-explicativa.html>
- White, C., Jones, R. D., Fletcher, R., & Richmond, D. (1971). *The biodynamics of airblast*. . Nuevo México: Medical Education and Research Albuquerque.
- Zapata, D., & Salazar, R. (2019). *Análisis del efecto de la acción de cargas explosivas en elementos de hormigón armado mediante el procesamiento digital de imágenes a través de la cámara de alta velocidad Phantom V2512*. Quito: ESPE.
- Zipf, R. K., & Cashdollar, K. (n.d.). *Chambers, Explosions and Refuge*. Retrieved from www.cdc.gov/niosh/docket/archive/pdfs/NIOSH-125/125ExplosionsandRefugeChambers.pdf