



**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 INGENIERO CIVIL**

**TEMA: DESARROLLO DE CURVAS DE DAÑO POR IMPACTO**  
**CON CARGAS EXPLOSIVAS EN COLUMNAS DE HORMIGÓN**  
**ARMADO**

**AUTORES: CAPT. E. MEJÍA ALMEIDA, RODRIGO JESÚS**  
**VÁSCONEZ JARRÍN, ESTEBAN FERNANDO**

**DIRECTOR: ING. DURÁN CARRILLO, JOSÉ RICARDO, MG**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



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

**CERTIFICADO**

Certifico que el trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE CURVAS DE DAÑO POR IMPACTO CON CARGAS EXPLOSIVAS EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO”**, realizado por los señores: **ESTEBAN FERNANDO VÁSCONEZ JARRÍN** y **CAPT. RODRIGO JESÚS MEJÍA ALMEIDA**, como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Civil, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto, me permito acreditarlo y autorizar a los señores: **ESTEBAN FERNANDO VÁSCONEZ JARRÍN** y **CAPT. RODRIGO JESÚS MEJÍA ALMEIDA** para que sustenten su trabajo públicamente.

Sangolquí, 04 de agosto de 2017

Atentamente,

Ing. José Ricardo Durán Carrillo, Mg  
Director Proyecto de Titulación



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

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD I**

Yo, **ESTEBAN FERNANDO VÁSCONEZ JARRÍN**, con cédula de ciudadanía Nro. **172253640-4**, declaro que el trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE CURVAS DE DAÑO POR IMPACTO CON CARGAS EXPLOSIVAS EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros, considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 04 de agosto de 2017

Sr. Esteban Fernando Vásconez Jarrín  
C.C. 172253640-4



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

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD II**

Yo, **CAPT. RODRIGO JESÚS MEJÍA ALMEIDA**, con cédula de ciudadanía Nro. **171398784-8**, declaro que este trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE CURVAS DE DAÑO POR IMPACTO CON CARGAS EXPLOSIVAS EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros, considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 04 de agosto de 2017

Rodrigo Jesús Mejía Almeida  
Capitán - E  
C.C 171398784-8



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

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **CAPT. RODRIGO JESÚS MEJÍA ALMEIDA** y **SR. ESTEBAN FERNANDO VÁSCONEZ JARRÍN** y, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DESARROLLO DE CURVAS DE DAÑO POR IMPACTO CON CARGAS EXPLOSIVAS EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO A TRAVÉS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL Y PRUEBAS EXPERIMENTALES**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 04 de agosto de 2017

Capt. Rodrigo Jesús Mejía Almeida  
C.C 171398784-8

Sr. Esteban Fernando Vásquez Jarrín  
C.C 172253640-4

## DEDICATORIA

Este proyecto de titulación va dedicado a toda mi familia por su ejemplo, respaldo y soporte incondicional al transcurrir mi carrera universitaria.

A María Gabriela y Martina Sofía por su comprensión en el tiempo ausente para alcanzar este gran triunfo; sepan que este logro es también de ustedes.

A mis camaradas y amigos.

Para todos ustedes, esta dedicatoria.

**Capt. E. Mejía Almeida, Rodrigo Jesús**

Dedico todo mi esfuerzo a mis padres por su apoyo imperecedero durante el tiempo invertido para el desarrollo de este trabajo y a lo largo de mi vida estudiantil; quienes cultivaron en mí valores y principios, sustento para hacer frente a las adversidades y a ser grato y humilde en la consecución de éxitos.

A mis hermanos, y demás familiares, quienes que con su aliento y buenos augurios alimentaron mi espíritu y fuerza de voluntad para no desmayar.

A mis compañeros y amigos por el respaldo, su respeto, trabajo y ánimo para seguir adelante, en la consolidación de objetivos.

A la Carrera de Ingeniería Civil, especialmente a todos los docentes que fueron la guía y orientación para consolidar este documento.

**Vásconez Jarrín, Esteban Fernando**

## AGRADECIMIENTO

La finalización de este proyecto plasma la conquista de un sueño y consecución de una meta trazada al ingresar a mi querida universidad, es por eso por lo que deseo expresar mi sincero agradecimiento: A Dios, por cobijarme con sus bendiciones y permitirme llegar a esta instancia con entusiasmo, salud y vida. A mis padres, quienes siempre han estado presentes entregándome su cariño, aliento y comprensión y a aquellas personas que colaboraron en la consecución de mi éxito.

**Vásconez Jarrín, Esteban Fernando**

Mi agradecimiento eterno a Dios, mi familia, entre ellos una mención especial a mi madre, mi esposa e hija, quienes representan la fuente de mi inspiración. Agradezco de igual manera a mi Director de Proyecto, Ing. Ricardo Durán, docentes investigadores entre ellos a mi hermano Nestor David, y a mis amigos Ayudantes de Investigación: Edison, Patricio y Esteban; quienes confiaron en este Proyecto y a pesar de la divergencia de criterios, siempre estuvieron animosos de trabajar en la búsqueda de alternativas de solución para continuar con la misión emprendida. Agradezco así mismo a las instituciones que, a través de su auspicio, permitieron viabilizar los requerimientos logísticos y financieros para ejecutar esta investigación. El agradecimiento también a todas aquellas personas que, en los momentos más difíciles, me brindaron el respaldo institucional, su ayuda personal, o simplemente estuvieron presentes con una frase sincera de aliento para mirar al frente y continuar ante la adversidad.

Mi agradecimiento igualmente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, y en esta a sus autoridades, personal directivo, servidores públicos, docentes, estudiantes y personal militar, que, desde el rincón de las aulas en congresos, debates y conversaciones, cultivaron en mí, ese espíritu crítico de innovar, proponer y solventar desde una arista técnica soluciones a cuestionamientos desatendidos, al ser esa la mejor oportunidad de afianzar los conocimientos aprendidos. Finalmente, no podría olvidar mi gratitud eterna a mi Ejército, que me concedió la oportunidad capacitarme en esta noble y emblemática universidad ecuatoriana.

**Capt. E. Mejía Almeida, Rodrigo Jesús**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

### CARÁTULA

<b>CERTIFICADO .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD I .....</b>	<b>iii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD II.....</b>	<b>iv</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>v</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>vi</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO.....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xvii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xx</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>xxi</b>

### CAPÍTULO I

<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>24</b>
1.1        Introducción .....	24
1.2        Antecedentes .....	25
1.3        Estado del Arte.....	26
1.4        Justificación e Importancia .....	33
1.5        Objetivos .....	33
1.5.1     Objetivo General .....	33
1.5.2     Objetivo Específicos .....	33
1.6        Área de Influencia.....	34

### CAPÍTULO II

<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>35</b>
2.1        Material explosivo.....	35
2.1.1     Definiciones .....	35
2.1.1.1   Explosivo .....	35
2.1.1.2   Mezcla Explosiva.....	35

		ix
2.1.1.3	Reacción explosiva (Blast).....	35
2.1.1.4	Descomposición del explosivo.....	36
2.1.1.5	Onda expansiva / Onda de choque.....	36
2.1.2	Clasificación de los explosivos.....	39
2.1.3	Clasificación de explosiones en estructuras.....	40
2.2	Elementos de hormigón armado bajo cargas convencionales.....	41
2.2.1	Consideraciones preliminares.....	41
2.2.2	Consideraciones de diseño.....	42
2.3	Elementos de hormigón armado bajo cargas explosivas (blast).....	42
2.3.1	Consideraciones preliminares.....	42
2.3.2	Modos de Comportamiento Estructural.....	43
2.3.2.1	Comportamiento Estructural del Hormigón Armado.....	43
2.3.3	Resistencia dinámica de los materiales.....	44
2.3.3.1	Acero de refuerzo.....	44
2.3.3.2	Hormigón.....	46
2.3.3.3	Curva Esfuerzo – Deformación.....	46
2.3.4	Propiedades de los materiales (estática).....	47
2.3.4.1	Módulo de Elasticidad.....	48
2.3.4.2	Módulo de Inercia.....	48
2.3.5	Factor de incremento dinámico (DIF).....	50

### **CAPÍTULO III**

#### **MODELO MATEMÁTICO..... 52**

3.1	Análisis del sistema de un grado de libertad.....	52
3.2	Presión del explosivo en función del material.....	55
3.3	Curvas teóricas características.....	55
3.3.1	Curva Teórica I.....	56
3.3.2	Curva Teórica II.....	60

### **CAPÍTULO IV**

#### **PROBETA TIPO COLUMNA AFECTA POR TERREMOTO 16-A..... 63**

4.1	Descripción general.....	63
4.2	Selección de la muestra.....	65

		x
4.3	Extracción de la muestra .....	66
4.4	Ensayo experimental Manabí.....	67
4.4.1	Consideraciones previas.....	67
4.4.1.1	Disposición de la probeta .....	68
4.4.1.2	Disposición de las cargas explosivas. ....	68
4.4.2	Consideraciones de Seguridad .....	68
4.4.3	Metodología de Ensayo.....	70
4.4.4	Ejecución Experimental .....	73

## **CAPÍTULO V**

### **PROBETAS PILOTO DE HORMIGÓN ARMADO ..... 74**

5.1	Diseño .....	74
5.1.1	Condiciones de diseño.....	74
5.1.2	Criterio Estructural.....	74
5.1.2.1	Refuerzo Longitudinal .....	74
5.1.2.2	Refuerzo Transversal (Hormigón 210 kg/cm <sup>2</sup> ) .....	75
5.1.2.3	Refuerzo Transversal (Hormigón 280 kg/cm <sup>2</sup> ) .....	76
5.2	Construcción .....	77
5.3	Ensayos experimentales destructivos.....	80
5.3.1	Consideraciones previas.....	80
5.3.1.1	Disposición de probetas piloto de hormigón armado.....	81
5.3.1.2	Disposición de cargas explosivas.....	81
5.3.2	Consideraciones de Seguridad .....	81
5.3.3	Metodología de Ensayo.....	82
5.3.4	Ejecución Experimental .....	86
5.3.5	Ensayo Preliminar No. 1 .....	87
5.3.6	Ensayo Preliminar No. 2 .....	88
5.3.7	Ensayo Preliminar No. 3 .....	89
5.3.8	Ensayo Preliminar No. 4 .....	90
5.3.9	Ensayo Preliminar No. 5 .....	91
5.3.10	Ensayo Preliminar No. 6 .....	92
5.3.11	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 1 .....	93
5.3.12	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 2 .....	94

		xi
5.3.13	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 3 .....	95
5.3.14	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 4 .....	96
5.3.15	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 5 .....	97
5.3.16	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 6 .....	98
5.3.17	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 7 .....	99
5.3.18	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 8 .....	100
5.3.19	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 9 .....	101
5.3.20	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 10 .....	102
5.3.21	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 11 .....	103
5.3.22	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 12 .....	104
5.3.23	Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 13 .....	105
5.4.1	Resultados .....	106
5.4.2	Deformaciones en elementos y cargas aplicadas .....	108

## **CAPÍTULO VI**

<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>111</b>	
6.1	Análisis del modelo por carga puntual equivalente .....	111
6.1.1	Presión de incidencia en función de la distancia escalada .....	112
6.1.2	Características físicas del acero longitudinal .....	122
6.1.3	Resolución del modelo analítico .....	124
6.1.4	Discusión de resultados analíticos .....	126
6.2	Análisis del modelo por Conservación de la Energía .....	127
6.2.1	Energía de detonación .....	127
6.2.2	Rigidez equivalente .....	129
6.2.3	Resolución del modelo analítico .....	131
6.2.4	Discusión de resultados analíticos .....	132
6.3	Análisis de la ejecución Experimental .....	133
6.3.1	Probetas de hormigón armado con resultados dispersos .....	133
6.3.1.1	Ensayo en Probeta No. 1 (E - PP) .....	133
6.3.1.2	Ensayo en Probeta No. 8 (EP) y 9 (EP) .....	134
6.3.1.3	Ensayo en Probeta No. 16 (EP) .....	135
6.3.1.4	Ensayo en Probeta No. 17 (EP) .....	135
6.3.2	Columna de hormigón armado, provincia de Manabí .....	136

		xii
6.3.3	Probetas de hormigón armado con resultados admitidos.....	137
6.3.3.1	Comportamiento en aceros de refuerzo.....	137
6.3.3.2	Discusión de resultados.....	139
6.3.4	Consideraciones de daño en probetas de hormigón armado .....	143
6.3.4.1	Efectos de daño con respecto a la resistencia del hormigón .....	143
6.3.4.2	Efectos de daño con respecto a la condición de forma del explosivo	144
6.3.4.3	Efectos de daño con respecto al uso de perfiles de aluminio.....	145
6.4	Comparación de resultados analíticos y experimentales.....	146
6.4.1	Comparación entre resultados analíticos.....	146
6.4.2	Comparación entre resultados experimentales y analíticos .....	148
6.5	Curvas de daño por impacto con cargas explosivas.....	150
6.5.1	Curva Teórica.....	150
6.5.2	Curva Teórica Experimental .....	150
6.5.3	Curva Experimental .....	151
6.5.4	Discusión de resultados.....	152

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 154**

7.1	Conclusiones .....	154
7.2	Recomendaciones.....	157

### **REFERENCIA ..... 159**

### **ANEXOS ..... 163**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ensayos sobre placa deformables con material explosivo.....	26
Figura 2 Pruebas destructivas con probetas diseñadas para el efecto .....	27
Figura 3 Comparación del modelo numérico y experimental.....	28
Figura 4 Experimentación en columnas HA / Mallado en ABAQUS .....	29
Figura 5 Diagrama de presión-impulso para diferentes niveles de carga axial.....	29
Figura 6 Estructura de soporte modelada con columna pegada. ....	30
Figura 7 Ensayos destructivos realizados en elementos tipo Columna HA.....	30
Figura 8 Pruebas del sistema de instalación y soporte. ....	31
Figura 9 Previo ensayo para determinar desprendimiento de materiales.....	32
Figura 10 Ensayo de materiales y simulación con el hidro-código LS-DYNA.....	32
Figura 11 Gráfica presión-tiempo de una onda expansiva.....	37
Figura 12 Historia ideal del tiempo de presión de la onda expansiva.....	38
Figura 13 Hormigón armado empleado en la construcción de losa alivianada.....	41
Figura 14 Perfiles de superficies de barras de acero .....	45
Figura 15 Curva (esfuerzo – deformación) acero de refuerzo .....	46
Figura 16 Curva (esfuerzo – deformación) hormigón .....	47
Figura 17 Coef momento inercia, secc. agrietadas, armadura de tracción.....	49
Figura 18 Coef momento inercia, secc. agrietadas igual refuerzo en caras opuestas	49
Figura 19 Sistema SDOF y fuerza explosiva equivalente.....	52
Figura 20 Factor (C) para cargas explosivas de apertura / perforación .....	57
Figura 21 Análisis para determinar Curva Teórica II .....	61
Figura 22 Curvas teóricas características de daño severo .....	62
Figura 23 Observación a infraestructura afectada por el terremoto 16-A, Manabí ...	63
Figura 24 Daño evidenciado en pie de columna por el terremoto 16-A, Manabí.....	64
Figura 25 Edificación de donde se autorizó la toma de la muestra, Manabí .....	65
Figura 26 Descripción general del elemento seleccionado, Manabí.....	66
Figura 27 Verificación de la resistencia del hormigón en probeta, Manabí .....	66
Figura 28 Extracción de la probeta tipo columna de hormigón armado, Manabí.....	67
Figura 29 Esquema ensayo experimental condición de simple apoyo, Manabí .....	68
Figura 30 Disposición de probeta de ensayo, Manabí .....	71
Figura 31 Instalación de cargas explosivas en probetas de ensayo, Manabí .....	71

Figura 32 Probeta tipo columna post-ensayo, Manabí.....	72
Figura 33 Ensayo con carga explosiva CEM-I-a, Manabí.....	73
Figura 34 Efecto de la carga CEM-I-a, Manabí.....	73
Figura 35 Armadura probeta piloto de hormigón armado 210 kg/cm <sup>2</sup> .....	76
Figura 36 Armadura probeta piloto de hormigón armado 280 kg/cm <sup>2</sup> .....	77
Figura 37 Encofrado de madera para probetas piloto de hormigón armado .....	77
Figura 38 Acero de refuerzo para probetas piloto de hormigón armado .....	78
Figura 39 Fundición de probetas piloto de hormigón armado .....	78
Figura 40 Probetas piloto HA y cilindro posterior a la fundición.....	79
Figura 41 Piscina de curado para probetas piloto y cilindros de hormigón. ....	79
Figura 42 Ensayo de compresión en cilindros de hormigón .....	80
Figura 43 Toma de datos previo a la ejecución de los ensayos destructivos .....	83
Figura 44 Probeta simplemente apoyada sobre cilindros de hormigón .....	83
Figura 45 Identificación y registro de las cargas explosivas.....	84
Figura 46 Personal colaborar y técnico se desplaza a zona segura .....	84
Figura 47 Cebamiento de cargas explosivas en probetas piloto .....	85
Figura 48 Probeta piloto, posterior al ensayo experimental destructivo.....	85
Figura 49 Residuos de material llevados en el laboratorio .....	86
Figura 50 Ensayo Preliminar No. 1 .....	87
Figura 51 Efectos de CEX-I.....	87
Figura 52 Ensayo Preliminar No. 2.....	88
Figura 53 Efectos de CEX-II, CEX-III .....	88
Figura 54 Ensayo Preliminar No. 3.....	89
Figura 55 Efectos de CEX-IV (1) .....	89
Figura 56 Ensayo Preliminar No. 4.....	90
Figura 57 Efectos de CEX-IV (2) .....	90
Figura 58 Ensayo Preliminar No. 5.....	91
Figura 59 Efectos de CEX-V (1).....	91
Figura 60 Ensayo Preliminar No. 6.....	92
Figura 61 Efectos de CEX-V (2).....	92
Figura 62 Ensayo Experimental PP No. 1.....	93
Figura 63 Efectos de la carga explosiva CEV-I.....	93
Figura 64 Ensayo Experimental PP No. 2.....	94

	xv
Figura 65 Efectos de la carga explosiva CEV-II.....	94
Figura 66 Ensayo Experimental PP No. 3.....	95
Figura 67 Efectos de la carga explosiva CEV-II.....	95
Figura 68 Ensayo Experimental PP No. 4.....	96
Figura 69 Efectos de la carga explosiva CEV-IV .....	96
Figura 70 Ensayo Experimental PP No. 5.....	97
Figura 71 Efectos de la carga explosiva CEV-V .....	97
Figura 72 Ensayo Experimental PP No. 6.....	98
Figura 73 Efectos de la carga explosiva CEV-VI.....	98
Figura 74 Ensayo Experimental PP No. 7.....	99
Figura 75 Efectos de la carga explosiva CEV-VII.....	99
Figura 76 Ensayo Experimental PP No. 8.....	100
Figura 77 Efectos de la carga explosiva CEV-VIII .....	100
Figura 78 Ensayo Experimental PP No. 9.....	101
Figura 79 Efectos de la carga explosiva CEV-IX .....	101
Figura 80 Ensayo Experimental PP No. 10.....	102
Figura 81 Efectos de la carga explosiva CEV-X .....	102
Figura 82 Ensayo Experimental PP No. 11.....	103
Figura 83 Efectos de la carga explosiva CEV-XI .....	103
Figura 84 Ensayo Experimental PP No. 12.....	104
Figura 85 Efectos de la carga explosiva CEV-XII.....	104
Figura 86 Ensayo Experimental PP No. 13.....	105
Figura 87 Efectos de la carga explosiva CEV-XIII .....	105
Figura 88 Acero longitudinal deformado, Probetas Piloto HA.....	106
Figura 89 Estribo deformado post ensayo, Probetas Piloto HA.....	107
Figura 90 Ensayo de tracción en varillas corrugadas.....	107
Figura 91 Esquema de ubicación aceros longitudinales, Probetas Piloto HA .....	108
Figura 92 Diagrama de flujo de validación de modelo matemático .....	111
Figura 93 Curva de presión I, según peso del explosivo y distancia escalada Z .....	114
Figura 94 Curva de presión II, según peso del explosivo y distancia escalada Z....	115
Figura 95 Curva de presión III, según peso del explosivo y distancia escalada Z... 118	118
Figura 96 Curva I, según comparación de modelos de presión; peso explosivo .....	118
Figura 97 Aplicación para cálculo de parámetros de carga explosiva, UN.....	119

Figura 98 Curva II, según comparación de modelos de presión; peso explosivo ....	120
Figura 99 Esquema de distribución de presión en la probeta de hormigón armado	121
Figura 100 Desplazamiento en función del tiempo, explosivo 450 gramos .....	125
Figura 101 Deformaciones acero longitudinal, carga puntual equivalente.....	127
Figura 102 Esquema de rigidez del elemento estructural .....	130
Figura 103 Deformaciones acero longitudinal, conservación de energía .....	133
Figura 104 Probeta 1 (E - PP), analizada en el laboratorio de materiales.....	134
Figura 105 Probeta 8 (EP), analizada en el laboratorio de materiales .....	134
Figura 106 Dispositivo de ensayo Probeta 16 (EP) .....	135
Figura 107 Dispositivo de ensayo Probeta 17 (EP) .....	136
Figura 108 Comportamiento inicial de la probeta durante el ensayo.....	138
Figura 109 Comportamiento intermedio de la probeta durante el ensayo .....	138
Figura 110 Deformación del acero longitudinal en probetas $f'c$ 210 kg/cm <sup>2</sup> .....	139
Figura 111 Deformación del acero longitudinal en probetas $f'c$ 280 kg/cm <sup>2</sup> .....	140
Figura 112 Peso de hormigón residual en probetas $f'c$ 210 kg/cm <sup>2</sup> .....	140
Figura 113 Peso de hormigón residual en probetas $f'c$ 280 kg/cm <sup>2</sup> .....	141
Figura 114 Comportamiento de los materiales en probetas $f'c$ 210 kg/cm <sup>2</sup> .....	141
Figura 115 Comportamiento de los materiales en probetas $f'c$ 280 kg/cm <sup>2</sup> .....	142
Figura 116 Comparación de deformaciones analíticas .....	147
Figura 117 Curvas de daño por impacto con cargas explosivas .....	153

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de material explosivo .....	40
Tabla 2	Tamaños de barras de acero A 615, Grado 60 (ASTM) .....	45
Tabla 3	Ecuaciones para determinar momentos de inercia.....	48
Tabla 4	Factores de incremento dinámico (DIF) .....	50
Tabla 5	Criterios típicos de fallo para elementos estructurales.....	51
Tabla 6	Variables para determinar la presión de detonación, (PENTOLITA) .....	55
Tabla 7	Factor (K) para cargas explosivas de apertura / perforación .....	56
Tabla 8	Valores de calor de detonación de explosivos .....	58
Tabla 9	Análisis Curva Teórica I, según ecuación (3.3-1).....	59
Tabla 10	Pre-análisis Curva Teórica II, según tabla 3-6, FM 3-34.214.....	60
Tabla 11	Análisis Curva Teórica II, según tabla 3-6, FM 3-34.214 .....	61
Tabla 12	Curvas teóricas características de daño en elementos de hormigón .....	62
Tabla 13	Niveles de protección Factor K.....	69
Tabla 14	Previsiones de incidentes máximos de eventos HD 1.1 (V1.E8.T2.) .....	70
Tabla 15	Desarrollo de Ensayo Experimental Manabí .....	73
Tabla 16	Planilla de aceros, diseño probetas piloto de hormigón armado.....	79
Tabla 17	Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 1 .....	87
Tabla 18	Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 2 .....	88
Tabla 19	Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 3 .....	89
Tabla 20	Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 4 .....	90
Tabla 21	Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 5 .....	91
Tabla 22	Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 6 .....	92
Tabla 23	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 1 .....	93
Tabla 24	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 2 .....	94
Tabla 25	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 3 .....	95
Tabla 26	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 4 .....	96
Tabla 27	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 5 .....	97
Tabla 28	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 6 .....	98
Tabla 29	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 7 .....	99
Tabla 30	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 8 .....	100
Tabla 31	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 9 .....	101

Tabla 32	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 10 .....	102
Tabla 33	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 11 .....	103
Tabla 34	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 12 .....	104
Tabla 35	Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 13 .....	105
Tabla 36	Deformaciones alcanzadas experimentalmente en acero longitudinal ....	108
Tabla 37	Resumen cantidad de cargas con explosivo (PENTOLITA) .....	109
Tabla 38	Resultado del peso residual obtenido en función de la carga explosiva. .	110
Tabla 39	Cálculo de presiones actuantes, según ecuación de (Brode, 1955).....	113
Tabla 40	Cálculo de presiones actuantes, según ecuación de (Henrych, 1979).....	116
Tabla 41	Cálculo de presiones actuantes, según ecuación de (Baker W. E., 1973)	117
Tabla 42	Cálculo de presiones actuantes, según (SaferGuard-UN, 2017).....	119
Tabla 43	Relación de resultados entre ecuaciones de presión .....	121
Tabla 44	Carga Puntual Equivalente, según ecuación de (Henrych, 1979).....	122
Tabla 45	Parámetros físicos del acero longitudinal .....	122
Tabla 46	Parámetros de análisis modelo matemático, 450 gramos (PENTOLITA)	124
Tabla 47	Desplazamiento según ecuación (3.1-14), 450 gramos (PENTOLITA)..	125
Tabla 48	Deformaciones máximas según modelo por carga puntual equivalente..	126
Tabla 49	Calor de formación y peso molecular del explosivo (PENTOLITA) .....	128
Tabla 50	Valores de rigidez axial, probetas de hormigón armado.....	130
Tabla 51	Deformaciones máximas según modelo por conservación de la energía.	132
Tabla 52	Análisis de resultados relación de resistencia de hormigón (1).....	143
Tabla 53	Análisis de resultados relación de resistencia de hormigón (2).....	143
Tabla 54	Análisis de resultados condición de forma del explosivo (1) .....	144
Tabla 55	Análisis de resultados condición de forma del explosivo (2) .....	144
Tabla 56	Análisis de efecto de daño utilizando láminas de aluminio (1) .....	145
Tabla 57	Análisis de efecto de daño utilizando láminas de aluminio (2) .....	145
Tabla 58	Deformación analítica en aceros longitudinales .....	146
Tabla 59	Comparación de resultados experimentales y analíticos.....	148
Tabla 60	Evaluación de daño en probetas de hormigón armado .....	149
Tabla 61	Criterio de falla obtenido en columna, provincia de Manabí.....	151
Tabla 62	Criterio de falla ajustado en columna, provincia de Manabí .....	151
Tabla 63	Curvas de daño por impacto con cargas explosivas.....	152

## RESUMEN

Esta investigación tiene por objetivo establecer el comportamiento de los materiales que componen las columnas de hormigón armado ante el impacto de cargas con explosivo (PENTOLITA). Los parámetros considerados incluyen: condiciones de diseño, construcción, ensayo y efectos de daño. Experimentalmente se efectuaron 20 pruebas destructivas según detalle: 06 ensayos preliminares, 01 ensayo en columna extraída de una edificación afectada por el terremoto del 16-A y 13 ensayos normalizados con probetas de hormigón armado de sección cuadrada (30 x 30) cm; longitud 0.50 metros, cuantía 2 % y resistencia del hormigón: 210 kg/cm<sup>2</sup> y 280 kg/cm<sup>2</sup>. Analíticamente se estableció dos modelos: carga puntual equivalente en función de cuatro ecuaciones de presión y un modelo bajo la ley de conservación de la energía. Los resultados analíticos y experimentales contrastados convergen en la relación de la resistencia residual final alcanzada en los materiales y la cantidad de explosivo utilizado, hecho que se evidencia en la deformación o fracturas producidas en el hormigón y el acero por causa del esfuerzo cortante, lo que concluye que, el uso de material explosivo direccional amplifica el daño de elementos diseñados a flexo-compresión. Para ajustar condiciones de borde ideales en un nuevo estudio se presenta una propuesta de diseño estructural que incluye: columnas de hormigón armado en escala real y una máquina de ensayos destructivos a compresión que simula condiciones de trabajo de columnas en una edificación.

### Palabras Claves:

- **PENTOLITA.**
- **HORMIGÓN ARMADO.**
- **ACERO DE REFUERZO.**
- **CARGAS EXPLOSIVAS.**

## ABSTRACT

The aim of this research is the behavior of reinforced concrete columns under blast loads. It was achieved by diagnostic, exploratory and experimental research. We focus on the design parameters, building, upgrade and damage effects on experimental specimens. Twenty destructive testing were conducted: six development and preliminary tests, one test with a column of a building which was partially collapsed due to 2016 Ecuador earthquake, and thirteen standardized tests with specimens of reinforced concrete and cross section of (30 x 30) cm, 50 cm of length, 2 percent of steel and concrete resistance with 210 kg/cm<sup>2</sup> & 280 kg/cm<sup>2</sup> under NEC standard. The development of a mathematical model (conservation of energy) and experimental testing. Our mathematical and experimental models were validated against 4 theoretical models for predicting the maximum pressure to transform it in an equivalent punctual force. The interaction between this force and specimen are expressed in terms of steel bars deformation and concrete cracking/detachment. The results are graphically presented which demonstrates the damage profile of the steel bars in function of mass of explosive. This research also includes a blast test bench and reinforced concrete columns designs for real scale which might be the framework for further researches related to civil constructions or military purposes.

### **Keywords:**

- **PENTOLITE.**
- **REINFORCED CONCRETE.**
- **STEEL BARS.**
- **BLAST LOADS.**
- **DAMAGE PROFILE.**

## NOMENCLATURA

Simbología	Representación
$A_{ch}$	Área -e la sección transversal de un elemento estructural, medida entre los bordes exteriores de refuerzo transversal, mm <sup>2</sup>
$A_g$	Área bruta de la sección de concreto, mm <sup>2</sup>
$A_s$	Área de refuerzo longitudinal no presforzado a tracción
$A_{sh}$	Área total de refuerzo transversal (incluye ganchos suplementarios) colocados dentro del espaciamiento "s" y perpendicular a la dimensión "b <sub>c</sub> ", mm <sup>2</sup>
BA	Barra de acero
	- Ancho de la cara en compresión del elemento, mm
b	- Coeficiente de decaimiento de la forma de la onda que puede calcularse mediante un ajuste no lineal de una curva de tiempo de presión experimental sobre su fase positiva
$b_c$	Dimensión transversal del núcleo del elemento medida entre los bordes externos del refuerzo transversal con área $A_{sh}$
C	Factor de apisonamiento, que depende de la ubicación y apisonamiento de la carga
d	Distancia desde la fibra de extrema a compresión hasta el centroide de la armadura en tracción
$DENS_{exp}$	Densidad del Explosivo
$D_{IBD}$	Distancia de seguridad hacia edificios habitados
$D_{SH}$	Distancia de Seguridad Humana
$E_s$	Módulo de elasticidad del acero de refuerzo
$E_c$	Módulo secante de elasticidad para el hormigón
$\epsilon_u$	Deformación de rotura del material
F	Coeficiente
$F_m$	Fuerza máxima aplicada
$F(t)$	Fuerza en función del tiempo
$f'_c$	Resistencia estática última a la compresión del hormigón

$f'_{dc}$	Resistencia dinámica última a la compresión del hormigón
$f_y$	Resistencia estática a la fluencia del acero de refuerzo
$f_{dy}$	Resistencia dinámica a la fluencia del acero de refuerzo
$f_u$	Resistencia estática última del acero de refuerzo
$f_{du}$	Resistencia dinámica última del acero de refuerzo
$h$	Espesor total o altura de un elemento, mm
$HE$	Alto explosivo
$H_{d\ C4}$	Calor de detonación del explosivo plástico C 4
$H_{d\ Pentolita}$	Calor de detonación del explosivo (PENTOLITA)
$H_{d\ TNT}$	Calor de detonación del explosivo TNT
$I_a$	Momento de inercia medio de la sección transversal del hormigón
$I_g$	Momento de inercia de la sección transversal de hormigón neto (despreciando acero de refuerzo)
$I_c$	Momento de inercia de la sección transversal del hormigón agrietado
	- Rigidez
$K$	- Factor del material, que refleja la resistencia, dureza, y la masa del elemento a demoler
$K_m$	Factor que corresponde al riesgo asumido o permitido
$K_{exp}$	Factor del explosivo
$M$	Masa
$P$	Explosivo requerido, expresando en libras de TNT
$PD$	Presión de detonación
$P_0$	Presión ambiente
$P_{SO}$	Sobrepresión máxima, representa la fuerza total (por unidad de área)
$p_s$	Valor máximo de la presión en el punto de impacto
$R$	- Radio de apertura / perforación, expresado en pies - Distancia del centro de la explosión al punto de impacto, en metros

	- Variable impuesta para resolver por transformada de Laplace
$s$	- Espaciamiento medido centro a centro de unidades tales como refuerzo longitudinal, refuerzo transversal, tendones de prees fuerza, alambres o anclajes, mm
$t$	Tiempo medido desde el instante de llegada de la explosión
$t_o$	Tiempo de duración de la fase positiva
$T_c$	Espesor de la sección transversal de hormigón neto
$VOD_{exp}$	Velocidad de Detonación
$W_{C4}$	Peso equivalente del explosivo plástico C 4
$W_{Pentolita}$	Peso equivalente del explosivo en (PENTOLITA)
$W_{TNT}$	Peso equivalente del explosivo en TNT
$Z$	Distancia escalada para el cálculo de presión de incidencia
$\omega$	Frecuencia natural de vibración
$y$	Desplazamiento
$\ddot{y}$	Aceleración
$\rho$	Cuantía del refuerzo

---

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

El estudio de los elementos estructurales sometidos a cargas explosivas, muestran un amplio espectro del comportamiento de las mismas, las cuales dependen directamente de variables referentes a la estructura como: propiedades físicas y mecánicas; por su parte el uso de explosivos implica establecer variables vinculantes como: composición, forma, cantidad y punto de aplicación; esta interacción de variables determina la naturaleza del campo de estudio.

La presente investigación plantea una alternativa de solución desde un enfoque estructural a un problema táctico militar en operaciones, a través de un estudio que recrea y analiza el comportamiento del hormigón armado en elementos tipo columna de sección cuadrada sometidos a cargas explosivas por ensayos experimentales, cuyo resultado sintetiza establecer curvas características de daño.

La metodología aplicada es descriptiva y experimental. Descriptiva, en razón que comprende la implementación de registros, análisis e interpretación de condiciones actuales sobre demoliciones controladas en elementos de hormigón armado, al comparar y determinar relaciones causa-efecto presentes entre variables no manipuladas, pero reales. Experimental, ya que consiste en una indagación estricta mediante la manipulación de una variable que es la carga explosiva, en condiciones rigurosas y controladas con el fin de describir de qué modo y por qué, se produce una situación o acontecimiento particular. (Ortiz, 2011)

Los contenidos que se presenta en los capítulos adscritos abarcan la heurística de los elementos estructurales y el material explosivo; seguidamente se plantea procedimientos de planeación y ejecución de ensayos experimentales, a su vez protocolos para recolectar resultados que permitirán verificar el comportamiento

mecánico de los materiales, como también, contrastar el análisis teórico y experimental, cuyas analogías y comparaciones dieron la pauta para: analizar, discretizar y definir parámetros que cuantifican la efectividad de una demolición y el comportamiento del hormigón armado en elementos estructurales tipo columna de sección cuadrada.

## **1.2 Antecedentes**

Según el manual de conducción militar del Comando de Educación y Doctrina del Ejército (CEDE, 2015); en 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 alcanzar con carácter de favorable un estado final deseado dentro del teatro de guerra. Operaciones como Gunnerside 1943, la represa Schwammanuel 1945, el puente Hohenzollern 1945, entre otras, evidencian la ejecución de operaciones especiales de sabotaje, a través del empleo de material explosivo para tomar control o anular infraestructura estratégica.

Las Fuerzas Armadas del Ecuador tienen dentro del estudio de explosivos y demoliciones, el empleo de doctrina vigente en el manual FM 5-250 del ejército de los Estados Unidos de Norteamérica (Army, U. S., 1992), esto implica de forma paralela depender de materiales explosivos descritos en este manual y de limitada disposición en el país; por lo que para misiones tácticas que involucran el empleo de material explosivo, se derivan de un cálculo equivalente entre el explosivo especificado en el manual y el disponible en el país, sin embargo, este cálculo al ser equivalente difiere en exactitud en los resultados del efecto esperado.

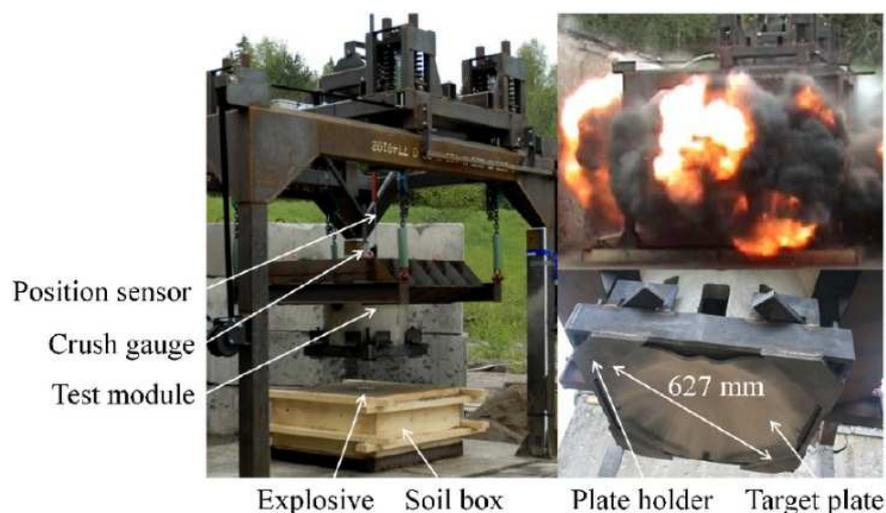
En el ámbito de las estructuras y construcciones, tras el terremoto suscitado en el país el 16 abril del 2016, existió infraestructura severamente afectada principalmente en la provincia de Manabí; una de las ciudades con mayores daños en edificaciones de gran altura fue la capital provincial Portoviejo, en cuya zona cero, las autoridades estatales y seccionales evaluaron, avalaron y autorizaron la demolición controlada con

material explosivo de tres estructuras. La empresa a cargo efectuó estudios estructurales y empleó metodologías encaminadas a fragilizar en mayor medida los elementos portantes debilitados, con el propósito de optimizar el empleo de materiales, medios y equipos, bajo parámetros de seguridad; es así como por primera vez en el Ecuador se utilizó una metodología de demolición controlada con explosivos.

### 1.3 Estado del Arte

De las investigaciones revisadas sobre el campo de estudio, se puede citar ensayos con demoliciones controladas sobre diversos elementos como son: losas, columnas, vigas, mampostería, entre otros; con la finalidad de conocer si los diseños estructurales en aquellos países pueden ser seguros ante estas condiciones, principalmente para salvaguardar vidas humanas dentro de infraestructura con mayor conglomeración de personas.

(Zakrisson, 2010) en su investigación estudió el comportamiento de placas metálicas expuestas a cargas explosivas mediante pruebas experimentales y simulación numérica. La fase experimental concibió variables como: geometría y variación de la distancia de aplicación del explosivo hacia el objetivo (placa de acero) en un medio continuo (aire).



**Figura 1** Ensayos sobre placa deformables con material explosivo  
Fuente: (Zakrisson, B. et al., 2012)

En el campo de simulación numérica, este estudio desarrolló modelos en tres softwares diferentes para comparar, verificar y validar los resultados experimentales; los softwares usados fueron: AUTODYN, MSC. Dytran (MSC. Software Corp., 2004) y ABAQUS / Explicit (ABAQUS Inc., 2004). Los resultados mostraron que es primordial establecer la relación: presión – tiempo, además el perfil de presión que actúa sobre la placa; por otra parte, el estudio concluye que la confiabilidad de los resultados obtenidos por la simulación computacional, son directamente dependientes de la información obtenida en las pruebas de campo. (Zakrisson, 2010)

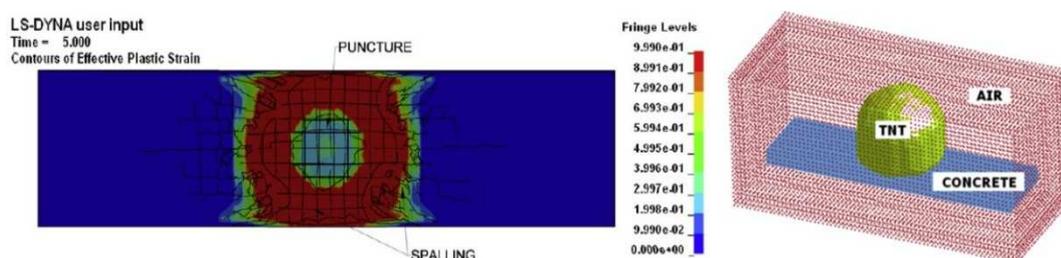
Según (Foglar, M. & Kovar, M., 2013) en su investigación analizó la resistencia en tableros de puentes expuestos a cargas explosivas mediante pruebas experimentales y simulación numérica. Este estudio tuvo como finalidad presentar alternativas tecnológicas para mitigar acciones terroristas en infraestructura vial y fue desarrollado en cooperación con el ejército y la policía de la República Checa en la base militar Boletice.



**Figura 2** Pruebas destructivas con probetas diseñadas para el efecto  
Fuente: (Foglar, M. & Kovar, M., 2013)

Las pruebas experimentales se efectuaron sobre tableros construidos a escala real en hormigón armado (convencional y reforzado con fibras); en cada ensayo se varió la altura de aplicación del explosivo como se observa en la Figura 2, además se utilizó la cantidad estándar de 25 kg de explosivo TNT. Los resultados experimentales fueron analizados en función de la resistencia residual final obtenida en los materiales: (hormigón, acero y fibras de refuerzo). (Foglar, M. & Kovar, M., 2013)

La simulación numérica fue desarrollada en el software LS-DYNA, se basó en el aumento de la energía de fractura en los materiales y mostró gran confiabilidad respecto a los resultados experimentales. Finalmente, el estudio determinó un mejor rendimiento de los tableros reforzados con fibra en relación con los construidos con hormigón armado convencional, lo cual se evidenció, en una mayor resistencia residual a la compresión, menor fragmentación y proyección de escombros, menor deflexión, además el carácter de la falla cambió de frágil a dúctil. (Foglar, M. & Kovar, M., 2013)

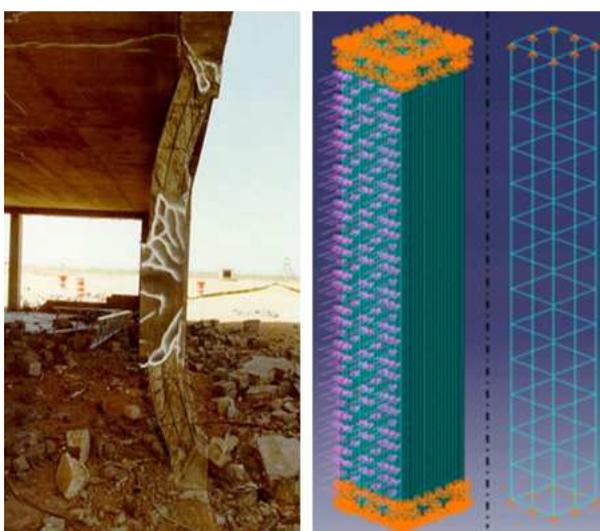


**Figura 3** Comparación del modelo numérico y experimental  
Fuente: (Foglar, M. & Kovar, M., 2013)

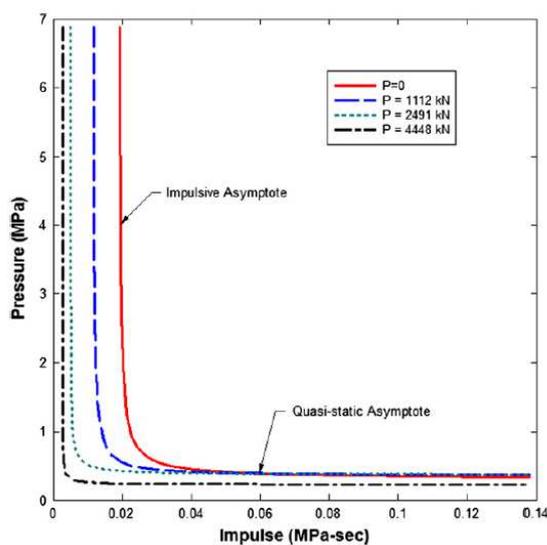
(Astarlioglu, S. et al., 2013) estudió numéricamente el comportamiento dinámico de los elementos tipo columna de hormigón armado bajo efectos combinados de cargas transversales axiales inducidas durante una explosión, a través de un modelo de un grado de libertad. Las principales variables consideradas en esta investigación fueron: la carga axial aplicada, presión y resistencia de los materiales; cuyos resultados fueron evidenciados en los daños causados en el hormigón y el acero de refuerzo, además se estableció diagramas de respuesta en el tiempo de las variables determinadas para el análisis del fenómeno físico. La simulación numérica fue desarrollada mediante el modelamiento en elementos finito en el software ABAQUS.

Los resultados del estudio paramétrico indicaron que la fuerza axial de compresión a la que estuvieron sometidas las columnas de hormigón armado durante las pruebas de campo, guardan una influencia significativa en el comportamiento cuando estos elementos estructurales se someten a cargas inducidas por explosión transversal, en tal virtud esta condición no debe ser despreciada e incluso si la carga

axial real sobre la columna es menor que la mitad de su carga axial de equilibrio, se traduce en una reducción significativa de su capacidad de soportar el impulso provisto por la explosión, en comparación con su capacidad bajo flexión pura; esto es contrario a la respuesta de las columnas bajo cargas combinadas de flexión y axial cuando se someten a cargas cuasi-estáticas; además, se observó que, para las cargas explosivas que producen presiones con picos muy altos, las columnas son propensas a fallas directas por cizallamiento. (Astarlioglua, S. et al., 2013)

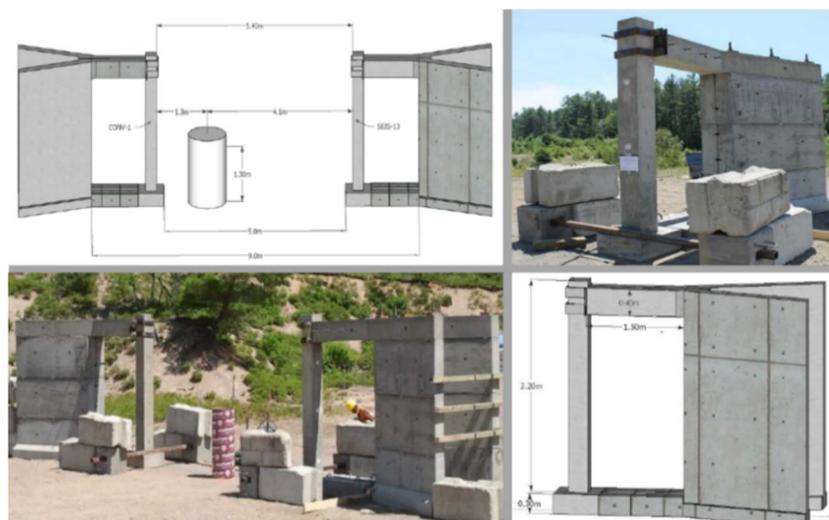


**Figura 4** Experimentación en columnas HA / Mallado en ABAQUS  
Fuente: (Astarlioglua, S. et al., 2013) / (Crawford, J.E. et al., 2001)



**Figura 5** Diagrama de presión-impulso para diferentes niveles de carga axial  
Fuente: (Astarlioglua, S. et al., 2013)

(Siba, 2014) en su investigación experimental, abordó el estudio de los efectos de la carga explosiva cercana en columnas diseñadas y construidas con diferentes armados de refuerzo transversal y tipo de hormigón armado (convencional, pres tensado y post tensado); posterior a su construcción los elementos fueron sometidos a pruebas destructivas utilizando material explosivo a campo abierto en la Base Petawawa del Ejército de Canadá. Para lo cual el autor concibió inicialmente una estructura robusta en hormigón post tensado compuesta de 8 módulos y modelada como un muro en voladizo, además fue diseñada contra efectos de vuelco y deslizamiento, limitando al mismo tiempo las tensiones de flexión; cuyo propósito fue generar condiciones de empotramiento y sostenimiento para el desarrollo de la experimentación, como se presenta en la Figura 6 y Figura 7.



**Figura 6** Estructura de soporte modelada con columna pegada.  
Fuente: (Siba, 2014)



**Figura 7** Ensayos destructivos realizados en elementos tipo Columna HA.  
Fuente: (Siba, 2014)

El estudio analizó los efectos 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 (Regla de Hopkinson-Cranz), mismo se encuentra expresado en función de la distancia de aplicación del explosivo hasta la columna sobre la raíz cubica del peso neto del explosivo en kilogramos de TNT. 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)

Según (Li, J. et al., 2015) estudió los efectos de las cargas explosivas en losas de hormigón armado mediante pruebas experimentales y simulación numérica. Las pruebas experimentales se efectuaron sobre elementos construidos a escala real en hormigón armado (convencional y de alto rendimiento); en las pruebas de campo se ubicó a las probetas de ensayo bajo la condición de apoyo simple; además se varió la cantidad de material explosivo y su colocación fue directamente sobre la superficie de las losas para analizar la degradación de los materiales.



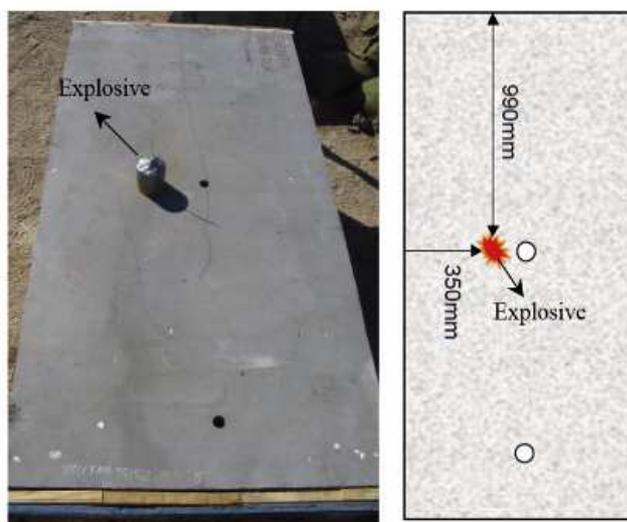
**Figura 8** Pruebas del sistema de instalación y soporte.

Fuente: (Li, J. et al., 2015)

La simulación numérica fue desarrollada para reproducir la respuesta estructural de las losas de hormigón armado bajo diversas condiciones de carga explosiva, mediante un modelo en elementos finitos en el software LS-DYNA. Los

resultados de la simulación numérica y de los ensayos experimentales, mostraron un mejor desempeño de resistencia a la explosión en losas construidas con hormigón de alto rendimiento. La Figura 9, muestra un ensayo realizado en una losa de hormigón armado simplemente apoyada en sus extremos y armada en los dos sentidos.

- Losa apoyada en los extremos con la carga explosiva antes del ensayo:



**Figura 9** Previo ensayo para determinar desprendimiento de materiales.  
Fuente: (Li, J. et al., 2015)

- Cara superior e inferior después del ensayo destructivo:



**Figura 10** Ensayo de materiales y simulación con el hidro-código LS-DYNA.  
Fuente: (Li, J. et al., 2015)

## **1.4 Justificación e Importancia**

En relación con el tema en estudio no existen investigaciones y procedimientos al respecto en el Ecuador, pero sí experimentos en varios países, sin embargo, es preciso considerar que la tecnología, normativas y materiales que se utiliza, difieren con las nuestras, en este contexto se requiere conocer el comportamiento de los materiales bajo consideraciones, parámetros y normativas nacionales.

La importancia de emplear procesos de derrocamiento en edificaciones utilizando explosivos, implica simplificar metodologías constructivas y optimizar el empleo de personal, materiales y equipos; variables vinculadas a disminuir costos; además prioriza la aplicación de tecnología y productos nacionales, entre los cuales destaca el material explosivo, que se fabrica, importa, comercializa y utiliza en el país.

Esta investigación procura contribuir al estudio de los efectos de las cargas explosivas en elementos estructurales desde un análisis académico investigativo y de aporte a la seguridad y defensa, como también impulsar la generación de conocimiento sobre demoliciones controladas, dicha motivación se vincula con el progreso urbanístico de las ciudades que promulgan el desarrollo para la construcción de edificaciones inteligentes y a gran altura.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

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.

### **1.5.2 Objetivo Específicos**

- Diseñar y construir según parámetros vigentes en la norma ecuatoriana de la construcción NEC-15, probetas tipo columna de hormigón armado de sección cuadrada de dimensiones: (30 x 30) cm, longitud 0.50 m, resistencia de hormigón de: (210 y 280) kg/cm<sup>2</sup> y cuantía del 2 %.
- Realizar ensayos con cargas explosivas en probetas tipo columna de hormigón armado de sección cuadrada de dimensiones: (30 x 30) cm, longitud 0.50 m, resistencia de hormigón de: (210 y 280) kg/cm<sup>2</sup> y cuantía del 2 %.
- Aplicar detonaciones explosivas, sobre una cara y a media longitud de las probetas tipo columna de hormigón armado construidas y variar la cantidad del explosivo en cada ensayo.
- 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).
- Establecer curvas de daño por impacto explosivo, en base a los resultados de los modelos teóricos y ensayos experimentales realizados en las probetas tipo columna de hormigón armado.
- Diseñar según parámetros vigentes en la NEC-15, probetas tipo columna de hormigón armado de sección cuadrada, de dimensiones: (30 x 30, 40 x 40 y 50 x 50) cm, longitud 2.50 m, resistencia de hormigón de: (210 y 280) kg/cm<sup>2</sup> y cuantía del 1.5%.
- Implementar un mecanismo de ensayo para las probetas tipo columna de hormigón armado, a fin de someter su trabajo a esfuerzos de compresión.

## **1.6 Área de Influencia**

El área de aplicación de este trabajo de titulación es a nivel: local, regional y nacional, donde el estudio de las demoliciones controladas, proyectan ser un soporte en la investigación, innovación y transferencia de tecnología para el desarrollo de las líneas de investigación de seguridad y defensa; estructuras y construcciones, entre otras, que se correlacionen al área de conocimiento.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Material explosivo

##### 2.1.1 Definiciones

###### 2.1.1.1 Explosivo

Se entiende por explosivo 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)

###### 2.1.1.2 Mezcla Explosiva

Se denomina así aquella sustancia en cuya composición entra a formar parte dos o más ingredientes. Las mezclas pueden clasificarse en tres tipos. Mezclas explosivas propiamente dichas, que son la unión de sustancias que aisladamente no tienen carácter explosivo pero que reunidas sí lo poseen. Mezclas explosivas de una sustancia explosiva con una o varias materias que no son explosivas. Mezcla de dos o más explosivos, acompañados o no por sustancias no explosivas. (Mora, 2013)

###### 2.1.1.3 Reacción explosiva (Blast)

Se entiende por reacción explosiva o explosión al fenómeno en el cual existe una liberación de grandes cantidades de energía de forma instantánea, dando lugar a la producción de un gran volumen de gases que se acumula en forma de energía cinética-molecular a elevada presión y temperatura siendo capaz de convertirse en trabajo

mecánico; este fenómeno está acompañado de ruido, efectos luminosos y mecánicos violentos de carácter vibratorio. (Akhavan, 2004)

La liberación abrupta de energía se puede disipar en forma de ondas de choque, propulsión de fragmentos, o por la emisión de radiación térmica y ionizante. Entre sus características podemos citar: gran velocidad de reacción, transformación total o parcial en gases y gran desprendimiento de calor debido a la reacción exotérmica. Sobre esta definición se puede a su vez clasificar las explosiones en nucleares, químicas y físicas o mecánicas. (Mora, 2013)

En la fase final de la reacción explosiva la masa de gas y aire se enfrían, en tal virtud la presión cae por debajo de la presión atmosférica, antes de que regrese a un estado de equilibrio donde no hay gas o aire que se aleje de la fuente. La presión de caída por debajo de la presión atmosférica es el resultado de que las moléculas de gas tienen una cierta cantidad de momento cuando la presión vuelve a cero y se genera una presión negativa e invierte la dirección del flujo hacia la fuente para conseguir un estado de equilibrio. (Mays & Smith, 1995) (Smith & Hetherington, 1994)

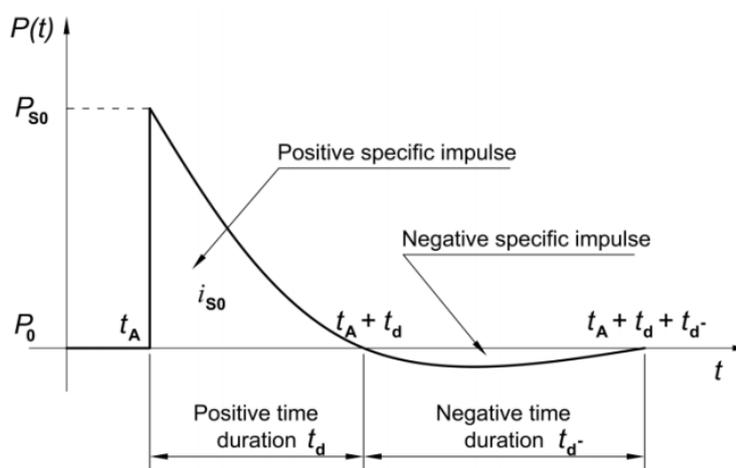
#### **2.1.1.4 Descomposición del explosivo**

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)

#### **2.1.1.5 Onda expansiva / Onda de choque**

Se denomina así al frente de choque que producto de la reacción explosiva se desplaza delante de la masa comprimida de gases calientes propagados en forma radial e intensa sobre el aire circundante fuera del volumen que ocupan. La onda expansiva se caracteriza por un aumento casi instantáneo de la presión ambiente a una presión máxima de incidencia y contiene la mayor parte de la energía liberada por la explosión.

La onda expansiva se desplaza hacia fuera desde la fuente y la presión del aire en el frente de la onda expansiva disminuye con la distancia a una velocidad mayor a la velocidad del sonido. Moléculas de gas que componen el movimiento frontal se desplazan a velocidades más bajas. Esta velocidad, que se llama "velocidad de partícula", está asociada con la "presión dinámica", o la presión formada por los vientos producidos por el frente de choque. (Smith & Hetherington, 1994)

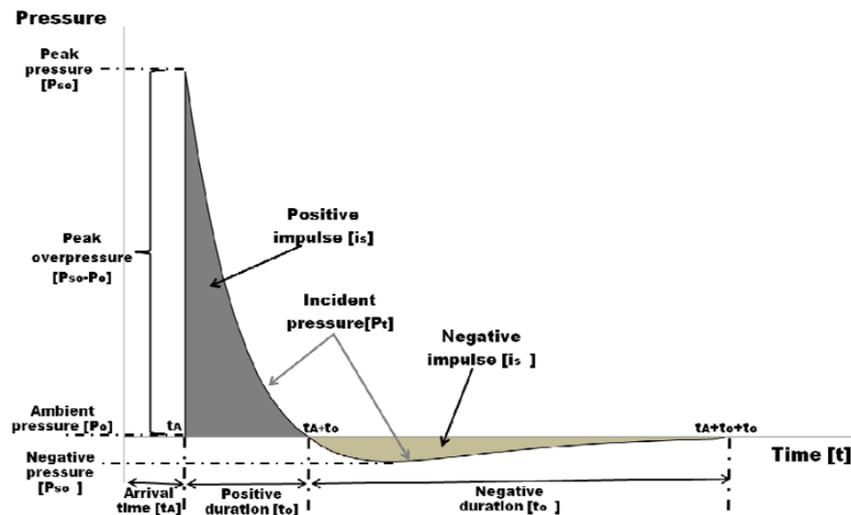


**Figura 11** Gráfica presión-tiempo de una onda expansiva  
Fuente: (Trajkovski, J. t al., 2014)

Dentro de las características de la onda expansiva (ver Figura 11), la presión incidente llega instantáneamente al valor máximo a una cierta distancia en un lapso, después de lo cual disminuye exponencialmente. El área (bajo y sobre) la curva presión-tiempo representa el impulso específico. El impulso específico positivo (fase positiva) constituye el área bajo la curva que representa la disminución de presión desde su valor máximo hasta alcanzar la presión ambiente, en esta fase se produce el daño estructural. El impulso específico negativo (fase negativa) constituye el área sobre la curva que representa la disminución de presión desde la presión ambiente, alcanza la presión máxima negativa para posteriormente estabilizarse en la presión ambiente; este impulso es más largo que el impulso positivo, sin embargo, es un valor despreciable por su pequeño tamaño. (Karlos, V. & Solomos, G., 2013)

La Figura 12 muestra otro perfil idealizado de la presión y el tiempo para el caso de una onda expansiva a cielo abierto; la velocidad de propagación de la onda de

choque disminuye con el aumento de la distancia desde el centro de detonación. Durante el desarrollo del impulso específico negativo se produce un efecto de succión en la estructura razón por la cual los fragmentos de vidrio desde el interior son expulsados fuera. (Karlos, V. & Solomos, G., 2013)



**Figura 12** Historia ideal del tiempo de presión de la onda expansiva  
Fuente: (Karlos, V. & Solomos, G., 2013)

Si la onda expansiva golpea un objeto en su trayecto genera una presión reflejada que constituye dos a ocho veces más fuerte que la presión incidente, esto es debido a que las partículas en el frente de la onda expansiva son detenidas por la estructura, pero todavía se ven obligados a avanzar por las partículas que vienen por detrás. Mediante la ecuación (2.1-1) Friedlander (Baker W. E., 1973), se propone la medición del fenómeno de presión. A través de la ecuación (2.1-2) se puede calcular el impulso positivo analíticamente y así resolver de forma iterativa el parámetro de decaimiento “b” cuando los valores ( $P_{so}$ ,  $t_o$ ) son conocidos a partir de datos experimentales. (Trajkovski, J. t al., 2014) (Foglar, M. & Kovar, M., 2013)

$$P_s(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_o}\right) e^{-b \frac{t}{t_o}} \quad (2.1-1)$$

$$i_s = \frac{P_{so} t_o}{b^2} (b - 1 - e^{-b}) \quad (2.1-2)$$

### 2.1.2 Clasificación de los explosivos

Las Naciones Unidas a través de la guía técnica de munición internacional IATG 01.50, instauró un sistema internacional que clasifica explosivos y municiones; a pesar de que esta normativa fue elaborada inicialmente para mitigar acciones en el transporte de mercancías peligrosas, en la actualidad muchos países han aplicado los principios como base para una evaluación simplificada de peligros y riesgos relacionados al almacenamiento, movimiento de municiones y explosivos. Esta guía técnica no toma en cuenta la probabilidad de un incidente; sin embargo, supone que si puede suceder lo hará, y cuando esto ocurra, identifica la extensión de los peligros. (ODA-UN, 01.50, 2015)

La guía técnica propone la clasificación en dos aristas. Clasificación por División de Peligros (Hazard Divisions), esta categorización indica el tipo de peligro que se espera principalmente en caso de un accidente que involucre una cantidad de munición. Clasificación por Grupo de Compatibilidad (Compatibility Group), esta categorización está diseñada para minimizar el riesgo de almacenar elementos que tengan un alto riesgo de accidentes o, para una cantidad determinada, la magnitud de los efectos de tal accidente. Es así como de acuerdo con el protocolo técnico contemplado en el numeral 6.1 “Hazard Divisions” y 6.2 “Compatibility Group” del código en referencia, se describe en detalle su correspondiente estructuración. (ODA-UN, 01.50, 2015)

En base a la clasificación de explosivos establecido en el Manual del vigilante de explosivos, (Mora, 2013), determina una categorización que contiene una división y subdivisión de explosivos a través de materias explosivas (materia prima) y objetos explosivos, estos últimos constituyen aquellas substancias que contienen una o varias materias explosivas (ver Tabla 1).

**Tabla 1**  
Clasificación de material explosivo

CLASIFICACIÓN	SUB-CLASIFICACIÓN
<b>MATERIAS EXPLOSIVAS</b>	1.1 Explosivos iniciadores
	1.2 Explosivos rompedores
	1.2.1 Sustancias explosivas
	1.2.2 Mezclas explosivas
	1.2.2.1 Explosivos tipo A (dinamitas)
	1.2.2.2 Explosivos tipo B-a (amonales)
	1.2.2.3 Explosivos tipo B-b (nafos)
	1.2.2.4 Explosivos tipo C (cloratitas)
	1.2.2.5 Explosivos tipo D (explosivos plásticos)
	1.2.2.6 Explosivos tipo E-a (hidrogeles)
	1.2.2.7 Explosivos Tipo E-b (emulsiones)
	1.3 Explosivos propulsores
	1.3.1 Pólvoras negras
	1.3.2 Pólvoras sin humo
Otros explosivos propulsores	
1.4 Otras materias explosivas	
<b>OBJETOS EXPLOSIVOS</b>	2.1 Mechas
	2.1.1 Mechas Lentas
	2.1.2 Mechas Rápidas
	Otras Mechas
	2.2 Cordones detonantes
	2.2.1 Cordones detonantes Flexibles
	2.2.2 Cordones detonantes Perfilados
	Otros cordones detonantes
	2.3 Detonadores
	2.3.1 Detonadores de mecha
	2.3.2 Detonadores eléctricos
	2.3.3 Otros detonadores
	2.3.4 Relés
	Otros sistemas de Inclinación
2.4 Multiplicadores	
2.4.1 Multiplicadores sin detonador	
2.4.2 Multiplicadores con detonador	
Otras cargas explosivas	
Otros objetos explosivos	

Fuente: (Mora, 2013)

### 2.1.3 Clasificación de explosiones en estructuras

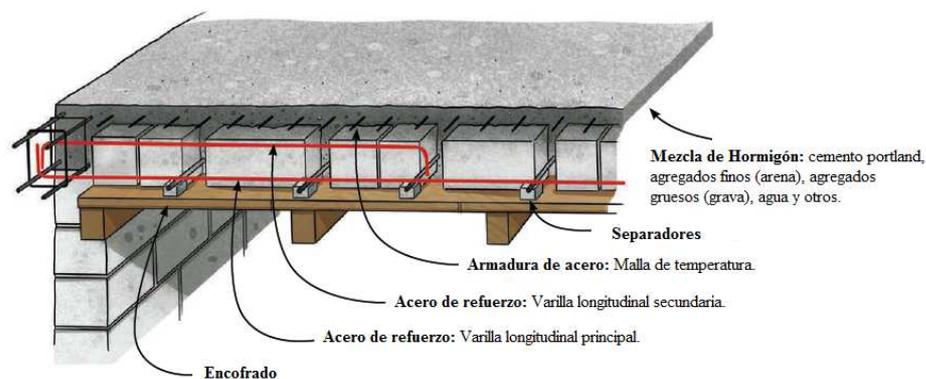
La incidencia de cargas explosivas en edificaciones categoriza a las explosiones en confinadas y no confinadas. Las explosiones confinadas se producen cuando la explosión se inicia dentro de una edificación y la reacción explosiva se puede

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)

## 2.2 Elementos de hormigón armado bajo cargas convencionales

### 2.2.1 Consideraciones preliminares



**Figura 13** Hormigón armado empleado en la construcción de losa alivianada.  
Fuente: (COSUDE. et al., 2017)

La literatura define al hormigón armado como un material en estado sólido, concebido desde un diseño normativo y reglamentado, compuesto por una armadura de acero confinada inicialmente en una mezcla con contextura líquida-sólida debidamente dosificada en función de las características propias de sus componentes: cemento portland, agregados finos (arena), agregados gruesos (grava), agua, entre

otros; que luego de procesos químico-físicos de fraguado, endurecimiento y demás, forman un módulo compacto semejante a una roca artificial que alcanza características mecánicas ideales, principalmente de resistencia a compresión y tracción, para conformar elementos estructurales como parte de una obra civil, (ver Figura 13).

### **2.2.2 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)

## **2.3 Elementos de hormigón armado bajo cargas explosivas (blast)**

### **2.3.1 Consideraciones preliminares**

Las instalaciones de almacenamiento y operación de material explosivo se diseñan para proporcionar un nivel predeterminado de protección contra los peligros de explosiones accidentales. El tipo de protección que se debe dar a cada estructura depende de dos aspectos: la amenaza y el riesgo vulnerable. Se clasifica como “amenaza” todo aquello que incide como factor de inseguridad en caso de una potencial detonación: cantidad, tipo y ubicación de los explosivos; mientras que se denomina “riesgo vulnerable”, todo aquello amenazado y que demanda un nivel de protección, tales como: personal, equipo u otros explosivos; en tal virtud las estructuras

con protección a explosiones deben resguardar y mitigar los efectos peligrosos a niveles que sean tolerables. (Army, U. S., 1990)

### **2.3.2 Modos de Comportamiento Estructural**

La respuesta de un elemento de hormigón armado puede expresarse en términos de dos modos de comportamiento estructural: dúctil y frágil. En el modo dúctil de respuesta, el elemento puede alcanzar grandes deflexiones inelásticas sin colapso total; mientras que, en el modo frágil, puede producirse una falla parcial o colapso total del elemento. El diseño de una edificación según los modos de comportamiento estructural debe considerar aspectos como: magnitud y duración del evento explosivo, generación de fragmentos primarios y finalmente nivel de protección requerido, el mismo que debe incluir un factor de seguridad adicional. (Army, U. S., 1990)

#### **2.3.2.1 Comportamiento Estructural del Hormigón Armado**

La influencia de cargas dinámicas en elementos de hormigón armado produce en su geometría longitudinal deflexiones de modo que la energía de deformación fluye para equilibrar la energía cinética producida por la carga explosiva (blast), así también la fragmentación del hormigón incide en el colapso parcial o total del elemento; cabe anotar que la deflexión máxima alcanzable en un elemento esta función de las características del mismo: longitud, profundidad, cuantía y detalles del diseño considerados para los estribos. (Army, U. S., 1990)

Para el modo dúctil de comportamiento dentro del rango cercano, se debe considerar que las detonaciones próximas producen una carga explosiva (blast) no uniforme y de alta intensidad; se desarrollan concentraciones extremadamente altas de presión localizada que a su vez inducen al fallo del elemento por efecto de (punzonamiento); en este caso es recomendable emplear estribos continuos tipo cordón para permitir grandes deflexiones necesarias para equilibrar la energía cinética producida. Dentro del modo de comportamiento frágil es común producirse tres tipos de fallo: desprendimiento directo, formación de escamas y fragmentos posteriores al

fallo. En el modo dúctil de comportamiento dentro del rango extremo, la distribución de la carga explosiva (blast), es uniforme y las deflexiones necesarias para contrarrestar estas sollicitaciones de carga son relativamente pequeñas, es así como las armaduras de acero convencionalmente armadas tienen un adecuado desempeño. (Army, U. S., 1990)

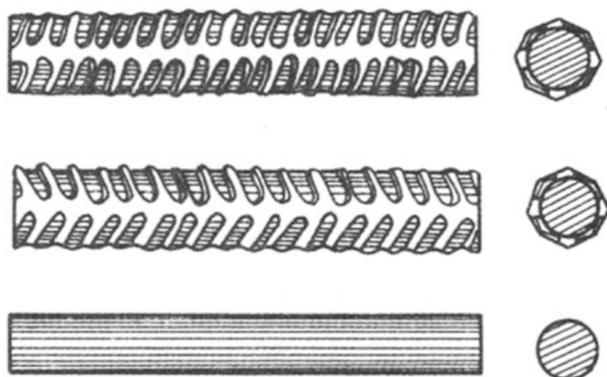
### **2.3.3 Resistencia dinámica de los materiales**

El comportamiento estructural en elementos sometidos a cargas explosivas (blast), depende directamente de la resistencia última y ductilidad de los materiales, es así que la resistencia requerida ante una misma carga será menor en un elemento dúctil (hormigón armado) a la necesaria en un elemento frágil (hormigón simple); este tipo de sollicitaciones de carga consideran a los elementos estructurales como mecanismos cargados dinámicamente cuya resistencia es mayor a la de un elemento similar sometido a una carga estática; este incremento en la resistencia se atribuye a la rápida deformación unitaria producida en los materiales, por cuanto a mayor deformación unitaria, mayor es la resistencia a la compresión del hormigón armado, a su vez, mayor es la resistencia a la fluencia y resistencia última en la armadura de acero; este fenómeno se explica para calcular la resistencia dinámica última de los materiales a través de esfuerzos dinámicos. (Army, U. S., 1990)

#### **2.3.3.1 Acero de refuerzo**

Las barras de acero se pueden clasificar como barras planas y barras corrugadas de acuerdo con sus perfiles de superficie. Las barras corrugadas son las barras con nervios longitudinales y transversales enrollados en las superficies (a veces sin nervios longitudinales). Las nervaduras, pueden tener la forma de una espiral, chevron o media luna, etc. (ver Figura 14), pueden aumentar eficazmente la unión entre las barras de acero y el hormigón. El área de la sección transversal de una barra corrugada varía con su longitud, de modo que el diámetro de la barra deformada es una dimensión nominal, es decir, un diámetro equivalente es el mismo que el de una barra llana de peso idéntico. Los diámetros de las barras lisas son 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 y 22 mm,

mientras que los diámetros de las barras corrugadas son 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40 y 50 mm. (X. Gu et al., 2016)



**Figura 14** Perfiles de superficies de barras de acero  
Fuente: (X. Gu et al., 2016)

Se considera que el acero de refuerzo, designado por la sociedad americana de ensayos y material (ASTM) como A 615, Grado 60, según restricciones (ver Tabla 2) es óptimo para diseños a cargas explosivas (blast), la ductilidad de estas barras se reduce en los tramos donde existen dobleces y empalmes, por lo que se debe limitar este tipo de anclajes sobre puntos de máximos esfuerzos; en caso de disponer acero de refuerzo con propiedades químicas similares y rendimiento mínimo de 75.000 psi; se debe restringir su uso en zonas destinadas a obtener una respuesta elástica o ligeramente plástica. Es preciso considerar en el acero de refuerzo la relación:  $\frac{X_m}{X_E} \leq 3$ ; donde  $X_m$ , es la deflexión máxima transitoria (pulgadas, in) y  $X_E$ , representa la deflexión elástica equivalente (in). Los estándares ASTM, recomienda para el acero de refuerzo A 615, Grado 60, los siguientes valores de diseño; resistencia a la fluencia ( $f_y$ ) 66.000 psi y resistencia última ( $f_u$ ) 90.000 psi. (Army, U. S., 1990)

**Tabla 2**

Tamaños de barras de acero A 615, Grado 60 (ASTM)

Barra de Acero	Observación
$BA \leq N_o 11$	Ductilidad adecuada
$BA = N_o 14$	Adecuada con requerimientos especiales de espaciamento y anclaje

*Continúa...*

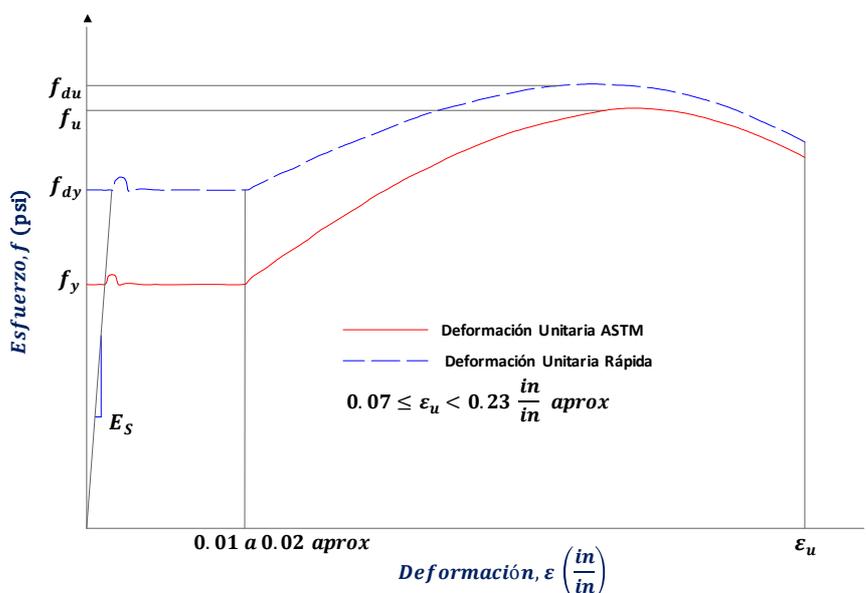
BA  $\geq N_o$  18 No recomendadas

Fuente: (Army, U. S., 1990)

### 2.3.3.2 Hormigón

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)

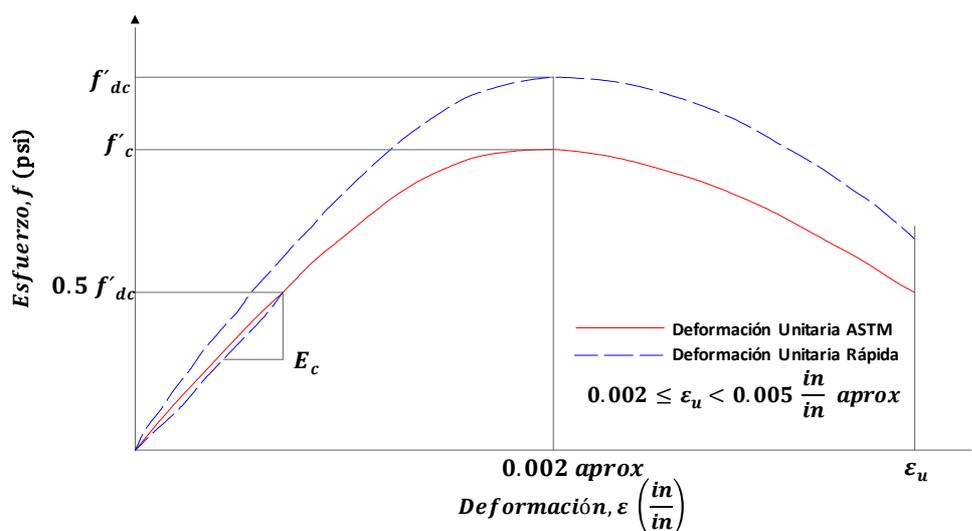
### 2.3.3.3 Curva Esfuerzo – Deformación



**Figura 15** Curva (esfuerzo – deformación) acero de refuerzo

Fuente: (Army, U. S., 1990)

Las Figura 15 y Figura 16, muestran curvas características para hormigón y acero de refuerzo. Las curvas con línea roja continua representan la relación (esfuerzo – deformación) de los materiales cuando se ensayan en función de la deformación y porcentajes de carga, descritas en la norma ASTM (American Society for Testing and Materials). A una alta deformación unitaria su resistencia es mayor, como se muestra mediante las curvas trazadas con línea azul entrecortada. (Army, U. S., 1990)



**Figura 16** Curva (esfuerzo – deformación) hormigón  
Fuente: (Army, U. S., 1990)

En cuanto a la deformación unitaria típica en elementos de hormigón armado sometidos a cargas explosivas (blast), es fundamental identificar el incremento de la resistencia a la fluencia del acero de refuerzo, y la resistencia a compresión del hormigón, en cuanto a la resistencia última del acero de refuerzo se observa que el incremento es leve y la deformación a la que se produce este esfuerzo se reduce ligeramente. No existe ningún cambio con la deformación unitaria en los módulos de elasticidad y deformación de rotura del acero de refuerzo. En el caso del hormigón, a medida que aumenta la deformación unitaria, el módulo de elasticidad aumenta ligeramente, la deformación al máximo esfuerzo y rotura permanecen casi constantes. (Army, U. S., 1990)

#### 2.3.4 Propiedades de los materiales (estática)

### 2.3.4.1 Módulo de Elasticidad

Para el cálculo del módulo de elasticidad del hormigón  $E_c$ , se utiliza la ecuación:  $E_c = 33 (w_c^{1.5}) (f'_c)^{0.5}$ , es importante señalar que  $w_c$  constituye el peso unitario del hormigón el mismo que normalmente equivale a  $150 \left(\frac{lb}{ft^3}\right)$ . En relación con el módulo de elasticidad del acero  $E_s$ , se utiliza el valor de  $29 \times 10^6$  (*psi*). La relación modular viene dada en función del módulo de elasticidad del acero y el hormigón según la expresión  $n = \frac{E_s}{E_c}$ , cuyo valor adimensional puede tomarse con el número entero más cercano. (Army, U. S., 1990)

### 2.3.4.2 Módulo de Inercia

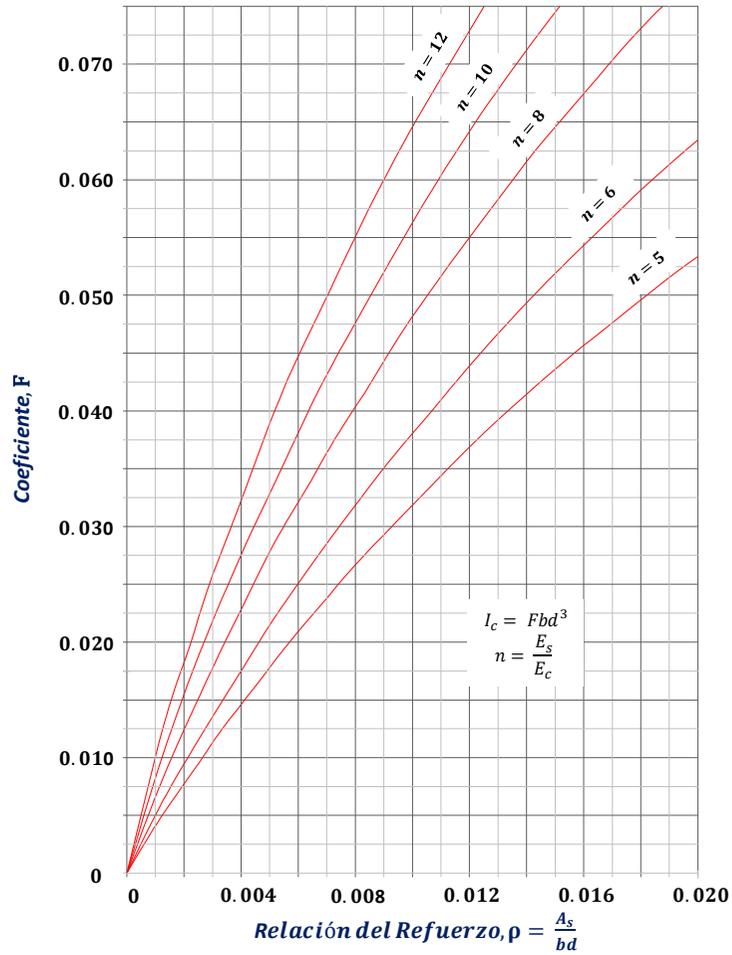
Para determinar la deflexión en elementos de hormigón armado dentro de los rangos elástico y elasto plástico se complica por el hecho de que el momento efectivo de inercia de la sección transversal a lo largo del elemento cambia a medida que avanza el agrietamiento, aún más por el hecho de que el módulo de elasticidad del hormigón cambia a medida que aumenta el esfuerzo. Se recomienda que el cálculo de deflexiones a lo largo de este volumen se base en relaciones empíricas a partir de datos de prueba; (ver Figura 17 y Figura 18) para cálculo de momentos. (Army, U. S., 1990)

**Tabla 3**

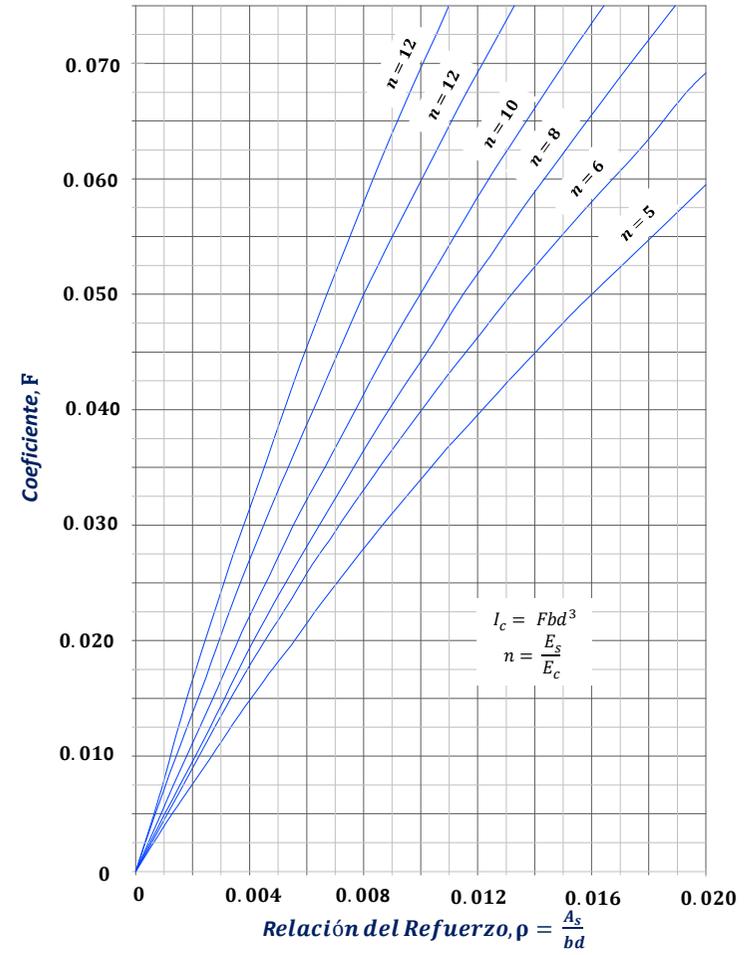
Ecuaciones para determinar momentos de inercia

Ecuación		Observación
$I_a = \frac{I_g + I_c}{2}$	(2.3-1)	Para cálculos de deflexión
$I_g = \frac{b T_c^3}{12}$	(2.3-2)	Para el diseño de vigas, se considera toda la sección transversal
$I_c = Fbd^3$	(2.3-3)	
$I_g = \frac{T_c^3}{12}$	(2.3-4)	Para el diseño de las losas, se considera un ancho mínimo de la sección transversal
$I_c = Fd^3$	(2.3-5)	

Fuente: (Army, U. S., 1990)



**Figura 17** Coef momento inercia, secc. agrietadas, armadura de tracción  
Fuente: (Army, U. S., 1990)



**Figura 18** Coef momento inercia, secc. agrietadas igual refuerzo en caras opuestas  
Fuente: (Army, U. S., 1990)

El momento de inercia de la sección de hormigón agrietado considera el hormigón a compresión y las áreas de acero transformadas en áreas de hormigón equivalente y se calcula sobre el centroide de la sección transformada. El coeficiente (F) varía como la relación modular (n) y la cantidad de refuerzo en la sección. Para secciones con solo armadura de tracción, el coeficiente (F) se obtiene según la Figura 17, mientras que, para secciones con igual refuerzo en la cara opuesta, el coeficiente (F) se obtiene en función de la Figura 18. (Army, U. S., 1990)

### 2.3.5 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 4. (Mays & Smith, 1995)

**Tabla 4**  
Factores de incremento dinámico (DIF)

<b>Factores de incremento dinámico (DIF)</b> <b>para el diseño de elementos de hormigón armado y de acero estructural</b>					
<b>Tipo de Esfuerzo</b>	<b>Hormigón armado</b>	<b>Barras de acero de refuerzo</b>		<b>Acero Estructural</b>	
	$f'_{dc} / f'_c$	$f_{dy} / f_y$	$f_{du} / f_y$	$f_{dy} / f_y$ *	$f_{du} / f_y$
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	xxx	1.10	xxx

\* 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, (ver Tabla 5).

**Tabla 5**  
Criterios típicos de fallo para elementos estructurales

ELEMENTO	MATERIAL	FALLA	CRITERIO DE FALLA	DAÑO		
				Ligero	Moderado	Severo
Vigas	Hormigón armado ( $\rho > 0,5\%$ / cara)	Flexión global / reacción membrana	Relación entre la deflexión central y la luz del elemento, $\delta / L$	4%	8%	15%
		Corte	Deformación por esfuerzo cortante promedio a través de la sección, $\gamma_v$	1%	2%	3%
	Acero	Flexión / Membrana	Deformación a mitad del tramo debido a la flexión $\delta/L$	5%	12%	25%
		Corte	$\delta/L$	2%	4%	8%
Losas	Hormigón armado ( $\rho > 0,5\%$ / cara)	Flexión / Membrana	$\delta/L$	4%	8%	15%
		Corte	$\gamma_v$	1%	2%	3%
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%

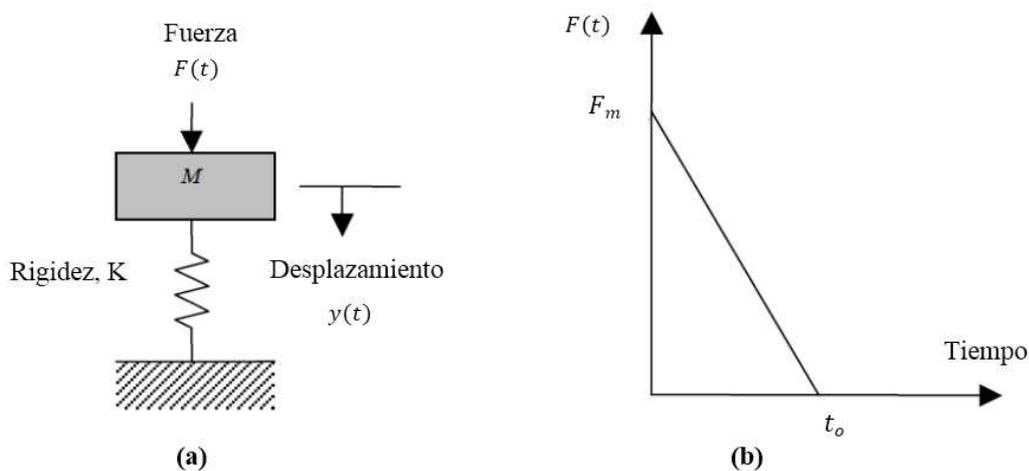
Fuente: (Conrath, E. et al., 1999)

## CAPÍTULO III

### MODELO MATEMÁTICO

#### 3.1 Análisis del sistema de un grado de libertad

Para obtener un modelo estructural de la fuerza actuante de impacto sobre el elemento, es indispensable el uso de un sistema equivalente generado por la concentración de la masa total en un solo punto con su respectiva rigidez, con el fin de idealizar el comportamiento de la estructura ante la sollicitación de carga explosiva; de la misma forma se toma como fuerza aplicada a una ecuación en función del tiempo producida en el periodo positivo de la explosión, para simplificar los cálculos se determina como triangular la tendencia hasta llegar a una fuerza de cero en un tiempo corto determinado menor a un segundo; en la siguiente figura se muestra el esquema idealizado de la estructura y la carga. (Ngo, T. et al., 2007)



**Figura 19** Sistema SDOF y fuerza explosiva equivalente  
Fuente: (Ngo, T. et al., 2007)

Para la resolución del modelo matemático se considera el uso de la ecuación diferencial de movimiento expresada e igualada a la expresión de la fuerza equivalente del explosivo en función del tiempo, ver ecuación (3.1-1); en este caso se considera el

amortiguamiento “c” el valor de cero, debido al tipo de carga y elemento. La ecuación equivalente de la carga tiene en cuenta el pico máximo expresado como fuerza máxima “Fm”, durante el tiempo de ocurrencia del impulso positivo, ver la ecuación (3.1-2).

$$M\ddot{y} + Ky = F(t) \quad (3.1-1)$$

$$F(t) = F_m \left(1 - \frac{t}{t_o}\right) \quad (3.1-2)$$

Al igualar las ecuaciones: (3.1-1) y (3.1-2), obtenemos una ecuación simplificada (3.1-3), la misma que es utilizada para determinar el desplazamiento en función de tiempo; al resolver esta ecuación de segundo orden mediante transformada de Laplace, se obtiene la expresión (3.1-4), de donde al despejar  $x(s)$  se obtiene la ecuación (3.1-5), la misma que simplificada se detalla en la ecuación (3.1-6).

$$M\ddot{y} + Ky = F_m \left(1 - \frac{t}{t_o}\right) \quad (3.1-3)$$

$$(M s^2 + K)x(s) = \frac{F_m}{s} - \frac{F_m}{t_o s^2} \quad (3.1-4)$$

$$x(s) = \frac{F_m}{s(M s^2 + K)} - \frac{F_m}{t_d s^2(M s^2 + K)} \quad (3.1-5)$$

$$x(s) = \frac{F_m}{M} * \frac{1}{s \left(s^2 + \frac{K}{M}\right)} - \frac{F_m}{t_d M} \frac{1}{s^2 \left(s^2 + \frac{K}{M}\right)} \quad (3.1-6)$$

La expresión matemática descrita en la ecuación (3.1-7), obtenida de relaciones de variables, se reemplaza en la ecuación (3.1-6), de esta forma se obtiene la ecuación

(3.1-8). La frecuencia natural de vibración se especifica en la ecuación (3.1-9), definida en literaturas que estudian el comportamiento dinámico de estructuras (Weaver & Johnston, 1987), la misma que al reemplazar en la expresión (3.1-8), se obtiene la ecuación (3.1-10), cuya expresión simplificada se detalla en las ecuaciones (3.1-11) y (3.1-12); de esta última expresión se reemplaza con la inversa de la transformada de Laplace para obtener la ecuación (3.1-13), que constituye el desplazamiento en función del tiempo; expresión que simplificada se detalla en la ecuación (3.1-14).

$$\frac{1}{M} = \frac{\sqrt{K}}{\sqrt{KM}} \quad (3.1-7)$$

$$x(s) = \frac{F_m}{\sqrt{KM}} * \frac{\sqrt{K}}{s(s^2 + \frac{K}{M})} - \frac{F_m}{t_o \sqrt{KM}} * \frac{\sqrt{K}}{s^2(s^2 + \frac{K}{M})} \quad (3.1-8)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3.1-9)$$

$$x(s) = \frac{F_m}{\sqrt{KM}} * \frac{\omega}{s(s^2 + \omega^2)} - \frac{F_m}{t_o \sqrt{KM}} * \frac{\omega}{s^2(s^2 + \omega^2)} \quad (3.1-10)$$

$$x(s) = \frac{F_m}{\sqrt{KM} * \omega} * \frac{\omega * \omega}{s(s^2 + \omega^2)} - \frac{F_m}{t_o \sqrt{KM} * \omega^2} * \frac{\omega * \omega^2}{s^2(s^2 + \omega^2)} \quad (3.1-11)$$

$$x(s) = \frac{F_m}{K} * \frac{\omega^2}{s(s^2 + \omega^2)} - \frac{F_m}{t_o K \omega} * \frac{\omega^3}{s^2(s^2 + \omega^2)} \quad (3.1-12)$$

$$y(t) = \frac{F_m}{K} * (1 - \cos \omega t) - \frac{F_m}{t_o K \omega} * (\omega t - \text{sen } \omega t) \quad (3.1-13)$$

$$y(t) = \frac{F_m}{K} * (1 - \cos \omega t) + \frac{F_m}{t_o K} * \left( \frac{\text{sen } \omega t}{\omega} - t \right) \quad (3.1-14)$$

### 3.2 Presión del explosivo en función del material

En lapso que transcurre el efecto blast, la presión inicial liberada en forma de energía impacta el centro de la probeta, es así como la presión de detonación es máxima en este punto; una adecuada forma del explosivo contribuirá en amplificar la presión y evitar pérdidas hacia otras direcciones; otro aspecto de incidencia es la cantidad de calor que induce la reacción química, suceso que eleva instantáneamente la temperatura en la zona de impacto y la desfragmentación del material; estas dos ocurrencias dependen directamente la cantidad aplicada de explosivo, situación que permite evaluar la injerencia del explosivo en el comportamiento de los materiales.

Para establecer un modelo matemático que integre la acción de los materiales durante la ejecución del fenómeno físico, es importante conocer el comportamiento de la carga con explosivo (PENTOLITA) 50/50, a través del desarrollo de la presión de detonación (PD), cuya expresión matemática relaciona la densidad del explosivo y la velocidad de detonación ver ecuación (3.2-1); al desarrollar esta igualdad se resumen los valores de la Tabla 6. (Rincón, J. et al., 2015)

$$PD = K_{exp} * DENS_{exp} * VOD_{exp}^2 \quad (3.2-1)$$

**Tabla 6**  
Variables para determinar la presión de detonación, (PENTOLITA)

Variable	Valor
$K_{exp}$	$\frac{10^{-3}}{4}$ MPa
$DENS_{exp}$	$1.6 \frac{g}{cm^3}$
$VOD_{exp}$	$6700 \frac{m}{s}$
$PD$	17956 MPa

Fuente: (Rincón, J. et al., 2015)

### 3.3 Curvas teóricas características

El estudio efectuado para levantar las curvas teóricas características que correlacionen la sección de hormigón armado y la cantidad de explosivo necesaria para fragilizar dichos elementos, se basó en el análisis del manual del ejército de los Estados Unidos de Norteamérica FM 3-34.214, (Section IV – Breaching Charges); las mismas que son utilizadas para destruir pilares de puentes y fortificaciones. El tamaño, la forma, la colocación y el apisonamiento son factores críticos para el éxito, ya que los objetivos a destruir son de gran volumen y resistencia. Las cargas de brechamiento (Breaching Charges) en elementos de hormigón armado no garantizan un corte en las barras de acero por lo que después de la detonación y según el caso se debe aplicar una carga explosiva adicional para generar el corte en estos materiales. (Army, U. S., 2007)

### 3.3.1 Curva Teórica I

Para establecer esta Curva Teórica I, se utilizó la expresión matemática descrita en la ecuación (3.3-1), referida del manual anteriormente mencionado, la misma que determina la cantidad de explosivo requerido en libras de TNT para romper el elemento a demoler según el tipo del material. En la Tabla 7, se describe el factor del material (K) y en la Figura 20 el factor de apisonamiento (C). (Army, U. S., 2007)

$$P = R^3 KC \quad (3.3-1)$$

**Tabla 7**

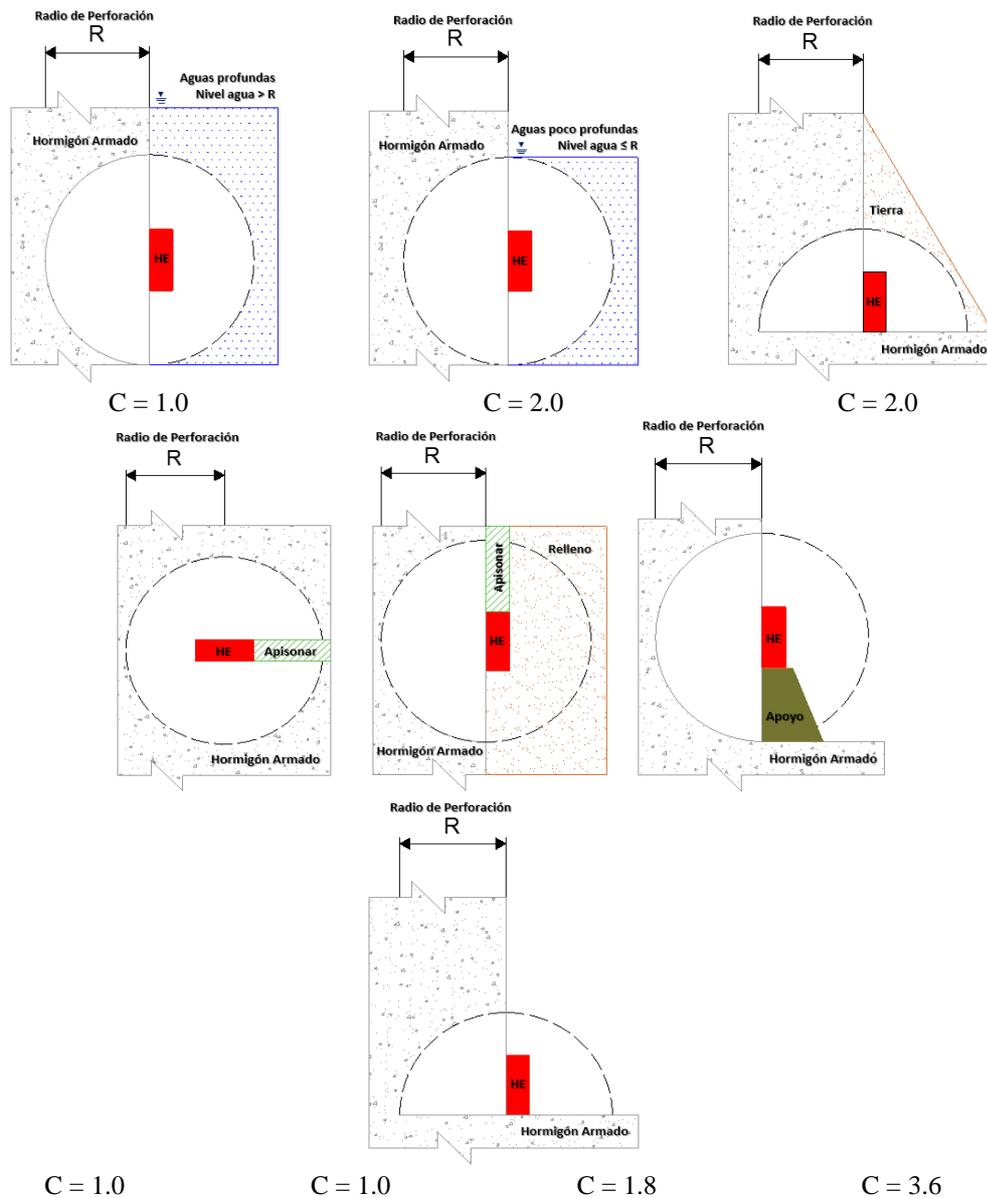
Factor (K) para cargas explosivas de apertura / perforación

Material	Radio de Perforación (R)	Factor K
Tierra	Todos los valores	0.07
Mampostería pobre, arcilla compacta, esquisto, madera buena, adobes	R < 1.5 m (5 ft)	0.32
	R ≥ 1.5 m (5 ft)	0.29
Mampostería buena, bloque de hormigón, roca	R < 0.3 m (1 ft)	0.88
	0.3 m (1 ft) ≥ R < 0.9 m (3 ft)	0.48
	0.9 m (3 ft) ≥ R < 1.5 m (5 ft)	0.40
	1.5 m (5 ft) ≥ R < 2.1 m (7 ft)	0.32
	R ≥ 2.1 m (7 ft)	0.27
Hormigón denso y mampostería de primera clase	R < 0.3 m (1 ft)	1.14
	0.3 m (1 ft) ≥ R < 0.9 m (3 ft)	0.62
	0.9 m (3 ft) ≥ R < 1.5 m (5 ft)	0.52

*Continúa...*

	$1.5\text{ m (5 ft)} \geq R < 2.1\text{ m (7 ft)}$	0.41
	$R \geq 2.1\text{ m (7 ft)}$	0.35
	$R < 0.3\text{ m (1 ft)}$	1.76
Hormigón armado (No considera el corte del acero)	$0.3\text{ m (1 ft)} \geq R < 0.9\text{ m (3 ft)}$	0.96
	$0.9\text{ m (3 ft)} \geq R < 1.5\text{ m (5 ft)}$	0.80
	$1.5\text{ m (5 ft)} \geq R < 2.1\text{ m (7 ft)}$	0.63
	$R \geq 2.1\text{ m (7 ft)}$	0.54

Fuente: (Army, U. S., 2007)



**Figura 20** Factor (C) para cargas explosivas de apertura / perforación  
Fuente: (Army, U. S., 2007)

En caso de aplicar cargas explosivas externas, el radio de perforación  $R$ , es igual al espesor del elemento a demoler. Si el explosivo se coloca en el centro de la masa, este radio es la mitad del espesor del elemento a demoler. Si la carga se coloca a menos de la mitad del grosor de la masa, el radio de perforación es la mayor distancia entre el centro de la carga y la superficie externa del objetivo. El factor material ( $K$ ) representa la resistencia y dureza del material del elemento a demoler; cuando el material no puede ser identificado, se debe asumir el material más resistente (hormigón armado). El factor de compactación o apisonamiento ( $C$ ) depende de la ubicación de la carga y de los materiales de apisonamiento utilizados. (Army, U. S., 2007)

El presente estudio abarca el análisis de cargas explosivas detonadas sobre elementos tipo columna de hormigón armado, utilizando el explosivo (PENTOLITA) 50/50, cuya velocidad de detonación es 6700 m/s, y densidad 1,6 g/cm<sup>3</sup>; la composición química de este tipo de explosivo configura un 50% de explosivo PETN {C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>N<sub>4</sub>O<sub>12</sub>} y un 50% de explosivo TNT {C<sub>7</sub>H<sub>5</sub>N<sub>3</sub>O<sub>6</sub>}. (Rincón, J. et al., 2015)

Para convertir el peso del explosivo de TNT a un peso equivalente en explosivo (PENTOLITA) 50/50 y viceversa, se utiliza la ecuación (3.3-2), según el reporte EUR 26456 EN de la Comisión Europea; la expresión matemática se basa en la relación del calor producido durante de la detonación; los valores de calor de detonación de algunos explosivos se describen en la Tabla 8. Para cada conversión se utiliza las ecuaciones simplificadas (3.3-4) y (3.3-5). (Karlos, V. & Solomos, G., 2013)

**Tabla 8**  
Valores de calor de detonación de explosivos

Name of Explosive	Heat of detonation [MJ/kg]
TNT	[4.10 - 4.55]
C-4	5.86
RDX	[5.13 - 6.19]
PETN	6.69
PENTOLITE 50/50	5.86
NITROGLYCERIN	6.30
NITROMETHANE	6.40
NITROCELLULOSE	10.60
AMON. / NIT. (AN)	1.59

Fuente: (Karlos, V. & Solomos, G., 2013)

$$W_{Pentolita} = W_{TNT} \frac{H_{d\ TNT}}{H_{d\ Pentolita}} \quad (3.3-2)$$

$$W_{Pentolita} = W_{TNT} \frac{4.325 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]}{5.860 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]} \quad (3.3-3)$$

$$W_{Pentolita} = W_{C4} = 0.738 W_{TNT} \quad (3.3-4)$$

$$W_{TNT} = 1.355 W_{Pentolita} = 1.355 W_{C4} \quad (3.3-5)$$

Para construir la curva teórica I, se consideró la aplicación de cargas explosivas externas de composición con explosivo (PENTOLITA) 50/50 gramos sobre un apoyo, correspondiendo el factor de apisonamiento el valor de 1.8; con respecto al radio de perforación, bajo la condición de apisonamiento impuesta este radio es igual al espesor del elemento de hormigón armado a demoler; en tal virtud se consideró secciones cuadradas, con lados iguales de las siguientes dimensiones: (25, 30, 35, 40, 45, 50, 55) cm; en cuanto al factor del material se asume el descrito para elementos de hormigón armado, siendo su valor de 1.76, en secciones menores a 30 cm y 0.96 en secciones mayores o iguales de 30 cm. En función a las condiciones de borde planteadas y de acuerdo con la ecuación (3.3-1), se presenta los resultados en la Tabla 9.

**Tabla 9**  
Análisis Curva Teórica I, según ecuación (3.3-1)

Ecuación (3.3-1)	Tipo Explosivo (PENTOLITA)	Factor C 1.8	TNT- PENTOLITA 0.739	libras - gramos 454.545
R (cm)	R (ft)	R <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> )	Factor K adimensional	$W_{Pentolita}$ (gr)
<b>25.00</b>	0.820	0.552	1.76	<b>587.121</b>
<b>30.00</b>	0.984	0.953	0.96	<b>553.389</b>
<b>35.00</b>	1.148	1.514	0.96	<b>878.761</b>
<b>40.00</b>	1.312	2.260	0.96	<b>1311.736</b>
<b>45.00</b>	1.476	3.218	0.96	<b>1867.687</b>
<b>50.00</b>	1.640	4.414	0.96	<b>2561.984</b>
<b>55.00</b>	1.804	5.875	0.96	<b>3410.001</b>

### 3.3.2 Curva Teórica II

Para establecer la Curva Teórica II, se analizó del referido manual FM 3-34.214 la tabla: (3-6. Breaching Charges for Reinforced Concrete), la misma que en función del espesor del elemento de hormigón armado a demoler, determina la cantidad de paquetes de explosivo M-112. Cada paquete contiene 1.25 lb de explosivo, con un factor de conversión a peso equivalente en TNT, de 1.35; además el factor de apisonamiento (C), continúa siendo 1.80. Bajo las condiciones de borde planteadas se presenta los resultados en la Tabla 10.

**Tabla 10**

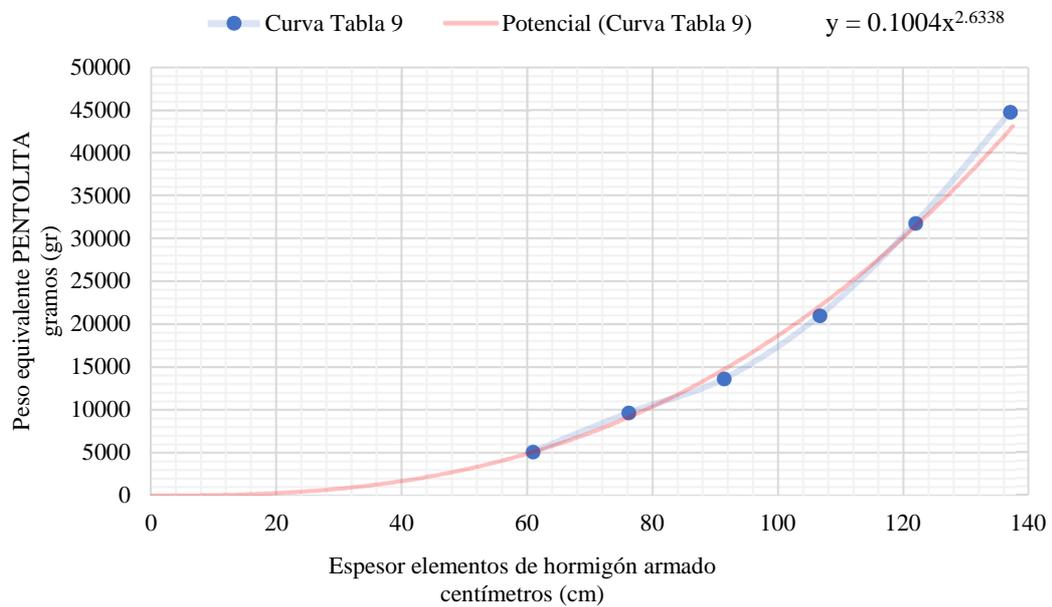
Pre-análisis Curva Teórica II, según tabla 3-6, FM 3-34.214

Tabla	Tipo Explosivo	Factor C	M-112-TNT	TNT PENTOLITA	lb - gr
FM 3-34.214	(PENTOLITA)	1.8	1.350	0.739	454.545
Espesor HA (cm)	Espesor HA e/30.48 (ft)	Pqt M-112 (1.25 lb/Pqt)	$W_{M112}$ (lb)	$W_{TNT}$ (lb)	$W_{Pentolita}$ (gr)
<b>60.960</b>	2.0	9.0	11.250	15.188	<b>5100.983</b>
<b>76.200</b>	2.5	17.0	21.250	28.688	<b>9635.190</b>
<b>91.440</b>	3.0	24.0	30.000	40.500	<b>13602.622</b>
<b>106.680</b>	3.5	37.0	46.250	62.438	<b>20970.709</b>
<b>121.920</b>	4.0	56.0	70.000	94.500	<b>31739.451</b>
<b>137.160</b>	4.5	79.0	98.750	133.313	<b>44775.297</b>

Los resultados obtenidos (ver Tabla 10), no satisfacen las dimensiones de las secciones propuestas para analizar la Curva Teórica I, (lados iguales en dimensiones: 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 55) cm; se realiza una extrapolación entre la relación del espesor del elemento de hormigón armado y el peso equivalente en explosivo (PENTOLITA), (ver Figura 21), cuyo ajuste se estandarizó con una tendencia potencial descrita en la ecuación (3.3-6), donde “y” representa el peso equivalente en explosivo (PENTOLITA) y “x” el espesor del elemento de hormigón armado. En base a estos parámetros se presenta los resultados finales del análisis en la Tabla 11.

$$y = 0.1004 x^{2.6338} \quad (3.3-6)$$

### Análisis para determinar Curva Teórica II (Espesor HA & Explosivo)



**Figura 21** Análisis para determinar Curva Teórica II

**Tabla 11**

Análisis Curva Teórica II, según tabla 3-6, FM 3-34.214

<b>Ecuación (3.3-6)</b>	<b>Tipo Explosivo (PENTOLITA)</b>
Espesor HA (cm)	$W_{Pentolita}$ (gr)
25.00	482.645
30.00	780.146
35.00	1170.847
40.00	1664.330
45.00	2269.681
50.00	2995.580
55.00	3850.357

El análisis previo permite determinar dos curvas teóricas validadas por el Ejército de los Estados Unidos para generar daño severo en elementos de hormigón armado; estas curvas se encuentran definidas a través de la relación: espesor (E) o radio de perforación (R) y el peso de explosivo (PENTOLITA) 50/50, según se describe en la Tabla 9 y Tabla 11, la variación promedio de las dos curvas es 13.88%, sin embargo,

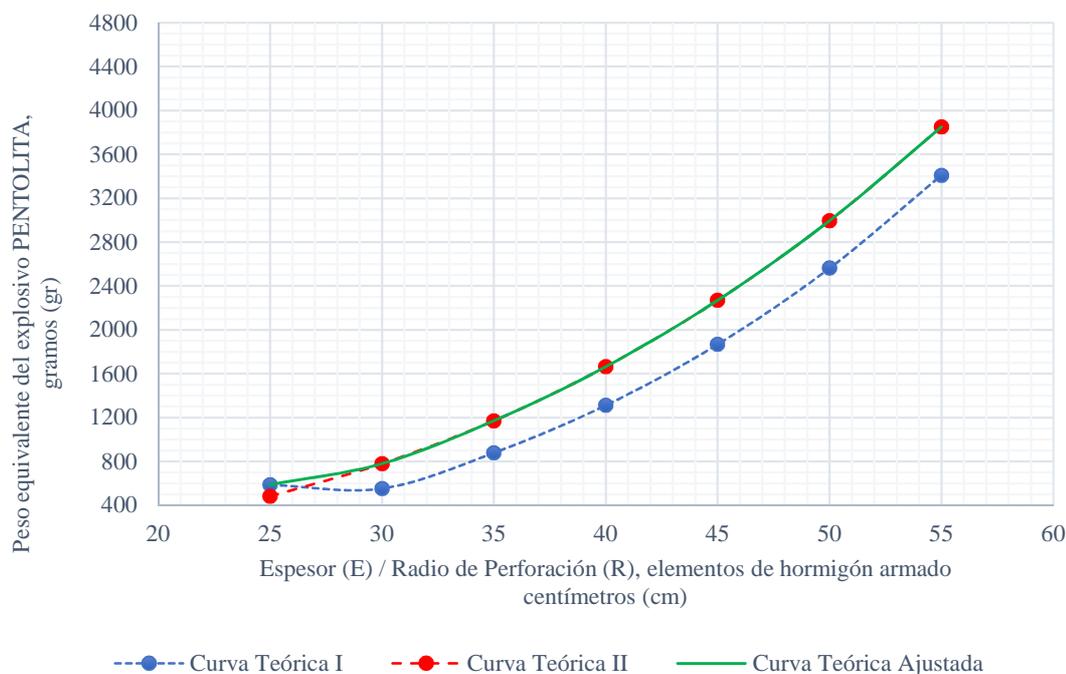
para asegurar la efectividad en la detonación y para análisis posteriores se ajusta una resultante con los valores más altos de cada curva en función de su sección, en tal virtud se presenta una Curva Teórica Ajustada, ver Tabla 12 y Figura 22.

**Tabla 12**

Curvas teóricas características de daño en elementos de hormigón

Elementos Hormigón Armado	Curva Teórica		
	I	II	Ajustada
Espesor / Radio (cm)	$W_{Pentolita}$ (gr)	$W_{Pentolita}$ (gr)	$W_{Pentolita}$ (gr)
25	587.12	482.65	587.12
30	553.39	780.15	780.15
35	878.76	1170.85	1170.85
40	1311.74	1664.33	1664.33
45	1867.69	2269.68	2269.68
50	2561.98	2995.58	2995.58
55	3410.00	3850.36	3850.36

### Daño en elementos de Hormigón Armado



**Figura 22** Curvas teóricas características de daño severo

## CAPÍTULO IV

### PROBETA TIPO COLUMNA AFECTA POR TERREMOTO 16-A

#### 4.1 Descripción general

Tras el terremoto suscitado en Ecuador, el 16 de abril del 2016, las edificaciones de hormigón armado ubicadas en la provincia de Manabí sufrieron daños severos en sus elementos estructurales, todo esto, por la gran intensidad que generó el movimiento sísmico. Las innumerables afectaciones de tipo estructural se sustentan en la construcción informal e implementación de diseños, materiales y procesos constructivos fuera de norma y sin el aval de las secciones técnicas de los gobiernos autónomos descentralizados (GAD).



**Figura 23** Observación a infraestructura afectada por el terremoto 16-A, Manabí

Dentro de las edificaciones visitadas, se observa con mucha frecuencia estructuras construidas con la concepción de diseño (viga fuerte – columna débil), aspecto que con mucha certeza acrecentó la vulnerabilidad y estabilidad de los elementos estructurales, al producir simultáneamente: rótulas plásticas en el pie y cabeza de la columna, fisuras en vigas y fallo de losas (Blanco, 2012).

Otro problema comúnmente observado es la aplicación de diseños superpuestos con efectos de columna corta, aspecto que se genera por el uso de mampostería rígida empotrada a las columnas de hormigón armado; cuando estos empotramientos involucran conexiones superiores a la mitad de longitud de las columnas, anulan el diseño estructural concebido, al reducir sustancialmente la longitud, generar esfuerzos adicionales y restringir desplazamientos al producir una rigidez excesiva del elemento. (Guevara & García, 2005)

En cuanto a efectos de daño en los materiales se observa afectaciones en elementos como: pérdida de recubrimiento y del núcleo de hormigón en su sección central confinada; exposición, fractura y deformación de los aceros longitudinales y transversales (ver Figura 24); aspectos vinculados a bajas resistencias a la compresión en el hormigón y diámetros mínimos en varillas de refuerzo para secciones robustas.



**Figura 24** Daño evidenciado en pie de columna por el terremoto 16-A, Manabí

Con este preámbulo y al enlazar el terremoto del 16 de abril como un suceso de grave conmoción en el país con el presente estudio investigativo, se determinó como un aspecto valioso constatar el comportamiento de los materiales en un elemento tipo columna de hormigón armado bajo la acción de cargas con explosivo (PENTOLITA), y establecer así, una relación de soporte entre la necesidad de indagar este campo de conocimiento y proponer a las autoridades gubernamentales, alternativas de solución en estructuras calificadas con orden de derrocamiento y debido a condiciones de: daño,

ubicación y disposición, constituyen un obstáculo para emplear procedimientos de derrocamiento de tipo mecánico o manual.

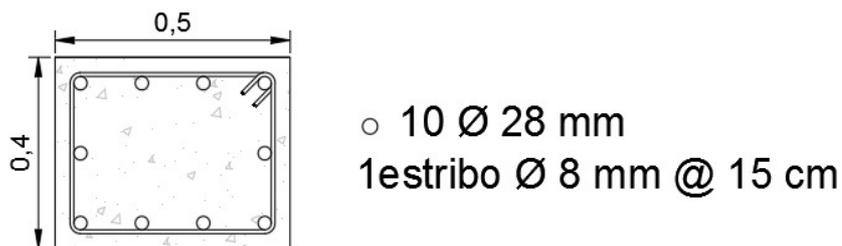
Luego de los acercamientos con las autoridades responsables, se viabilizó la entrega de un elemento tipo columna perteneciente a una edificación pública de 6 pisos afectada y calificada con orden de derrocamiento por los organismos pertinentes; a fin de ejecutar un ensayo destructivo con material explosivo, como parte de esta investigación.

#### **4.2 Selección de la muestra**

Se concibe seleccionar un elemento de una infraestructura pública, debido a que las edificaciones gubernamentales han seguido un proceso normalizado de diseño desde hace ya varios años como es: diseño, construcción, fiscalización y mantenimiento; en tal virtud las condiciones presentadas se ajustan al presente estudio investigativo. Posterior a los procedimientos administrativos pertinentes se accedió a la edificación asignada (ver Figura 25), luego de la inspección general se constata que la estructura posee secciones normativas, por lo que se selecciona un elemento tipo columna sin evidencias generales de afectaciones en su composición y conexiones, aspectos vinculantes a garantizar datos reales y resultados veraces.



**Figura 25** Edificación de donde se autorizó la toma de la muestra, Manabí



**Figura 26** Descripción general del elemento seleccionado, Manabí

La probeta seleccionada corresponde a un elemento tipo columna perimetral esquinera, se encuentra ubicada sobre la losa del cuarto piso, su sección transversal es rectangular de dimensión (50 x 40) cm; longitud del elemento 2.5 metros, acero longitudinal de 10 Ø 28 mm; acero transversal de 1 estribo Ø 8 mm @ 15 cm (ver Figura 26); el elemento se encuentra cargado axialmente sin condición de falla. Seguidamente a través de un esclerómetro digital (ver Figura 27), se verifica la resistencia de hormigón, cuyas muestras obtenidas en campo corresponde a los siguientes valores: (324, 357, 330) kg/cm<sup>2</sup> y resistencia promedio 337 kg/cm<sup>2</sup>.



**Figura 27** Verificación de la resistencia del hormigón en probeta, Manabí

### 4.3 Extracción de la muestra

La empresa asignada para el derrocamiento de la edificación a través de equipo mecánico procede a extraer el elemento en condiciones de seguridad y sin afectar la

composición de la probeta de tal forma que se evite el colapso total de la estructura y la pérdida de sección. El ensayo experimental se planifica 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.



**Figura 28** Extracción de la probeta tipo columna de hormigón armado, Manabí

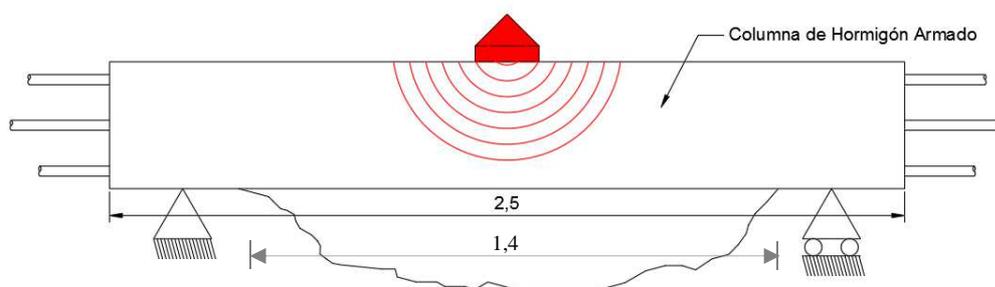
#### **4.4 Ensayo experimental Manabí**

##### **4.4.1 Consideraciones previas**

El ensayo experimental Manabí, consiste en realizar una detonación contralada con material explosivo (PENTOLITA), sobre un elemento tipo columna previamente seleccionada y extraída según consta en los enunciados 4.2 y 4.3. Para el efecto se recibe la respectiva autorización para el uso de un polígono de demolición en la provincia de Manabí, perteneciente a Fuerzas Armadas; esta actividad se efectúa en condiciones de rigurosa seguridad, bajo el apoyo de personal militar técnico en explosivos del Batallón de Ingenieros No. 68 “COTOPAXI”, personal de apoyo del Depósito Conjunto de Municiones Jaramijó “DEPJAR”, además la disponibilidad de un paramédico y ambulancia asignada por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.

#### 4.4.1.1 Disposición de la probeta

Para efectuar el ensayo experimental, se considera como probeta al elemento tipo columna extraído de una edificación en proceso de derrocamiento. Durante la ejecución del ensayo el elemento se considera bajo la condición de apoyo simple; esta condición permite que la acción del suelo no interfiera en el comportamiento del fenómeno de estudio y así, descartar inconsistencia en los resultados, (ver Figura 29); por la condición del terreno la longitud central efectiva entre los apoyos es 1.40 metros.



**Figura 29** Esquema ensayo experimental condición de simple apoyo, Manabí

#### 4.4.1.2 Disposición de las cargas explosivas.

Para el ensayo experimental se utiliza 02 cargas con explosivo (PENTOLITA), cada una de 1.140 gramos, total 2.280 gramos. Las cargas explosivas son ubicadas en la cara superior de la probeta a media longitud central efectiva a fin de obtener considerables deformaciones o ruptura en el acero de refuerzo, así también: desconfinamiento y pérdida de masa en el hormigón, (ver Figura 29).

#### 4.4.2 Consideraciones de Seguridad

Para determinar los parámetros de seguridad que involucran una detonación con material explosivo, es necesario seguir el manual de normas de seguridad de municiones y explosivos, emitido por el departamento de defensa de los Estados Unidos de América (U.S. DoD, 2012), el mismo que define en la descripción

(V1.E7.5.2.), las distancias de seguridad en función del peso neto de explosivo y factor “K” que corresponde al riesgo asumido o permitido; (refiérase la terminología descrita en la nomenclatura).

$$D_{SH} = K_m * (W_{TNT})^{\frac{1}{3}} \quad (4.4-1)$$

$$D_{IBD} = K_m * (W_{TNT})^{\frac{1}{3}} \quad (4.4-2)$$

El peso equivalente en TNT se obtiene de la ecuación (3.3-5), en tal virtud los 2.280 gramos de explosivo (PENTOLITA) corresponden a un peso equivalente de 3.086 Kg de TNT. Para el cálculo de la distancia de seguridad humana ver ecuación (4.4-1), el factor  $K_m$  corresponde el valor de 55.5, extraído de la Tabla 13. Para el cálculo de la distancia de seguridad hacia edificios habitados, ver ecuación (4.4-2), el factor  $K_m$  corresponde al valor 15.87, extraído de la Tabla 14. Los parámetros de seguridad desarrollados se especifican en las ecuaciones (4.4-3) y (4.4-4).

**Tabla 13**  
Niveles de protección Factor K

EXPECTED BLAST EFFECTS	K Factor $\left[ \frac{m}{Kg^{\frac{1}{3}}} \right]$
<p>The overpressure expected at this distance will cause little or no damage to non-strengthened structures.</p> <p>1.3.7.5. Injuries and fatalities are very unlikely as a direct result of the blast effects.</p> <p>At this distance and beyond there is no restriction on personnel, activities or facilities.</p>	<b>55.5</b>
<p>Un-strengthened structures are likely to suffer only superficial damage.</p> <p>1.3.7.6. Injuries and fatalities are very unlikely as a direct result of the blast effects.</p> <p>Because even superficial damage may in some instances be unacceptable, National Authorities may require siting at these distances for facilities of especially vulnerable construction or public importance.</p>	<b>44.4 to 33.3</b>

*Continúa...*

---

1.3.7.7.	Injuries and fatalities are very unlikely as a direct result of the blast effects.	<b>22.2</b>
	Injuries that do occur will be caused principally by glass breakage and flying/falling debris.	

---

Fuente: (NATO, 2010)

**Tabla 14**

Previsiones de incidentes máximos de eventos HD 1.1 (V1.E8.T2.)

LOCATION	$K_m$ Factor $\left[ \frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}} \right]$
Barricaded Aboveground IMD	<b>2.38</b>
Barricaded ILD	<b>3.57</b>
Unbarricaded Aboveground IMD	<b>4.36</b>
Unbarricaded ILD	<b>7.14</b>
Public Traffic Route Distance PTRD (Q < 45,400 kg)	<b>9.52</b>
Public Traffic Route Distance PTRD (Q > 113,400 kg)	<b>11.9</b>
IBD (Q < 45,400 kg)	<b>15.87</b>
IBD (Q > 113,400 kg)	<b>19.84</b>

---

Fuente: (U.S. DoD, 2012)

$$D_{SH} = 55.5 * (3.086)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{80.80 \text{ m}} \quad (4.4-3)$$

$$D_{IBD} = 15.87 * (3.086)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{23.11 \text{ m}} \quad (4.4-4)$$

#### 4.4.3 Metodología de Ensayo

Para establecer un procedimiento óptimo antes, durante y después del ensayo experimental, se disponen ciertos condicionamientos, desde un enfoque técnico y de seguridad, con el objetivo de salvaguardar la integridad del personal colaborador y

obtener información verás para el post procesamiento de resultados; esta metodología abarca los siguientes pasos:

PASO 1, se realiza el levantamiento de información técnica y de seguridad previa al ensayo, para lo cual en base a la carga explosiva total 2.280 gramos de explosivo (PENTOLITA), se fijan las distancias para la protección del personal, material y equipo; seguidamente se marca la zona segura, de demolición y almacenamiento temporal del material explosivo; estos parámetros se socializan con el personal involucrado en una reunión informativa previa.



**Figura 30** Disposición de probeta de ensayo, Manabí



**Figura 31** Instalación de cargas explosivas en probetas de ensayo, Manabí

PASO 2, la probeta de hormigón armado de sección rectangular, longitud 2.50 metros, peso aproximado 1.20 toneladas, se ubica en el área de ensayo bajo la condición de apoyo simple (ver Figura 30); en este contexto sus extremos se apoyan en una gradiente de terreno adecuada para el efecto, a fin de que la longitud media del elemento no entre en contacto con el suelo (1.40 m). Seguidamente el equipo técnico mide el centro del elemento para que exista una referencia para la ubicación de las cargas; posterior se instala el explosivo en el área establecida, (ver Figura 31).

PASO 3, luego de instalar las cargas explosivas, se procede a instalar un equipo de filmación para registrar evidencia fotográfica; posterior a esto el personal de investigadores se desplazarán a zona segura, dando paso al personal militar técnico explosivista, quienes ceban las cargas y preparan el dispositivo previo al disparo, para seguidamente salir a zona segura.

PASO 4, posterior a verificar la zona demolición despejada, y bajo control se procede a activar el disparo eléctrico dando paso a la detonación. En caso de existir un disparo fallido, el personal militar técnico explosivista, ejecuta el correspondiente protocolo. En caso de confirmar un disparo efectivo, el personal técnico y colaborador aguardaran en la zona segura al menos 10 minutos hasta que exista la disipación de gases adecuada, para seguidamente ingresar a la zona de demolición; al ingresar en la zona de demolición, se verifica novedades y mediciones preliminares.



**Figura 32** Probeta tipo columna post-ensayo, Manabí

#### 4.4.4 Ejecución Experimental

**Tabla 15**

Desarrollo de Ensayo Experimental Manabí

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una columna de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 337 \text{ kg/cm}^2</math>, según la esclerometría obtenida del elemento; ante la aplicación de 02 Cargas Explosivas Experimental I-a (CEM-I-a), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una columna de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 337 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar dos cargas CEM-I-a, sobre el centro de la superficie superior del elemento. Cada CEM-I contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos, 03 cargas diédricas de 230 gramos y 03 perfiles angulares de aleación de aluminio.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 33</b> Ensayo con carga explosiva CEM-I-a, Manabí</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 34</b> Efecto de la carga CEM-I-a, Manabí</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEM-I-a, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad considerable de residuos de hormigón permaneció en el núcleo de la columna, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto en su sección central produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 9.10 cm; se presenta corte en el acero de refuerzo transversal (estribos).</p>

## CAPÍTULO V

### PROBETAS PILOTO DE HORMIGÓN ARMADO

#### 5.1 Diseño

##### 5.1.1 Condiciones de diseño

En concordancia a los objetivos y metas de esta investigación se establece la ejecución de ensayos experimentales destructivos en probetas piloto de hormigón armado, con el objetivo de obtener información del comportamiento ante un evento explosivo controlado de los materiales en elementos diseñados y construidos según la norma ecuatoriana de la construcción NEC-15; e identificar parámetros primarios de cantidad y forma del explosivo (PENTOLITA), que contrasten el modelo matemático.

##### 5.1.2 Criterio Estructural

Las probetas piloto son elementos de sección cuadrada en dimensión (30 x 30) cm, tomando un criterio de sección mínima para edificaciones y estimando un punto de referencia para considerar posteriormente secciones mayores. La longitud de cada elemento es 50 cm; la armadura de acero longitudinal y estribos corresponde a varilla corrugada normada en el país bajo una cuantía del 2% y resistencia a la fluencia de 4200 kg/cm<sup>2</sup>; por otra parte, la resistencia de hormigón armado corresponde en unos elementos 210 kg/cm<sup>2</sup> y en otros 280 kg/cm<sup>2</sup>, (ver Anexo 2).

##### 5.1.2.1 Refuerzo Longitudinal

La norma ecuatoriana de la construcción limita la cuantía de acero en elementos de hormigón armado tipo columna, con un valor máximo de 3% y mínimo de 1%, dejando al mejor criterio del diseñador para que en función de factores: económicos, de vulnerabilidad, funcionalidad y riesgo sísmico, pueda adoptar el valor más apropiado; el presente estudio considera un promedio entre el límite superior e inferior

(2%). En base a la ecuación (5.1-1), se determina el área del acero de refuerzo, cuyo valor representa en varillas comerciales, 4 Ø 18 mm y 4 Ø 16 mm, distribuida equitativamente en las cuatro caras de la probeta.

$$A_s = \rho * b * h \quad (5.1-1)$$

$$A_s = 0.02 * 30 * 30 = 18 \text{ cm}^2$$

### 5.1.2.2 Refuerzo Transversal (Hormigón 210 kg/cm<sup>2</sup>)

Para el diseño de la armadura transversal de las probetas se usó las fórmulas de área mínima de estribos por confinamiento, fundamentadas en la norma NEC-2015, y Código ACI 318S-11 (ACI, 2011). Se asumió como criterio de diseño que en las probetas piloto de hormigón armado no existen esfuerzos de corte. Se determina 1 Ø 12 mm @ 10 cm, que equivale por sus dos ramales a 2.26 cm<sup>2</sup> de área transversal de acero de refuerzo; este valor se compara con el área mínima expuestas en las ecuaciones (5.1-2) y (5.1-3) tomadas de la NEC-2015 (MIDUVI, 2015)

$$A_{sh} = 0.30 * \frac{s * b_c * f'_c}{f_y} * \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \quad (5.1-2)$$

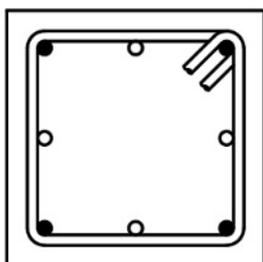
$$A_{sh} = 0.09 * \frac{s * b_c * f'_c}{f_y} \quad (5.1-3)$$

Se considera un espesor de 3 cm para el recubrimiento de hormigón sobre la armadura de refuerzo en cada cara de la probeta, así también en pie y cabeza del elemento. El espaciamiento entre estribos a lo largo de la probeta es de 10 cm; la base de la sección confinada, 24 cm; área total de la sección transversal o área bruta, 900

cm<sup>2</sup>; área de la sección transversal confinada dentro del acero de refuerzo, 576 cm<sup>2</sup>; al reemplazar estos valores en las ecuaciones (5.1-2) y (5.1-3), se obtiene los resultados de área total de refuerzo transversal. Tanto el acero longitudinal como transversal cumple con las áreas mínimas por lo que el armado de la probeta (ver Figura 35).

$$A_{sh} = 0.30 * \frac{10 \text{ cm} * 24 \text{ cm} * 210 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} * \left( \frac{900 \text{ cm}^2}{576 \text{ cm}^2} - 1 \right) = 2.03 \text{ cm}^2$$

$$A_{sh} = 0.09 * \frac{10 \text{ cm} * 24 \text{ cm} * 210 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 1.08 \text{ cm}^2$$



- 4 Ø 18mm
- 4 Ø 16mm
- 1 Estribo Ø 12mm @ 10 cm

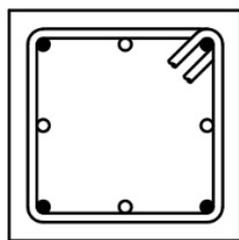
**Figura 35** Armadura probeta piloto de hormigón armado 210 kg/cm<sup>2</sup>

### 5.1.2.3 Refuerzo Transversal (Hormigón 280 kg/cm<sup>2</sup>)

Se determina 1 Ø 14 mm @ 10 cm, que equivale por sus dos ramales a 3.08 cm<sup>2</sup> de área transversal de acero de refuerzo; el espaciamiento entre estribos a lo largo de la probeta es de 10 cm; la base de la sección confinada, 24 cm; área total de la sección transversal o área bruta, 900 cm<sup>2</sup>; área de la sección transversal confinada dentro del acero de refuerzo, 576 cm<sup>2</sup>; al reemplazar estos valores en las ecuaciones descritas anteriormente: (5.1-2) y (5.1-3), se obtiene los resultados de área total de refuerzo transversal. Tanto el acero longitudinal como transversal cumple con las áreas mínimas por lo que el armado de la probeta se muestra en la Figura 36.

$$Ash = 0.30 * \frac{10 \text{ cm} * 24 \text{ cm} * 280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} * \left( \frac{900 \text{ cm}^2}{576 \text{ cm}^2} - 1 \right) = 2.70 \text{ cm}^2$$

$$Ash = 0.09 * \frac{10 \text{ cm} * 24 \text{ cm} * 280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 1.44 \text{ cm}^2$$



- 4 Ø 18mm
- 4 Ø 16mm
- 1 Estribo Ø 14mm @ 10 cm

**Figura 36** Armadura probeta piloto de hormigón armado 280 kg/cm<sup>2</sup>

## 5.2 Construcción

Las probetas piloto de hormigón armado son construidas en condiciones ideales de laboratorio; los encofrados son de madera (planchas y cuarterones) constituidos con las dimensiones correspondientes y resistentes para el traslado y transporte posterior a la fundición; es indispensable el uso de clavos y goma blanca para una correcta adherencia de los materiales y evitar cualquier tipo de falla.



**Figura 37** Encofrado de madera para probetas piloto de hormigón armado

Posterior a la fabricación del encofrado tiene lugar el corte y doblado del acero de refuerzo según lo establece el diseño, las varillas de acero comerciales de 12 metros son cortadas en dependencia de su diámetro, según planilla de aceros (Tabla 16); los estribos de 12 mm y 14 mm se doblan según el recubrimiento del hormigón; todo esto es amarrado con alambre recocido No. 18 para formar la estructura interna de las probetas de hormigón armado (ver Figura 38 ), dando paso de inmediato al proceso de fundición (ver Figura 39 y Figura 40).



**Figura 38** Acero de refuerzo para probetas piloto de hormigón armado



**Figura 39** Fundición de probetas piloto de hormigón armado

**Tabla 16**

Planilla de aceros, diseño probetas piloto de hormigón armado

Mc	Tipo	$\phi$ mm	N°	Dimensiones (m)			Longitud (m)	
				a	b	g	Parcial	Total
100	I	18	24	1.00 x 0.44			0.44	10.56
101	I	16	24	1.00 x 0.44			0.44	10.56
102	O	12	30	2.00 x 0.24	2.00 x 0.24	2.00 x 0.05	1.06	31.80

**Figura 40** Probetas piloto HA y cilindro posterior a la fundición**Figura 41** Piscina de curado para probetas piloto y cilindros de hormigón.

Terminando el proceso de fundición es necesario realizar un muestreo del hormigón en los cilindros de ensayo, a fin de determinar experimentalmente la resistencia a la compresión en los 28 días posteriores; para conocer el método de ensayo y toma de muestras en cilindros se aplica la normativa INEN NTE 1573:90, y ASTM C 39-01; bajo las mismas condiciones de las probetas.



**Figura 42** Ensayo de compresión en cilindros de hormigón

Las probetas y cilindros de hormigón son desencofrados 02 días posteriores a la fundición para ser ubicados en una piscina de curado; dentro de 28 días posteriores, se obtiene la resistencia teórica requerida. Las probetas piloto son almacenadas y transportadas al polígono de demolición, mientras que los cilindros de hormigón se someten a un ensayo de compresión en el laboratorio de materiales de la Carrera de Ingeniería Civil, en tal virtud se comprueba que el hormigón utilizado en el proceso constructivo cumple los parámetros de diseño.

### **5.3 Ensayos experimentales destructivos**

#### **5.3.1 Consideraciones previas**

Un ensayo experimental destructivo, consiste en realizar una detonación controlada con material explosivo (PENTOLITA), sobre probetas piloto de hormigón armado; tanto los materiales, dimensiones y condiciones de borde; deben obedecer a criterios técnicos, normativos y económicos, vinculados a obtener información real

que permita procesar resultados para validar la adopción de un estándar en el país. Al constituir esta investigación un trabajo de aporte a seguridad y defensa; se autorizó el uso de un polígono de demolición en la provincia de Pichincha, perteneciente a Fuerzas Armadas, en donde se ejecutó la experimentación en condiciones de rigurosa seguridad, bajo el apoyo de personal militar técnico en explosivos del Batallón de Ingenieros No. 68 “COTOPAXI”, junto a un paramédico y ambulancia asignada por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.

### **5.3.1.1 Disposición de probetas piloto de hormigón armado**

Para efectuar los ensayos experimentales destructivos, las probetas piloto de hormigón armado diseñadas y construidas para el efecto, quedan en condiciones apropiadas luego de cumplir un mínimo tiempo de curado de 28 días posterior a la fundición. Para conseguir el propósito de esta fase experimental, cada elemento se ensaya bajo la condición de apoyo simple; esta condición permite que la acción del suelo no interfiera en el comportamiento del fenómeno de estudio y así, descartar inconsistencia en los resultados.

### **5.3.1.2 Disposición de cargas explosivas.**

En cada ensayo las cargas explosivas son ubicadas en la cara superior de las probetas a media luz; a fin de obtener grandes deformaciones en el acero de refuerzo; además en pro de conseguir el propósito planteado, se varía la cantidad y forma del explosivo (PENTOLITA), 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.

### **5.3.2 Consideraciones de Seguridad**

Para esta fase experimental fueron calculadas las distancias de seguridad, según los parámetros descritos en el numeral 4.4.2. El peso equivalente en TNT, se obtiene la ecuación (3.3-5), en tal virtud los 1350 gramos de explosivo (PENTOLITA)

corresponden a la carga explosiva más crítica, cuyo peso equivalente es de 1.830 Kg de TNT. Para el cálculo de la distancia de seguridad humana ver ecuación (4.4-1), el factor  $K_m$  corresponde al valor 55.5, extraído de la Tabla 13. Para el cálculo de la distancia de seguridad hacia edificios habitados, ver ecuación (4.4-2), el factor  $K_m$  corresponde al valor de 15.87, extraído de la Tabla 14. El desarrollo del cálculo de las distancias de seguridad se especifican en las ecuaciones (5.3-1) y (5.3-2).

$$D_{SH} = 55.5 * (1.83)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{67.89 \text{ m}} \quad (5.3-1)$$

$$D_{IBD} = 15.87 * (1.83)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{19.41 \text{ m}} \quad (5.3-2)$$

### 5.3.3 Metodología de Ensayo

Para establecer un procedimiento óptimo antes, durante y después de los ensayos experimentales destructivos, se disponen ciertos condicionamientos, desde un enfoque técnico y de seguridad, con el objetivo de salvaguardar la integridad del personal colaborador y obtener información verás para el post procesamiento de resultados; esta metodología abarca los siguientes pasos:

PASO 1, se realiza el levantamiento de información técnica y de seguridad previa al ensayo, para lo cual en base a la carga explosiva más crítica a ensayar (mayor cantidad), se fijan las distancias para la protección del personal, material y equipo; seguidamente se marcará la zona segura, de demolición y almacenamiento temporal del material explosivo; estos parámetros se socializan con el personal involucrado en una reunión informativa previa.

PASO 2, se realiza la toma de datos y calibración de elementos a ensayar, para lo cual cada probeta de hormigón es pesada en una balanza digital, este registro permite contrastar desfragmentación y pérdida de masa del hormigón. Es preciso marcar en cada probeta, un código de ensayo, numeración, fecha de fundición, resistencia de

hormigón, peso, dimensiones; entre otros aspectos de relevancia; además es prioritario tener un registro fotográfico, (ver Figura 43).



**Figura 43** Toma de datos previo a la ejecución de los ensayos destructivos

PASO 3, en campo la probeta piloto de hormigón armado ya identificada debe ser ubicada en condición de apoyo simple; para el efecto se coloca dos cilindros de hormigón a una distancia de 30 cm entre sí, los mismos que están enterrados en la superficie, la probeta se ubica sobre estos cilindros debiendo estar correctamente nivelada, (ver Figura 44).



**Figura 44** Probeta simplemente apoyada sobre cilindros de hormigón

PASO 4, el explosivo a utilizar es (PENTOLITA), este material debe ser identificado y registrado en condición de forma y peso; en tal virtud se prueban diferentes cargas para conocer su comportamiento de manera individual y combinada; con el fin de obtener información que generen mayor daño en cantidades óptimas de explosivo. Para la conexión de explosivo (PENTOLITA) se utiliza cordón detonante de 10 gramos, (ver Figura 45).



**Figura 45** Identificación y registro de las cargas explosivas



**Figura 46** Personal colaborador y técnico se desplaza a zona segura

PASO 5, luego de determinar la cantidad y la forma del explosivo a utilizar, se procede a instalar un equipo de filmación para registrar evidencia fotográfica; posterior a esto el personal de investigadores se desplazarán a zona segura, dando paso al

personal militar técnico explosivista, quienes son los encargados de cebar las cargas y preparar el dispositivo previo al disparo, (ver Figura 46).

PASO 6, posterior a verificar que el área de experimentación se encuentra despejada, se activa con impulso eléctrico el sistema de detonación. En caso de existir una iniciación fallida, el personal militar técnico explosivista, ejecuta el correspondiente protocolo. En caso de confirmar una iniciación efectiva, el personal técnico y colaborador aguardaran en la zona segura al menos 10 minutos hasta que exista la disipación de gases adecuada, para seguidamente ingresar al área de experimentación. (ver Figura 47)



**Figura 47** Cebamiento de cargas explosivas en probetas piloto



**Figura 48** Probeta piloto, posterior al ensayo experimental destructivo

PASO 7, al ingresar en la zona de demolición, se verifica novedades, además se realizar la medición preliminar de los elementos ensayados, la respectiva identificación de componentes, los mismos que son transportados al laboratorio de materiales de la Carrera de Ingeniería Civil, campus matriz, en donde se completará posteriormente el análisis y estudio post-ensayo, (ver Figura 48).



**Figura 49** Residuos de material llevados en el laboratorio

PASO 8, ya en laboratorio los restos de material (varillas de refuerzo y hormigón) correspondiente a cada probeta piloto de hormigón armado proceden a ser analizados en función a las cargas explosivas aplicadas: cantidad, peso y ubicación del explosivo. Se determinan pérdidas de masa del hormigón y deformaciones en aceros longitudinales y estribos, (ver Figura 49).

### **5.3.4 Ejecución Experimental**

Según las especificaciones anteriormente descritas en 06 días bajo condiciones meteorológicas adecuadas, se efectuó 19 ensayos experimentales destructivos, según detalle: 06 ensayos preliminares y 13 ensayos normalizados con probetas piloto de hormigón armado, de las cuales se empleó: 08 probetas de resistencia  $210 \text{ kg/cm}^2$  y 05 de resistencia  $280 \text{ kg/cm}^2$ ; se utilizó cargas con explosivo (PENTOLITA) 50/50 en diferente tipo de forma, además el peso del explosivo varió entre 450 y 1350 gramos.

### 5.3.5 Ensayo Preliminar No. 1

**Tabla 17**

Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 1

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una barra de acero ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental I (CEX-I).</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una barra de acero corrugada de 18 mm, en condición de apoyo simple; aplicar una CEX-I en cada extremo.          - Cada CEX-I contiene: 01 carga diédrica de 180 gramos, con una lámina de aluminio de 2 mm, adherida en la superficie de contacto.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 50</b> Ensayo Preliminar No. 1</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 51</b> Efectos de CEX-I</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEX-I, en una barra de acero corrugada de 18 mm, generó un corte parcial en el elemento, sin evidenciar una deformación máxima del material.</p>

### 5.3.6 Ensayo Preliminar No. 2

**Tabla 18**

Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 2

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una barra de acero ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental II (CEX-II) en un extremo y 01 Carga Explosiva Experimental III (CEX-III) en el otro extremo.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una barra de acero corrugada de 16 mm, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEX-II y CEX-III, en cada extremo.</p> <p>- Cada CEX-II contiene: 02 barras cilíndricas de 150 gramos, con una lámina de aluminio de 2 mm, adherida en la superficie de contacto.</p> <p>- Cada CEX-III contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos, 01 carga diédrica de 180 gramos, con una lámina de aluminio de 2 mm, adherida en la superficie de contacto.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 52</b> Ensayo Preliminar No. 2</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 53</b> Efectos de CEX-II, CEX-III</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEX-II, generó un corte parcial en el elemento, sin evidenciar una deformación máxima del material; la carga CEX-III, generó una pérdida de masa del acero, derritiéndolo y deformándolo.</p>

### 5.3.7 Ensayo Preliminar No. 3

**Tabla 19**

Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 3

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f^c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental IV (CEX-IV), sobre la cara superior, respecto a la ubicación del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f^c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEX-IV, sobre la cara superior, respecto a la ubicación del elemento.          - La CEX-IV contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos, 04 barras cilíndricas de 150 gramos y 01 envase plástico con 500 cc de agua; el envase se coloca a una altura de 5 cm, entre la superficie del elemento y la carga explosiva.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 54</b> Ensayo Preliminar No. 3</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 55</b> Efectos de CEX-IV (1)</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEX-IV, generó una cantidad considerable de residuos de hormigón que permaneció en el centro de la probeta; la armadura de acero mantuvo su disposición inicial; el impacto produjo la dispersión de un estribo extremo, sin embargo, no existió deformaciones considerables en estribos y aceros longitudinales; no se presentan daños en acero de refuerzo y hormigón confinado; no existe corte en el acero de refuerzo.</p>

### 5.3.8 Ensayo Preliminar No. 4

**Tabla 20**

Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 4

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental IV (CEX-IV), sobre la cara superior, respecto a la ubicación del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple.          - La CEX-IV contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos, 04 barras cilíndricas de 150 gramos y 01 envase plástico con 500 cc de agua; el envase se coloca a una altura de 5 cm, entre la superficie del elemento y la carga explosiva; las cargas cilíndricas se ubican una encima de otra en total de dos filas, el rompedor cónico en la parte superior.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 56</b> Ensayo Preliminar No. 4</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 57</b> Efectos de CEX-IV (2)</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEX-IV, generó una cantidad considerable de residuos de hormigón que permaneció en el centro de la probeta; la armadura de acero mantuvo su disposición inicial; el impacto no produjo deformaciones considerables en estribos y aceros longitudinales; no se presentan daños en acero de refuerzo y hormigón confinado; no existen cortes en el acero de refuerzo.</p>

### 5.3.9 Ensayo Preliminar No. 5

**Tabla 21**

Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 5

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental V (CEX-V), sobre una cara lateral del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEX-V en la cara lateral del elemento a ensayar.          - Cada CEX-V contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 58</b> Ensayo Preliminar No. 5</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 59</b> Efectos de CEX-V (1)</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEX-V, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una mínima cantidad de residuos permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en aceros longitudinales con deformaciones de 3.5 cm.</p>

### 5.3.10 Ensayo Preliminar No. 6

**Tabla 22**

Desarrollo de Ensayo Preliminar No. 6

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f^c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental V (CEX-V), sobre dos caras laterales opuestas del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f^c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEX-V, sobre dos caras laterales opuestas del elemento.          - Cada CEX-V contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 60</b> Ensayo Preliminar No. 6</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 61</b> Efectos de CEX-V (2)</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEX-V, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad considerable de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 3.0 cm, en la parte central; no se presenta corte en el acero de refuerzo.</p>

### 5.3.11 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 1

**Tabla 23**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 1

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-I), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-I, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-I contiene: 02 cargas diédricas de 180 gramos y 08 cargas diédricas de 50 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 62</b> Ensayo Experimental PP No. 1</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 63</b> Efectos de la carga explosiva CEV-I</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-I, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad considerable de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 2.0 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo.</p>

### 5.3.12 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 2

**Tabla 24**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 2

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-II), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-II, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-II contiene: 02 rompedores cónicos de 150 gramos y 01 rompedor cónico de 450 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 64</b> Ensayo Experimental PP No. 2</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 65</b> Efectos de la carga explosiva CEV-II</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-II, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad mínima de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 3.5 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo.</p>

### 5.3.13 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 3

**Tabla 25**

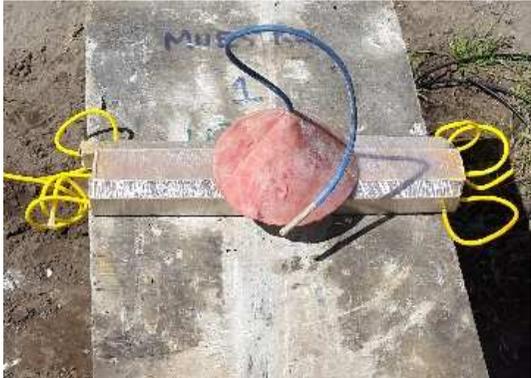
Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 3

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-III), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-III, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-III contiene: 02 rompedores cónicos de 150 gramos y 02 cargas diédricas de 180 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 66</b> Ensayo Experimental PP No. 3</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 67</b> Efectos de la carga explosiva CEV-II</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-III, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad considerable de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 2.5 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo.</p>

### 5.3.14 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 4

**Tabla 26**

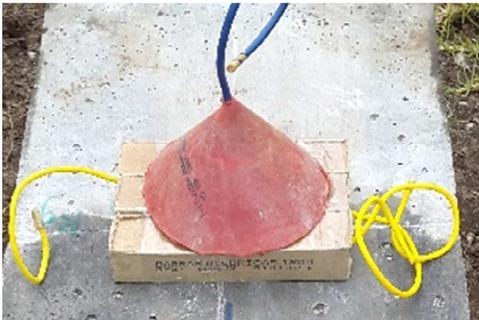
Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 4

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-IV), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-IV, sobre el centro de la superficie superior del elemento.          - Cada CEV-IV contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos, 04 cargas diédricas de 50 gramos y 02 cargas diédricas de 180 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 68</b> Ensayo Experimental PP No. 4</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 69</b> Efectos de la carga explosiva CEV-IV</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-IV, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad mínima de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 2.5 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo.</p>

### 5.3.15 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 5

**Tabla 27**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 5

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-V), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-V, sobre el centro de la superficie superior del elemento. - Cada CEV-V contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos y 03 cargas diédricas de 180 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 70</b> Ensayo Experimental PP No. 5</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 71</b> Efectos de la carga explosiva CEV-V</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-V, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad casi nula de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero perdió su disposición inicial, por lo que, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 4.5 cm (ver Anexo 3), en la parte central; se presenta corte en el acero de refuerzo transversal.</p>

### 5.3.16 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 6

**Tabla 28**

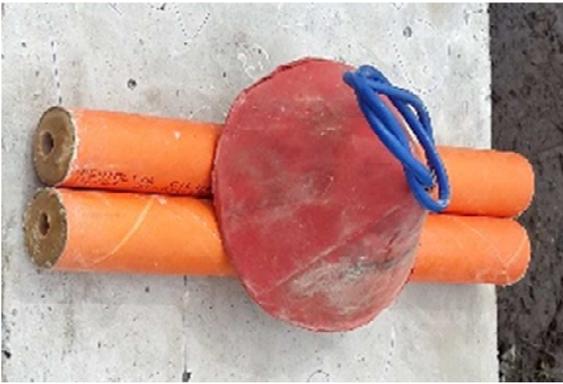
Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 6

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-VI), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-VI, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-VI contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos y 02 cargas cilíndricas de 150 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 72</b> Ensayo Experimental PP No. 6</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 73</b> Efectos de la carga explosiva CEV-VI</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-VI, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad mínima de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 3.5 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo.</p>

### 5.3.17 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 7

**Tabla 29**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 7

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-VII), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-VII, sobre el centro de la superficie superior del elemento. - Cada CEV-VII contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos y 04 cargas cilíndricas de 150 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 74</b> Ensayo Experimental PP No. 7</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 75</b> Efectos de la carga explosiva CEV-VII</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-VII, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad casi nula de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero perdió su disposición inicial, por lo que, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 6 cm (ver Anexo 3), en la parte central; se presenta corte en el acero de refuerzo transversal.</p>

### 5.3.18 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 8

**Tabla 30**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 8

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-VIII), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-VIII, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-VIII contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos, 04 cargas cilíndricas de 150 gramos y 03 perfiles angulares de aleación de aluminio.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 76</b> Ensayo Experimental PP No. 8</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 77</b> Efectos de la carga explosiva CEV-VIII</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-VIII, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad mínima de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 6.5 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo; presenta residuos del perfil fundido sobre varillas.</p>

### 5.3.19 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 9

**Tabla 31**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 9

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-IX), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-IX, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-IX contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos, 03 cargas diédricas de 180 gramos y 03 perfiles angulares de aleación de aluminio.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="593 758 1198 1141">  <p><b>Figura 78</b> Ensayo Experimental PP No. 9</p> </div> <div data-bbox="1388 758 1937 1141">  <p><b>Figura 79</b> Efectos de la carga explosiva CEV-IX</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-IX, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad casi nula de residuos de hormigón permaneció en el centro de la probeta, la armadura de acero perdió su disposición inicial, por lo que, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 6.98 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo; presenta residuos del perfil fundido sobre varillas.</p>

### 5.3.20 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 10

**Tabla 32**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 10

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-X), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-X, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-X contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos, 04 cargas cilíndricas de 150 gramos y 03 perfiles angulares de aleación de aluminio.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 80</b> Ensayo Experimental PP No. 10</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 81</b> Efectos de la carga explosiva CEV-X</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-X, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad casi nula de residuos de hormigón permaneció en la probeta, la armadura de acero perdió su disposición inicial, por lo que, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 6.5 cm (ver Anexo 3), en la parte central; se presenta corte en el acero de refuerzo; presenta residuos del perfil fundido sobre varillas.</p>

### 5.3.21 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 11

**Tabla 33**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 11

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-XI), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-XI, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-XI contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos, 02 cargas cilíndricas de 150 gramos, 02 cargas diédricas de 180 gramos y 02 perfiles angulares de aleación de aluminio.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 82</b> Ensayo Experimental PP No. 11</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 83</b> Efectos de la carga explosiva CEV-XI</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-XI, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad mínima de residuos de hormigón permaneció en la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 4 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo; presenta residuos del perfil fundido sobre varillas.</p>

### 5.3.22 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 12

**Tabla 34**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 12

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental (CEV-XII), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 280 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-XII, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-XII contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos y 06 cargas cilíndricas de 150 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 84</b> Ensayo Experimental PP No. 12</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 85</b> Efectos de la carga explosiva CEV-XII</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-XII, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad casi nula de residuos de hormigón permaneció en la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 5.5 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo.</p>

### 5.3.23 Ensayo Experimental en Probetas Piloto No. 13

**Tabla 35**

Desarrollo de ensayo experimental en probetas piloto No. 13

<p><b>Alcance:</b></p>	<p>- Conocer el comportamiento de una probeta piloto de hormigón armado, resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, según parámetros de diseño; ante la aplicación de 01 Carga Explosiva Experimental V (CEV-XIII), sobre la cara superior del elemento.</p>
<p><b>Procedimiento:</b></p>	<p>- Ubicar una probeta piloto de hormigón armado de resistencia del hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math>, en condición de apoyo simple, y aplicar una carga CEV-XIII, sobre el centro de la superficie superior del elemento.</p> <p>- Cada CEV-XIII contiene: 01 rompedor cónico de 450 gramos.</p>
<p><b>Ejecución:</b></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 86</b> Ensayo Experimental PP No. 13</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>Figura 87</b> Efectos de la carga explosiva CEV-XIII</p> </div> </div>
<p><b>Resultado:</b></p>	<p>- Se verifica que la aplicación de CEV-XIII, generó desintegración y fragmentación del hormigón; una cantidad considerable de residuos de hormigón permaneció en la probeta, la armadura de acero mantuvo su disposición inicial, sin embargo, el impacto produjo deformaciones en estribos y en los aceros longitudinales, con deformaciones de 3 cm (ver Anexo 3), en la parte central; no se existe corte en el acero de refuerzo.</p>

### 5.4.1 Resultados

El proceso de recolección de información es fundamental en la etapa de post procesamiento; en este contexto los datos obtenidos por pérdida y deformaciones en el material deben evitar errores que alteren la veracidad de los resultados finales, de esta manera posterior al ensayo se efectúa una inspección visual y fotográfica de los residuos identificando todos sus elementos, es necesario tener un registro de toda la armadura de refuerzo y de la cantidad de hormigón residual. El traslado de los residuos hasta el laboratorio debe manejarse también de forma ordenada y cuidadosa, al evitar pérdida y mezcla del material, hasta conocer su peso por medio equipo de laboratorio.

En el laboratorio cada varilla es medida por medio de fotografías escaladas que a través de un programa CAD se puede dibujar curvas en detalle con el mayor número de puntos posibles; a fin de conocer las deformaciones máximas que sufrieron los aceros de refuerzo en función de su ubicación, la nube de puntos de la curva se describe en una tabla de valores para su posterior análisis en la que consta en el eje horizontal la longitud del elemento y en el eje vertical su deformación (ver Anexo 3).



**Figura 88** Acero longitudinal deformado, Probetas Piloto HA.

El refuerzo transversal fue moldeado a mano, es así como el figurado no es exacto en todos los elementos; otro aspecto importante de considerar es la posición del gancho de unión en las diferentes caras de las probetas; esta particularidad puede generar un comportamiento disperso. Bajo este planteamiento se observó que la

aplicación de cargas explosivas en una cara produjo aperturas de los estribos, mientras que en otros estribos se observó un aplastamiento.



**Figura 89** Estribo deformado post ensayo, Probetas Piloto HA.



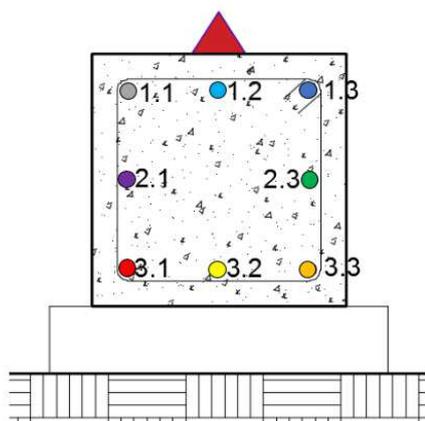
**Figura 90** Ensayo de tracción en varillas corrugadas.

Para determinar el estado físico y la resistencia residual del acero longitudinal, se realizó ensayos de tracción en las varillas deformadas. La máquina de ensayos universal arroja como resultado del test, un gráfico que relaciona la fuerza aplicada y la deformación con puntos de referencia en cada elemento antes de la ruptura; los

resultados alcanzados muestran la existencia de una pérdida promedio del 3% en la resistencia última a la tracción del acero.

#### 5.4.2 Deformaciones en elementos y cargas aplicadas

Las probetas de hormigón armado fueron llevadas al laboratorio de materiales para la toma de datos generales como: peso y deformaciones en el acero de refuerzo, así se determina la afectación de la carga en estos dos materiales. Se realiza un procedimiento similar para todas las probetas el cual inicia con la identificación de todos sus elementos, estos son retirados para determinar la forma final y obtener una curva de deformación, las varillas tienen una deformación en dependencia de su ubicación dentro de la probeta, en la Tabla 36, se muestra las deformaciones máximas alcanzadas en el acero longitudinal en función de la ubicación en la armadura.



**Figura 91** Esquema de ubicación aceros longitudinales, Probetas Piloto HA

**Tabla 36**

Deformaciones alcanzadas experimentalmente en acero longitudinal

Probeta <i>N</i> •	Deformación máxima de varillas [cm]							
	Ubicación de los aceros (ver Figura 91)							
	●	●	●	●	●	●	●	●
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.3	3.1	3.2	3.3
1	2.14	2.18	2.06	0.89	1.10	-	-	-
2	2.3	3.41	3.42	1.64	1.65	-	-	-
3	2.31	2.76	2.27	0.88	0.82	-	-	-

Continúa...

<b>4</b>	2.05	3.38	2.73	1.62	1.56	-	-	-
<b>5</b>	3.46	4.37	4.04	3.06	1.72	1.17	-	2.86
<b>6</b>	1.84	3.52	2.55	1.79	1.43	-	-	-
<b>7</b>	4.92	5.90	5.20	4.62	3.2	0.26	2.30	1.68
<b>8</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>9</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>10</b>	5.24	8.05	7.05	4.79	5.62	-	-	-
<b>11</b>	3.78	6.98	3.68	3.99	1.94	-	-	-
<b>12</b>	4.15	6.48	3.06	3.94	4.20	-	-	-
<b>13</b>	2.30	3.85	2.64	2.33	1.63	-	-	-
<b>14</b>	4.08	5.38	4.76	3.00	3.45	-	-	-
<b>15</b>	2.17	3.06	3.00	2.49	2.59	-	-	-
<b>16</b>	2.97	3.42	1.36	2.93	0.15	-	-	-
<b>17</b>	3.10	1.68	2.52	1.18	0.77	-	-	-

Los resultados de la Tabla 36 determinan que las deformaciones máximas se encuentran los aceros centrales de la probeta ubicada cerca de la zona de impacto (ubicación 1.1, 1.2, 1.3), estas deformaciones varían en función de la cantidad y forma de la carga explosiva (ver Tabla 37), en el caso de la ubicación 1.2, existe una deformación de 8.05 cm. Los aceros ubicados en el lado opuesto a la aplicación de explosivo (ubicación 3.1, 3.2, 3.3), no muestran deformaciones considerables.

**Tabla 37**

Resumen cantidad de cargas con explosivo (PENTOLITA)

<b>Probeta</b>	<b>Rompedor Cónico [450 gr]</b>	<b>Rompedor Cónico [150 gr]</b>	<b>Carga Cilíndrica [150 gr]</b>	<b>Carga Diédrica [180 gr]</b>	<b>Carga Diédrica [50 gr]</b>	<b>Def. Max. [cm]</b>	<b>HA Residual [%]</b>
<b>1</b>	-	-	-	2	8	2.18	39%
<b>2</b>	1	2	-	-	-	3.41	23%
<b>3</b>	-	2	-	2	-	2.76	21%
<b>4</b>	1	-	-	2	4	3.38	12%
<b>5</b>	1	-	-	3	-	4.37	11%
<b>6</b>	1	-	2	-	-	3.52	18%
<b>7</b>	1	-	4	-	-	5.90	13%
<b>8</b>	1	-	4	-	-	-	73%
<b>9</b>	1	-	4	-	-	-	76%
<b>10</b>	1	-	4	-	-	8.05	11%
<b>11</b>	1	-	-	3	-	6.98	12%
<b>12</b>	1	-	4	-	-	6.48	11%
<b>13</b>	1	-	2	2	-	3.85	15%

*Continúa...*

<b>14</b>	1	-	6	-	-	5.38	13%
<b>15</b>	1	-	-	-	-	3.06	30%
<b>16</b>	1	-	-	-	-	3.42	15%
<b>17</b>	2	-	-	-	-	3.10	36%

Los resultados descritos en la Tabla 38 muestran que el peso final de las probetas depende de la cantidad de carga explosiva aplicada en el ensayo, con ciertas excepciones como en las probetas 8 y 9, debido a que la altura libre de 5 cm dejada entre la superficie de la probeta y la base del explosivo, influyó a que la onda expansiva no impacte totalmente en la sección, reduciendo el efecto y disipando la energía; de esta forma se observó fragmentación en el recubrimiento de hormigón sobre la armadura y afectación sobre un estribo; los aceros longitudinales no sufrieron deformaciones. La Tabla 38, muestra resultados del hormigón residual.

**Tabla 38**

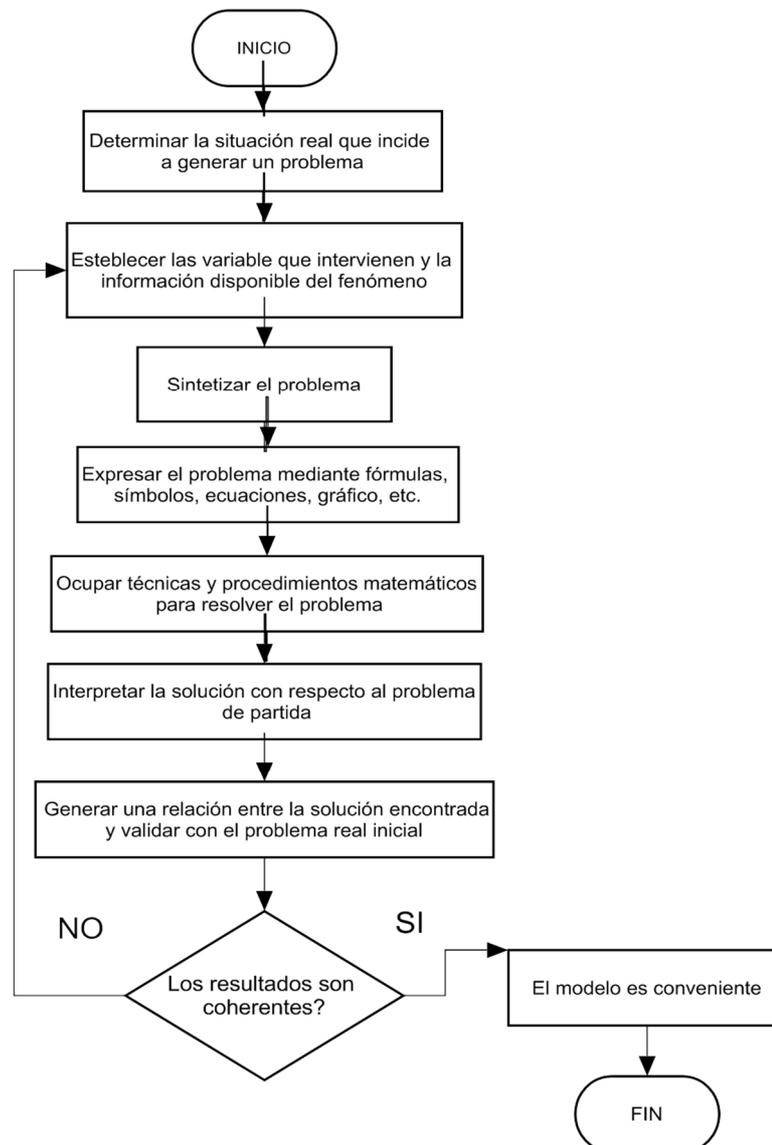
Resultado del peso residual obtenido en función de la carga explosiva.

<b>PROBETA NRO.</b>	<b>CARGA TOTAL [gr]</b>	<b>RESISTENCIA f'c [kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>PESO INICIAL [kg]</b>	<b>PESO FINAL [kg]</b>	<b>HA Residual [%]</b>
<b>1</b>	760	210	108.20	42.19	39%
<b>2</b>	750	280	105.15	24.18	23%
<b>3</b>	660	210	107.70	22.617	21%
<b>4</b>	1010	210	108.00	12.96	12%
<b>5</b>	990	210	107.85	11.86	11%
<b>6</b>	750	210	104.60	18.83	18%
<b>7</b>	1050	210	103.30	13.43	13%
<b>8</b>	1050	280	106.45	77.71	73%
<b>9</b>	1050	210	104.10	79.12	76%
<b>10</b>	1050	210	106.55	11.72	11%
<b>11</b>	990	280	106.75	12.81	12%
<b>12</b>	1050	280	107.10	11.78	11%
<b>13</b>	1110	280	108.55	16.28	15%
<b>14</b>	1350	280	101.05	13.14	13%
<b>15</b>	450	210	105.50	31.26	30%
<b>16</b>	450	210	103.75	14.90	15%
<b>17</b>	900	210	104.30	37.84	36%

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 6.1 Análisis del modelo por carga puntual equivalente



**Figura 92** Diagrama de flujo de validación de modelo matemático

Es indispensable considerar un proceso para validar el modelo matemático como solución al problema planteado, esto se realiza con una relación entre la información obtenida de los estudios analíticos y contrastada con los ensayos

experimentales; en la Figura 92, se muestra el flujograma correspondiente para validar los resultados, en cuyo análisis gradual se escala cada etapa procedimental.

Debido a que los primeros pasos del proceso son planteados y debidamente delimitados en los capítulos previos, se inicia con el análisis de los valores que ingresan en la ecuación planteada, posteriormente se examina los datos geométricos del elemento ensayado de forma experimental; en virtud que la solución depende directamente de la fuerza aplicada es necesario conocer su valor numérico; así también la composición geométrica y física de la probeta de hormigón armado.

### 6.1.1 Presión de incidencia en función de la distancia escalada

En este análisis se determina el valor máximo de la presión en el punto de impacto, por lo que se utiliza la expresión matemática para encontrar la distancia escalada  $Z$ , se toma en referencia el reporte técnico MCEER-07-0005, de la Universidad de Buffalo (Fujikura, S. et al., 2007), a través de la relación entre la distancia medida desde el centro de la explosión al punto de impacto expresada en metros ( $R$ ), y el peso equivalente de la carga explosiva en TNT, expresado en kilogramos  $W_{TNT}$ ; como peso equivalente a partir del peso de la (PENTOLITA)  $W_{PENTOLITA}$ , según la ecuación (3.3-5). El valor obtenido de la distancia escalada se ingresa en las ecuaciones de presión (6.1-2) y (6.1-3) referenciadas de (Brode, 1955), las misma que calculan la presión de la onda explosiva en bares, cerca al lugar de impacto o cuando se encuentra a una distancia considerable.

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{\frac{1}{3}}} \quad (6.1-1)$$

$$p_s = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad (6.1-2)$$

$$p_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad (6.1-3)$$

La carga explosiva es aplicada cerca de las probetas de hormigón por lo que se toma el valor de 10 centímetros desde el centro de la explosión al punto de impacto (R), esta distancia se reemplaza en la ecuación de presión (6.1-2) con los valores correspondientes al peso del explosivo en cada ensayo; esto permite determinar las diferentes presiones actuantes, mismas se muestran en la Tabla 39 y Figura 93 para identificar la curva de presión en función del peso del explosivo (PENTOLITA); se evidencia una tendencia creciente de la presión en función de la distancia escalada.

**Tabla 39**

Cálculo de presiones actuantes, según ecuación de (Brode, 1955)

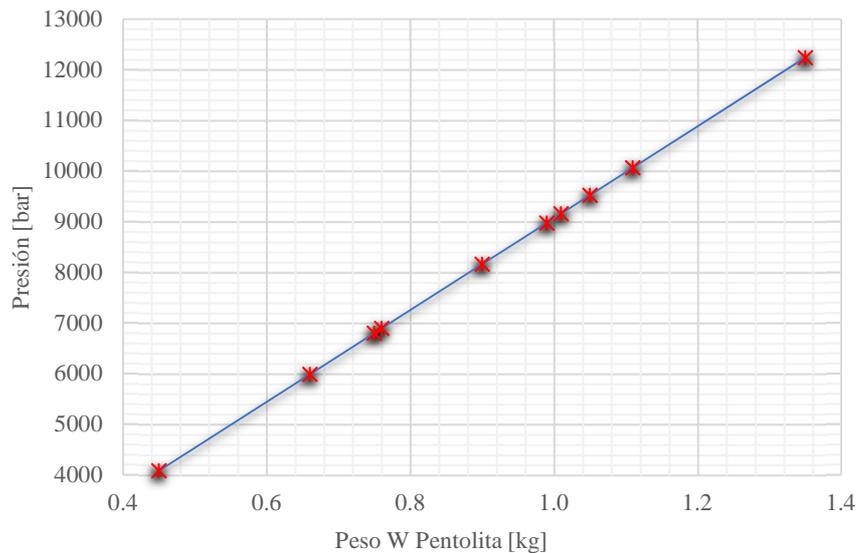
Ensayos Experimentales [Kg]		Z [m]	[Bar]	$p_s$ [MPa]
$W_{PENTOLITA}$	$W_{TNT}$			
0.450	0.609	0.118	4081.35	408.13
0.660	0.893	0.104	5985.51	598.55
0.750	1.015	0.100	6801.58	680.16
0.760	1.029	0.099	6892.25	689.23
0.900	1.218	0.094	8161.69	816.17
0.990	1.340	0.091	8977.76	897.78
1.010	1.367	0.090	9159.11	915.91
1.050	1.421	0.089	9521.81	952.18
1.110	1.502	0.087	10065.85	1006.59
1.350	1.827	0.082	12242.04	1224.20

Como ejemplo de cálculo se utiliza la primera fila de valores descritos en la Tabla 39, en donde el peso de carga explosiva aplicada en una prueba experimental es 450 gramos de explosivo (PENTOLITA), seguidamente este peso equivalente en (TNT) se reemplaza en la ecuación (6.1-1), de donde se obtiene la distancia escalada Z, como se expresa en la ecuación (6.1-4). El valor de la distancia escalada Z, permite encontrar la presión de incidencia al desarrollar la ecuación (6.1-2), como se describe en la ecuación (6.1-5).

$$Z = \frac{0.1}{0.609^{1/3}} = 0.118 \text{ m} \quad (6.1-4)$$

$$p_s = \frac{6.7}{0.118^3} + 1 = 4081.35 \text{ bar} \quad (6.1-5)$$

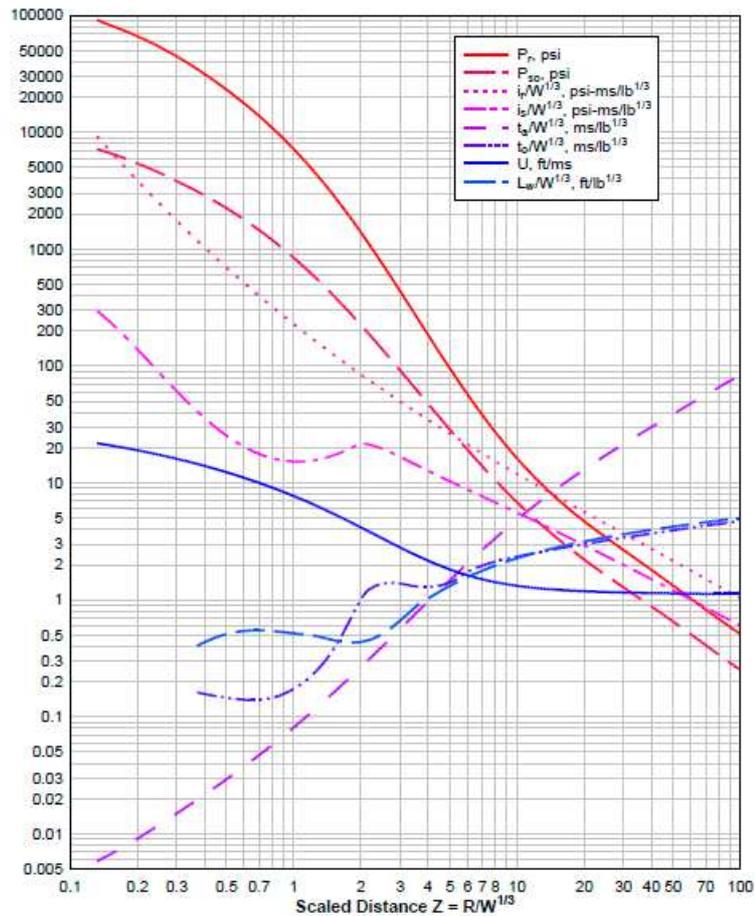
### Presión según distancia escalada Z (Brode, 1955)



**Figura 93** Curva de presión I, según peso del explosivo y distancia escalada Z

Existen varias ecuaciones teóricas de presión usadas con la misma finalidad en los cuales interfiere la relación peso del explosivo y distancia escalada, como se muestra en la ecuación (6.1-1), uno de estos modelos se obtiene del manual (U.S. DoD, 2014) el mismo que indica por medio de tablas y gráficas las presiones actuantes de la carga explosiva, como se muestra en la Figura 94; en esta gráfica la distancia escalada se encuentra expresada en pies y el peso del explosivo en libras de TNT.

Debido a la gran cantidad de energía generada en el punto donde reacciona el explosivo, se mantiene una tendencia creciente de presión a medida que la distancia al punto calculado aumenta, dando lugar a presiones extremadamente fuertes cuando la distancia es a centímetros, lo que indica que el modelo es muy sensible ante este parámetro y se considera una distancia prudente de análisis en función de los ensayos experimentales.



**Figura 94** Curva de presión II, según peso del explosivo y distancia escalada Z  
Fuente: (U.S. DoD, 2014)

La ecuación de (Brode, 1955) constituye un punto de partida importante; sin embargo, al revisar un modelo presentado años más tarde (Henrych, 1979), toma en cuenta límites de aplicación con respecto a la distancia escalada, según se observa en las ecuaciones (6.1-6), (6.1-7) y (6.1-8), cuyas presión de incidencia se describe en función de la distancia escalada Z con un rango de  $(0.1 \leq Z \leq 0.3)$ ,  $(0.3 \leq Z \leq 1)$  y  $(1 \leq Z \leq 10)$ . En base a los ensayos experimentales se toman los pesos de las cargas explosivas aplicadas, para luego obtener las presiones máximas a través de la ecuación de (Henrych, 1979), (ver Tabla 40).

$$p_s = \frac{1.4072}{Z} + \frac{0.554}{Z^2} - \frac{0.0357}{Z^3} + \frac{0.000625}{Z^4} \tag{6.1-6}$$

$$p_s = \frac{0.619}{Z} - \frac{0.33}{Z^2} + \frac{0.213}{Z^3} \quad (6.1-7)$$

$$p_s = \frac{0.066}{Z} + \frac{0.405}{Z^2} + \frac{0.329}{Z^3} \quad (6.1-8)$$

**Tabla 40**

Cálculo de presiones actuantes, según ecuación de (Henrych, 1979)

Ensayos Experimentales [Kg]		Z [m]	[Bar]	$p_s$	
$W_{PENTOLITA}$	$W_{TNT}$			[Bar]	[MPa]
0.450	0.609	0.118	329.3	32.93	
0.660	0.893	0.104	380.5	38.05	
0.750	1.015	0.100	398.3	39.83	
0.760	1.029	0.099	400.1	40.01	
0.900	1.218	0.094	424.0	42.40	
0.990	1.340	0.091	437.5	43.75	
1.010	1.367	0.090	440.4	44.04	
1.050	1.421	0.089	445.9	44.59	
1.110	1.502	0.087	453.8	45.38	
1.350	1.827	0.082	481.3	48.13	

Se verifica los valores obtenidos con las ecuaciones presentadas por (Brode, 1955) y (Henrych, 1979), las mismas son comparadas con otra ecuación propuesta por (Baker W. E., 1973), a fin de conseguir un criterio más claro acerca de las presiones producidas en la zona de impacto. Estas ecuaciones (6.1-9) y (6.1-10) calculan la presión en función de la distancia escalada dentro del rango ( $0.05 \leq Z \leq 0.5$ ) y ( $0.5 \leq Z \leq 70.9$ ) respectivamente, los resultados de presión son presentados para cada ensayo experimental realizado. (ver Tabla 41).

$$p_s = \frac{20.06}{Z} + \frac{1.94}{Z^2} - \frac{0.04}{Z^3} \quad (6.1-9)$$

$$p_s = \frac{0.67}{Z} + \frac{3.01}{Z^2} + \frac{4.31}{Z^3} \quad (6.1-10)$$

**Tabla 41**

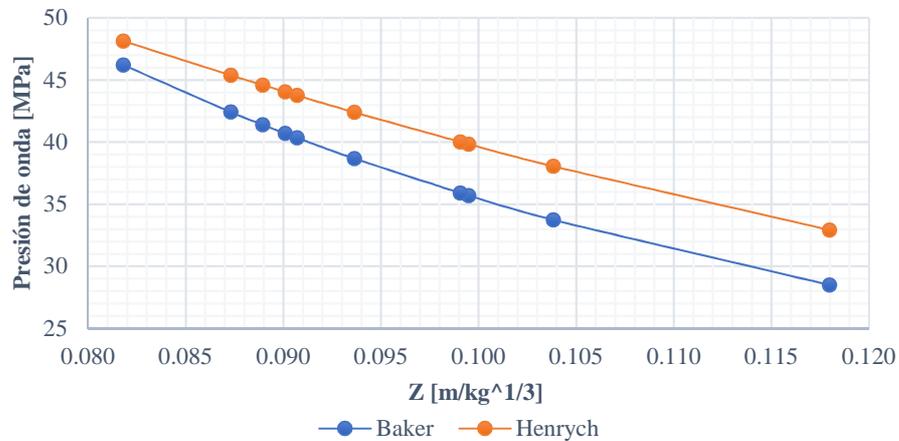
Cálculo de presiones actuantes, según ecuación de (Baker W. E., 1973)

Ensayos Experimentales [Kg]		Z	$p_s$	
$W_{PENTOLITA}$	$W_{TNT}$	[m]	[Bar]	[MPa]
0.450	0.609	0.118	285.1	28.51
0.660	0.893	0.104	337.4	33.74
0.750	1.015	0.100	356.9	35.69
0.760	1.029	0.099	359.0	35.90
0.900	1.218	0.094	386.8	38.68
0.990	1.340	0.091	403.3	40.33
1.010	1.367	0.090	406.9	40.69
1.050	1.421	0.089	413.9	41.39
1.110	1.502	0.087	424.1	42.41
1.350	1.827	0.082	462.1	46.21

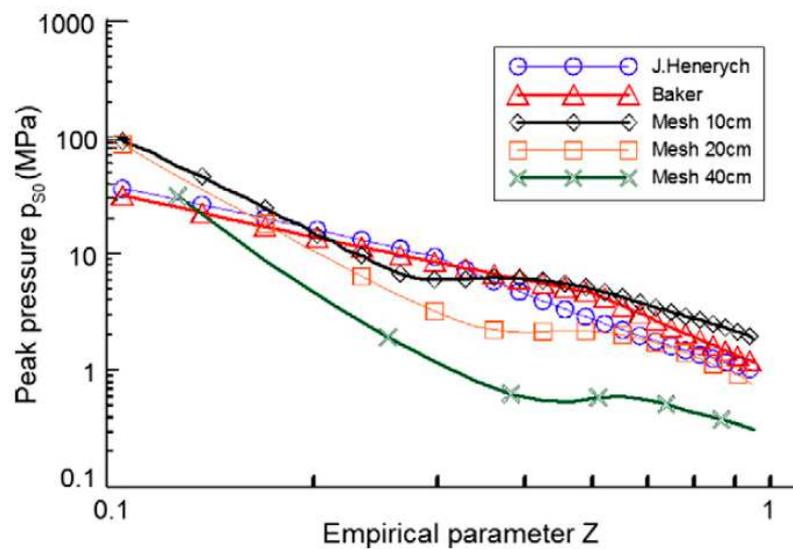
Al determinar los resultados de presiones en función a la distancia escalada Z, dentro de los rangos expuestos según se muestra en la Tabla 40 y Tabla 41; se establece gráficamente diferencias en la tendencia de resultados (ver Figura 95), esta gráfica determina que no existe una variación amplia de valores en consideración a este criterio, los resultados de presión según (Baker W. E., 1973) pueden darse como válidos a pesar que el modelo de (Henrych, 1979) es más conservador.

El uso de presiones empíricas es primordial para el análisis de este tipo de cargas, debido a que por la complejidad del comportamiento no es posible tomar como estándar modelos estructurales habituales, dando lugar así a ecuaciones que tengan procedimientos de cálculos con una mayor profundidad. Se tiene en cuenta estos parámetros para comparar las presiones como lo hacen en su estudio (Tai, Chu, Hu, & Wu, 2011), lo cual beneficia de forma integral el alcance de resultados en favor de la investigación, lo que permite aumentar la confiabilidad del modelo expuesto.

### Presión según distancia escalada Z (Baker, 1973) (Henrych, 1979)



**Figura 95** Curva de presión III, según peso del explosivo y distancia escalada Z



**Figura 96** Curva I, según comparación de modelos de presión; peso explosivo  
Fuente: (Tai, Chu, Hu, & Wu, 2011)

El requerimiento de un análisis en función de la carga explosiva lleva a conocer las presiones generadas por este fenómeno; es así que a través la normativa de Naciones Unidas (ODA-UN, 01.80, 2015) se habilita una calculadora de parámetros blast (Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator), en función del peso equivalente del TNT y un rango de impacto (ver Figura 97).

## Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator

Explosive Type:

Charge Weight (kg):

Range (m):

Enter a range between 0.06 and 33 meters.

**Calculate Blast Parameters**

TNT Weight for Pressure (kg):	0.61	TNT Weight for Impulse (kg):	0.61
Incident Pressure (kPa):	32378.57	Incident Impulse (kPa-ms):	848.42
Reflected Pressure (kPa):	383908.54	Reflected Impulse (kPa-ms):	23602.96
Time of Arrival (ms):	0.02	Positive Phase Duration (ms):	NaN
Shock Front Velocity (m/s):	5395.58		

**Figura 97** Aplicación para cálculo de parámetros de carga explosiva, UN  
Fuente: (SaferGuard-UN, 2017)

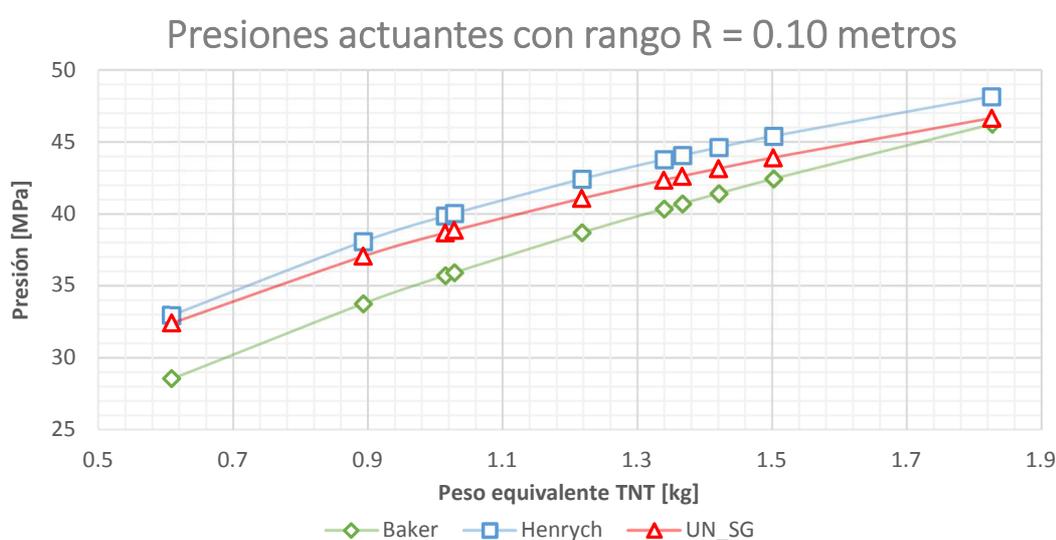
La metodología de cálculo que utiliza (ODA-UN, 01.80, 2015), se fundamenta en las ecuaciones desarrolladas por Charles Kingery y Gerald Bulmash, sobre la base muchas experimentaciones para predecir el comportamiento del material explosivo; en tal virtud se contrasta este procedimiento de cálculo con las experimentaciones realizadas en esta investigación, a una distancia (R) de 0.1 metros, ver Tabla 42.

**Tabla 42**

Cálculo de presiones actuantes, según (SaferGuard-UN, 2017)

Ensayos Experimentales $W_{TNT}$ [Kg]	Incident Pressure [MPa]	Reflect Pressure [MPa]	Time of Arrival [ms]	Shock Front Velocity [m/s]
0.609	32.378	383.908	0.02	5395.58
0.893	37.027	445.119	0.02	5754.96
1.015	38.659	467.077	0.02	5878.27
1.029	38.836	469.478	0.02	5891.56
1.218	41.047	499.971	0.02	6056.65
1.340	42.328	518.092	0.02	6151.26
1.367	42.599	521.967	0.02	6171.12
1.421	43.126	529.584	0.02	6209.78
1.502	43.888	540.704	0.02	6265.27
1.827	46.639	582.323	0.02	6462.34

Debido a la complejidad del fenómeno se compara los resultados presentados en la Figura 95, con los resultados de la aplicación de Naciones Unidas, las cuales establecen una variación mínima y una tendencia similar de la presión en función del peso equivalente en TNT; estas presiones son usadas para predecir el comportamiento de los materiales usados en la experimentación, ver Figura 98.



**Figura 98** Curva II, según comparación de modelos de presión; peso explosivo

Al correlacionar las curvas de presión descritas en la Figura 98, se puede establecer márgenes de variación para obtener un criterio de selección válido dentro del análisis del modelo por carga puntual equivalente. Al observar la Tabla 43, se determina que la diferencia máxima entre la curva de presiones según el criterio de (Henrych, 1979) es mayor en un 9% promedio con la curva según el criterio de (Baker W. E., 1973), mientras que esta es mayor en 3% promedio con la curva de (SaferGuard-UN, 2017); consecuentemente las resultantes tienen un margen de diferencia tolerable.

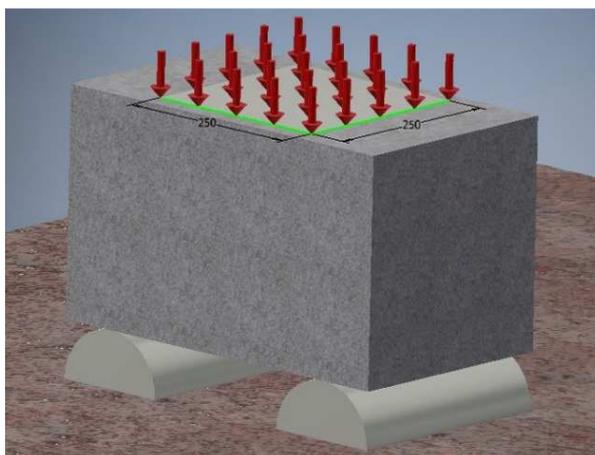
Las presiones máximas resultantes según la Tabla 43 son aproximadas, pues están desarrolladas en función del peso y la distancia de impacto al centro de la explosión, sin embargo, estas ecuaciones, no consideran variables de forma del explosivo y características del material. Para análisis posteriores se referirá a los

valores de presión obtenidos por la ecuación de (Henrych, 1979), en razón que los datos numéricos más altos representan la condición más crítica,

**Tabla 43**

Relación de resultados entre ecuaciones de presión

$p_s$ Baker [MPa]	Baker vs Henrych [%]	$p_s$ Henrych [MPa]	Henrych vs UN-SG [%]	$p_s$ UN -SG [MPa]
28,51	13%	32,93	2%	32,378
33,74	11%	38,05	3%	37,027
35,69	10%	39,83	3%	38,659
35,90	10%	40,01	3%	38,836
38,68	9%	42,40	3%	41,047
40,33	8%	43,75	3%	42,328
40,69	8%	44,04	3%	42,599
41,39	7%	44,59	3%	43,126
42,41	7%	45,38	3%	43,888
46,21	4%	48,13	3%	46,639



**Figura 99** Esquema de distribución de presión en la probeta de hormigón armado

Definida la presión de incidencia teórica, se transforma a una fuerza puntual equivalente focalizada en el centro del elemento, es decir se considera que la presión se distribuye uniformemente en el área de impacto en una relación de dos veces la superficie de contacto del explosivo con la probeta, siendo así la sección promedio equivalente de 625 cm<sup>2</sup>, ver Figura 99. Es importante reflexionar que en realidad la

presión no puede aplicarse uniforme y que esta se disipa al momento de entrar en contacto con otros materiales; pero por fines de cálculo se aplica la condición planteada, ver Tabla 44.

**Tabla 44**

Carga Puntual Equivalente, según ecuación de (Henrych, 1979)

$p_s$ Ecuación Henrych [MPa]	$F_m$ Fuerza equivalente [T]
32,93	201,76
38,05	233,15
39,83	244,05
40,01	245,19
42,40	259,81
43,75	268,10
44,04	269,85
44,59	273,23
45,38	278,06
48,13	294,93

### 6.1.2 Características físicas del acero longitudinal

En el capítulo 3, se dedujo la expresión matemática (3.1-14) que refiere al desplazamiento en función del tiempo, e incluye como variable dependiente la rigidez del elemento; al contrastar esta ecuación con los parámetros físicos de las probetas se considera que la sección transversal asume una parte fundamental dentro del análisis estructural debido a su rigidez, así también la longitud de apoyo, el material y la fuerza puntual máxima equivalente localizada en el centro del elemento.

**Tabla 45**

Parámetros físicos del acero longitudinal

$E_s$	[kg/cm <sup>2</sup> ]	2100000
$\emptyset$ (diámetro varilla)	[mm]	16
$A$	[cm <sup>2</sup> ]	2.01
$I$	[cm <sup>4</sup> ]	0.32
$L$	[cm]	44

La rigidez axial está en función del área transversal, el módulo de elasticidad y la longitud de apoyo; con respecto a este último parámetro se considera la dimensión total de la varilla al ser el apoyo producido por el hormigón antes de que se fragilice y fragmente; en las ecuaciones (6.1-11) y (6.1-12), se desarrolla la rigidez axial. Se utiliza varillas corrugadas comerciales usadas comúnmente en el campo constructivo del país, cuyos fabricantes a través del catálogo de especificaciones técnicas asignan valores de área e inercia.

$$K = \frac{E A}{L} \quad (6.1-11)$$

$$K = \frac{2100000 \text{ kg/cm}^2 * 2.01 \text{ cm}^2}{44 \text{ cm}} = 9596.16 \text{ T/m} \quad (6.1-12)$$

La rigidez axial del concreto se usa para determinar la deformación, la cual no tiene valores experimentales de comparación debido a la ruptura y fragmentación del hormigón durante el ensayo; otra variable fundamental es  $t_o$ , que representa el tiempo de duración de la fase positiva cuyo rango menor a 1.0 segundo hacen imperceptible la visualización para el ojo humano; de esta manera se adopta un valor de 5.5 milisegundos en base al estudio experimental y computacional realizado por (Rigby, Tyas, & Bennett, 2012).

$$K = \frac{12 E I}{L^3} \quad (6.1-13)$$

$$K = \frac{2100000 \text{ kg/cm}^2 * 0.32 \text{ cm}^4}{44 \text{ cm}^3} = 9.52 \text{ T/m} \quad (6.1-14)$$

La rigidez flexional del elemento depende de la inercia y arroja resultados dispersos, ver ecuaciones (6.1-13) y (6.1-14). Bajo el criterio de mecánica de sólidos

que al reducir la rigidez aumenta la deformación en un elemento, mientras se halle sometido a una misma fuerza; se adopta el valor de la rigidez axial descrito en la ecuación (6.1-12) para la resolución del modelo matemático.

### 6.1.3 Resolución del modelo analítico

En función del análisis que se realizó en los numerales 6.1.1 y 6.1.2, se constató la fuerza máxima aplicada y las características físicas relacionada con los parámetros iniciales de la probeta de hormigón armado; seguidamente se fijan los valores de deformación a través del tiempo, al desarrollar la ecuación (3.1-14). Como ejemplo de cálculo se utiliza 450 gramos de explosivo (PENTOLITA) y los parámetros de análisis del modelo matemático para un tiempo de 0.001 segundos, ver Tabla 46; el desarrollo de cálculo se detalla en la ecuación (6.1-15) y (6.1-16).

**Tabla 46**

Parámetros de análisis modelo matemático, 450 gramos (PENTOLITA)

<b>F<sub>m</sub></b>	[T]	201.77
<b>K</b>	[T/m]	9596.16
<b>t<sub>o</sub></b>	[s]	0.0055
<b>ω</b>	[1/s]	933.15
<b>t</b>	[s]	0.0010

$$y(t) = \frac{201.77 T}{9596.16 \frac{T}{m}} * \left( 1 - \cos \left( 933.15 \frac{1}{s} * 0.001 s * 57.29 \right) \right) + \frac{201.77 T}{0.0055 s * 9596.16 \frac{T}{m}} * \left( \frac{\text{sen} \left( 933.15 \frac{1}{s} * 0.001 s * 57.29 \right)}{933.15 \frac{1}{s}} - 0.001 s \right) \quad (6.1-15)$$

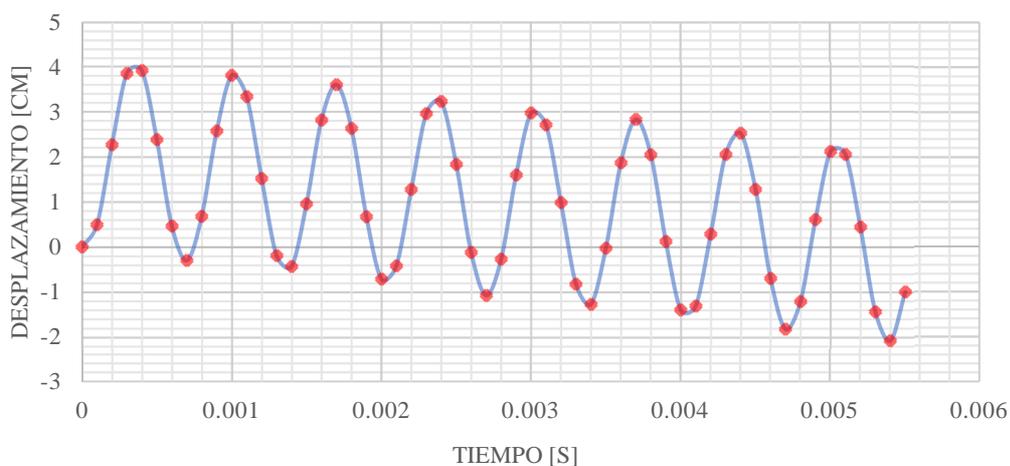
$$y(t) = 0.038 m \quad (6.1-16)$$

Este procedimiento de cálculo efectuado para 450 gramos de explosivo (PENTOLITA), en un tiempo de 0.001 segundos, se amplifica en un rango de tiempo desde 0 hasta 0.0055 segundos con intervalos de 0.0005 segundos (ver Tabla 47); para aumentar la sensibilidad en los valores se determina intervalos de 0.0001 segundos lo que arroja deformaciones con una mayor aproximación.

**Tabla 47**

Desplazamiento según ecuación (3.1-14), 450 gramos (PENTOLITA)

t [s]	y(t) [m]	y(t) [cm]
0	0,000	0,00
0,0005	0,024	2,38
0,001	0,038	3,80
0,0015	0,010	0,95
0,002	-0,007	-0,71
0,0025	0,018	1,83
0,003	0,030	2,97
0,0035	0,000	-0,03
0,004	-0,014	-1,40
0,0045	0,013	1,28
0,005	0,021	2,11
0,0055	-0,010	-1,00

**Desplazamiento y(t), intervalo 0.0001 segundos****Figura 100** Desplazamiento en función del tiempo, explosivo 450 gramos

Los valores obtenidos en función del tiempo muestra una tendencia sinusoidal como se muestra en la Figura 100 debido a las funciones trigonométricas encontradas en la ecuación de desplazamiento, por lo que determina los picos positivos como negativos que se producen a medida que el tiempo aumenta, en este caso se establece como  $y(t)$ , el valor más alto determinado en el rango de tiempo analizado.

#### 6.1.4 Discusión de resultados analíticos

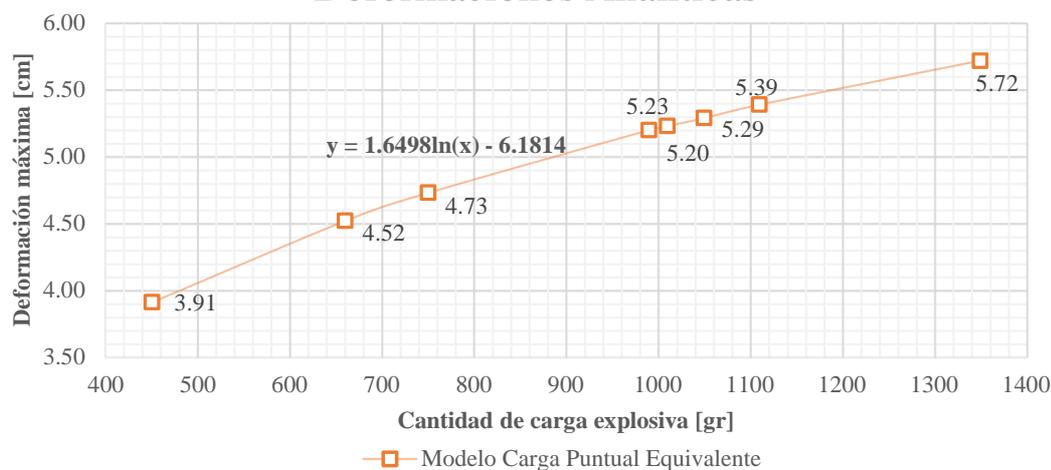
Se adopta los criterios correspondientes para el análisis de resultados bajo las condiciones iniciales propuestas en el modelo matemático. En función del peso utilizado del explosivo (PENTOLITA), se determina la presión de incidencia y la carga puntual equivalente; de esta manera al desarrollar la ecuación (3.1-14) y en base al pico más alto, se determinan el valor de  $y(t)$  para cada peso; estos valores a su vez constituyen las deformaciones teóricas máximas calculadas para los aceros longitudinales que permitirán contrastar los resultados experimentales. Según la Tabla 48 y Figura 101, se muestran en resumen los resultados alcanzados de deformación máxima de forma numérica y gráfica, en la que se observa un aumento progresivo de la deformación, debido a la confiabilidad de los datos se ha considerado los resultados como aproximados.

**Tabla 48**

Deformaciones máximas según modelo por carga puntual equivalente

<b>Ensayos Experimentales</b>	$F_m$	<b>Deformación acero longitudinal</b>
$W_{PENTOLITA}$ [gr]	[T]	[cm]
450	484.23	3.91
660	559.56	4.52
750	585.71	4.73
990	643.45	5.20
1010	647.63	5.23
1050	655.75	5.29
1110	667.34	5.39
1350	707.84	5.72

## Deformaciones Analíticas



**Figura 101** Deformaciones acero longitudinal, carga puntual equivalente

## 6.2 Análisis del modelo por Conservación de la Energía

### 6.2.1 Energía de detonación

El explosivo (PENTOLITA) 50/50, guarda en su composición una proporción de componentes en 50% de TNT y PETN; el balance oxígeno producido durante la detonación convierte la reacción en agua, nitrógeno líquido y dióxido de carbono; para el análisis de la energía generada por la reacción de los elementos químicos se establece valores de formación de calor y peso molecular para cada producto, tanto del explosivo como también de la reacción según se muestra en la Tabla 49.

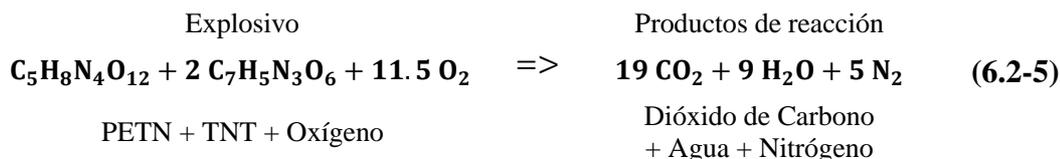
Al realizar un análisis químico del explosivo se calcula el calor de detonación según la ecuación (6.2-2), este valor se multiplica por el peso experimental; como ejemplo se referencia el valor de 450 gramos; este insumo permite dictaminar la energía total liberada, ver ecuación (6.2-3). Se conoce que un Joule en unidades representa Newton por metro (N\*m), por lo que se transforma en unidades de tonelada por metro (T\*m), según se muestra en la ecuación (6.2-4). (Rincón, J. et al., 2015)

$$Q_{kv} = 2045.02 \text{ cal/gr} \quad (6.2-1)$$

$$Q_{kv} = 2045.02 \text{ cal/gr} \quad (6.2-2)$$

$$QT = 2045.02 \frac{\text{cal}}{\text{gr}} * 450 * \frac{4.1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 3852940.38 \text{ J} \quad (6.2-3)$$

$$QT = 3852940.38 \text{ N} * m * \frac{1 \text{ tn}}{1.02 * 10^4 \text{ N}} = 377.74 \text{ T} * m \quad (6.2-4)$$

**Tabla 49**

Calor de formación y peso molecular del explosivo (PENTOLITA)

Producto	Calor de formación [Kcal/mol]	Peso molecular [gr]
PETN ( $C_5H_8N_4O_{12}$ )	+462.94	316
TNT ( $C_7H_5N_3O_6$ )	-16.03	227
Oxígeno ( $O_2$ )	0	32
Dióxido de Carbono ( $CO_2$ )	-94.1	44
Agua ( $H_2O$ )	-57.8	18
Nitrógeno ( $N$ )	0	42

Fuente: (Rincón, J. et al., 2015)

Para determinar la deformación equivalente a los resultados analíticos por el modelo por carga puntual, se acoge el criterio por la ley de conservación de la energía; esta ley gobierna todos los fenómenos naturales conocidos hasta la fecha, sin que exista al momento alguna excepción. Su axioma determina que hay cierta cantidad de energía que no varía a pesar de los cambios que ocurre en la naturaleza, este principio matemático significa que hay una cantidad numérica que no tiene una variación medible cuando esto ocurre. No es la descripción de un mecanismo, o de algo concreto; ciertamente es un hecho complejo, que permite calcular cierto número y cuando se termine de observar que la naturaleza realice sus cambios y el cálculo del número se realiza otra vez, este será igual. (Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M., 1963)

Por este método analítico se relaciona dos tipos de energía que inciden en el fenómeno de estudio. La energía elástica que se aplica para determinar el trabajo que se necesita al momento de deformar un resorte, en este caso el elemento está compuesto de un material y dimensiones que conjugan hacia un valor numérico, esta relación es llamada rigidez; por otra parte la energía calórica que se produce cuando el explosivo es detonado, se encuentra en función de la reacción química generada por los compuestos, debido al calor producido por cada uno de estos con su respectivo peso molar; estas dos energías se igualan asumiendo que no existe disipación por elementos externos cuando se produce el impacto.

$$QT = E_{elástica} \quad (6.2-6)$$

$$E_{elástica} = \frac{1}{2} K \Delta_x^2 \quad (6.2-7)$$

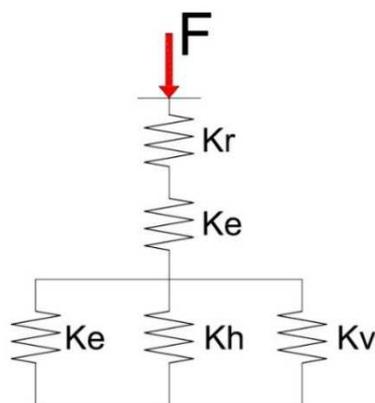
$$\Delta_x = \sqrt{\frac{2 * QT}{K}} \quad (6.2-8)$$

Al conocer que la energía elástica de un material está en función de la rigidez y la deformación del elemento se aplica la expresión matemática descrita en la ecuación (6.2-7); de esta manera la igualar las ecuaciones (6.2-4) y (6.2-7), como también despejar  $\Delta_x$ , se obtiene la expresión matemática que se utilizará en el análisis posterior, ver la ecuación (6.2-8).

### 6.2.2 Rigidez equivalente

El análisis del elemento ensayado en función la energía calórica del explosivo, requiere considerar un modelo equivalente en función de cada una de las rigideces actuantes (rigidez axial del hormigón, rigidez axial en aceros longitudinales y estribos), en vista que los materiales trabajan de forma conjunta, es así que al presentarse la explosión los materiales contribuyen aleatoriamente en la disipación de energía, siendo cuantificable y evidente los efectos en la deformación del acero

longitudinal; en este contexto en la Figura 102 y Tabla 50 se presenta un esquema en la contribución de rigidez del material en las probetas de hormigón armado.



**Figura 102** Esquema de rigidez del elemento estructural

**Tabla 50**

Valores de rigidez axial, probetas de hormigón armado

Elemento	Rigidez	Valor [T/m]
Hormigón de recubrimiento	$K_r$	43200
Varillas transversales (estribos)	$K_e$	98875
Hormigón central (núcleo)	$K_h$	432000
Varillas longitudinales (diámetro 16 mm)	$K_{v1}$	95961.6
Varillas longitudinales (diámetro 18 mm)	$K_{v2}$	12122.72

Los valores presentados permiten resolver a través de operaciones matemáticas la contribución parcial de rigidez actuante en función del esquema definido; en este contexto se determina la rigidez total del elemento durante la ocurrencia del fenómeno físico debido a la explosión controlada; la resolución se muestra de la siguientes ecuaciones: (6.2-9) y (6.2-10).

$$K_v = 4K_{v1} + 4K_{v2} \quad (6.2-9)$$

$$K_v = 4 * 95961.6 \frac{T}{m} + 4 * 12122.72 \frac{T}{m} = 86875.55 \frac{T}{m} \quad (6.2-10)$$

Las rigideces que se encuentran en paralelo se suman para determinar una rigidez  $K1$  parcial. La rigidez  $K1$  permanece en serie con el resto de rigideces por lo que se resuelve las rigideces en orden ascendente de abajo hacia arriba. Se determina una rigidez  $K2$  con la resolución en serie entre la rigidez encontrada  $K1$  y la rigidez de los estribos  $K_e$ . Para encontrar la rigidez total  $K_T$  se realiza la operación en serie entre la rigidez encontrada  $K2$  y la rigidez del hormigón de recubrimiento, el valor total de la rigidez se expresa en la ecuación (6.2-16).

$$K1 = Kh + Kv + 10Ke \quad (6.2-11)$$

$$K1 = 432000 \frac{tn}{m} + 86875.55 \frac{tn}{m} + 10 * 98875 \frac{tn}{m} = 1463950 \frac{tn}{m} \quad (6.2-12)$$

$$K2 = \frac{K1 + 10Ke}{k1 * 10Ke} \quad (6.2-13)$$

$$K2 = \frac{1463950 \frac{tn}{m} + 10 * 98875 \frac{tn}{m}}{1463950 \frac{tn}{m} * 10 * 98875 \frac{tn}{m}} = 1.964 \cdot 10^{-6} \frac{tn}{m} \quad (6.2-14)$$

$$KT = \frac{K2 + Kr}{k2 * Kr} \quad (6.2-15)$$

$$KT = \frac{1.964 \cdot 10^{-6} \frac{tn}{m} + 43200 \frac{tn}{m}}{1.964 \cdot 10^{-6} \frac{tn}{m} * 43200 \frac{tn}{m}} = 590158.015 \frac{tn}{m} \quad (6.2-16)$$

### 6.2.3 Resolución del modelo analítico

Para determinar la deformación generada en el elemento se reemplaza los valores de la rigidez total encontrada en la ecuación (6.2-16) para el modelo de rigidez equivalente; así también la energía calórica producida por efecto de la reacción química durante la detonación, según la ecuación (6.2-8). En la ecuación (6.2-17) se ejemplifica el cálculo de la deformación teórica para 450 gramos de explosivo.

$$\Delta_x = \sqrt{\frac{2 * 377.74 \text{ tn} * m}{590158.014 \text{ tn/m}}} = 0.0357 \text{ m} \quad (6.2-17)$$

#### 6.2.4 Discusión de resultados analíticos

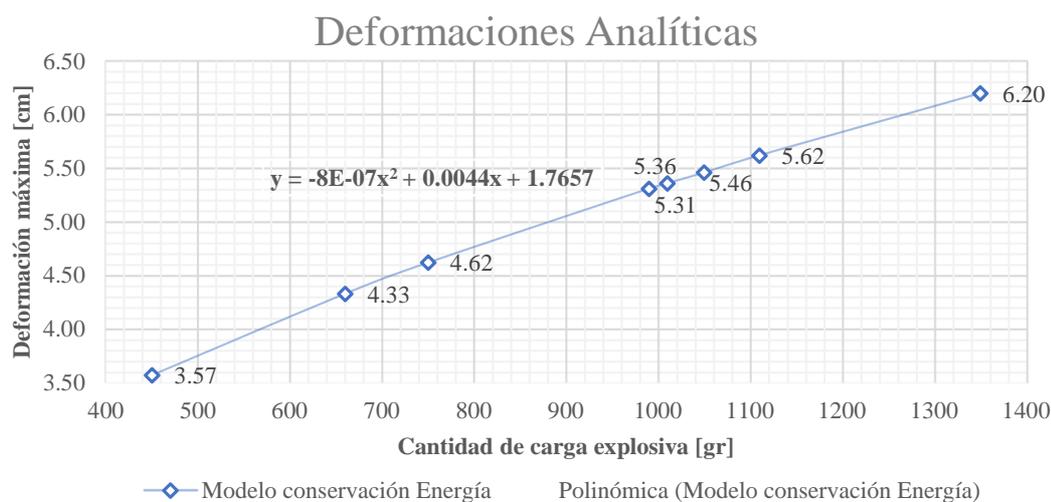
En el ejemplo presentado la deformación del material entra dentro del rango de análisis experimental y analítico por lo que se considera válido para correlacionar con el análisis previo por carga puntual equivalente. Con el fin de encontrar una curva de comportamiento se presenta una tabla de valores de deformación según la ecuación (6.2-8), para cada peso de explosivo (PENTOLITA); (ver Tabla 51 ).

**Tabla 51**

Deformaciones máximas según modelo por conservación de la energía

<b>Ensayos Experimentales</b>	<b>Deformación acero longitudinal</b>
$W_{PENTOLITA}$ [gr]	[cm]
450	3.57
660	4.33
750	4.62
990	5.31
1010	5.36
1050	5.46
1110	5.62
1350	6.20

Los resultados de deformación por rigidez equivalente en función del peso del explosivo utilizado experimentalmente y que se muestra en la Tabla 51, establece un incremento gradual de la deformación en función del aumento de peso; para lo cual se realizó una correlación de comportamiento según la Figura 103, para su posterior contraste de resultados con el método de carga equivalente y de tipo experimental.



**Figura 103** Deformaciones acero longitudinal, conservación de energía

### 6.3 Análisis de la ejecución Experimental

#### 6.3.1 Probetas de hormigón armado con resultados dispersos

Se debe considerar que no todas las probetas fueron ensayadas con cargas explosivas similares en peso y condición de forma; así también existe elementos que, a pesar de ensayarlos con el mismo peso de explosivo y distinta condición de forma, mostraron un comportamiento diferente. Los datos que muestran una dispersión numérica ameritan un estudio particular y específico que sustente su exclusión del análisis estadístico de resultados, como se muestra a continuación; para el efecto la sigla (E - PP) se refiere a especificar ensayos experimentales en probetas de hormigón armado, mientras que (EP) corresponde a ensayos preliminares, en concordancia a lo establecido en el Anexo 3.

##### 6.3.1.1 Ensayo en Probeta No. 1 (E - PP)

Se determina que los resultados de esta probeta no contribuyen en el análisis macro, este hecho se sustenta en el empleo de explosivo con una línea de cargas diédricas sin el uso de amplificador de carga (rompedor cónico). Como resultado se obtuvo un porcentaje de hormigón residual del 39%, sin embargo, contrastando este porcentaje con el peso del explosivo aplicado y los demás ensayos efectuados, se

concluye que el resultado no ingresa en la tendencia de hormigón residual, que para 760 gramos de explosivo (PENTOLITA), corresponde un porcentaje aproximado del 18% de hormigón de residual; por este motivo los valores presentados son excluidos.



**Figura 104** Probeta 1 (E - PP), analizada en el laboratorio de materiales

### 6.3.1.2 Ensayo en Probeta No. 8 (EP) y 9 (EP)



**Figura 105** Probeta 8 (EP), analizada en el laboratorio de materiales

Las probetas 8 (EP) y 9 (EP), son usadas para un análisis especial, debido a que las cargas fueron aplicadas a una altura de 5 cm con respecto a la superficie de contacto del explosivo y la cara de la probeta; esta condición influyó a que el hormigón no se destruya y las deformaciones en los aceros longitudinales sean nulas a pesar que la

cantidad explosivo utilizado fue 1050 gramos de explosivo (PENTOLITA); en este contexto los resultados de hormigón residual de 73% y 76% respectivamente, no son considerados como valores para el análisis macro, en tal virtud son excluidos.

### 6.3.1.3 Ensayo en Probeta No. 16 (EP)

La ejecución experimental con esta probeta tuvo un propósito distinto a la metodología general de ensayo; en este se casó aplicó la carga explosiva en una cara lateral de la probeta en contacto directo con la superficie del terreno. Los 450 gramos de explosivo (PENTOLITA) utilizados lateralmente provocaron una concentración de presión que desplazo la probeta varios metros, sin embargo, comparando los resultados con un ensayo efectuado con igual cantidad de explosivo sobre la cara superior de una probeta en apoyo simple, se determina que el nivel de daño en cuanto a segregación del hormigón es aproximadamente el 50% menos efectiva. Por este motivo los valores presentados son excluidos del análisis macro de resultados.



**Figura 106** Dispositivo de ensayo Probeta 16 (EP)

### 6.3.1.4 Ensayo en Probeta No. 17 (EP)

La experimentación en la probeta 17 (EP) cumplió también un objetivo distinto a la metodología general de ensayo; en esta probeta se aplicó dos cargas explosivas de igual peso y forma (rompedores cónicos de 450 gramos) en las caras laterales opuestas

con respecto al elemento en condición de apoyo simple; el resultado alcanzado determinó una disipación de la energía liberada, que contribuyó a una mínima deformación en aceros longitudinales; por este motivo los valores presentados son excluidos del análisis macro de resultados.



**Figura 107** Dispositivo de ensayo Probeta 17 (EP)

### **6.3.2 Columna de hormigón armado, provincia de Manabí**

El análisis de este ensayo destructivo se sustentó en base al diseño concebido y el actualmente regulado en el país a través de la norma ecuatoriana de la construcción NEC-2015, la cantidad de explosivo utilizado y la deformación en el material. Se pudo evidenciar que la columna en mención tiene una sección rectangular de  $2.000 \text{ cm}^2$  y dispone una armadura de refuerzo longitudinal de  $10 \text{ } \varnothing 28 \text{ mm}$ ; con acero transversal de 1 estribo de  $\varnothing 8 \text{ mm @ } 15 \text{ cm}$ .

Con respecto a la evaluación de diseño se pudo comprobar en función de la cantidad de acero longitudinal y transversal, que las 10 varillas corrugadas localizadas generan un área transversal total de  $61.57 \text{ cm}^2$ , este valor condiciona la existencia del 3.07% de cuantía con respecto a la sección total de la columna; al considerar que este elemento corresponde al de una estructura antigua la cual fue construida cuando se encontraba en vigencia otro código de construcción, se asume que el 3% aproximado,

evidencia el cumplimiento de la norma vigente bajo el rango del 1% al 3%, para el diseño de elementos sometidos a flexo-compresión.

Con respecto a la armadura transversal se calcula el área de acero mínima que debe tener la columna diseñada por confinamiento, las áreas mínimas de estribos son de  $5.64 \text{ cm}^2$  y  $3.47 \text{ cm}^2$  para las características del elemento se conoce una resistencia a la compresión de  $337 \text{ kg/cm}^2$  y una fluencia en el acero de  $4200 \text{ kg/cm}^2$ , comparando los estribos con una área de acero de las varillas de 8 mm de diámetro cada 15 cm, se verifica que el área de los dos ramales actuantes es de  $1.01 \text{ cm}^2$ , lo que genera deficiencia en el comportamiento del elemento por efecto de cortante.

La cantidad total de explosivo (PENTOLITA) utilizado fue 2280 gramos, distribuido en dos cargas de 1140 gramos; estas cargas presentaron un comportamiento no ajustado a lo esperado, en virtud que, al cebarlas con un conector de retardo de 5 milisegundos, provocó que la primera carga por efecto del calor de detonación propio de la explosión remueva la segunda carga del contacto con la columna, consecuentemente detone en el aire; este hecho fue corroborado post-ensayo con el archivo en video; en tal virtud al tener una carga fallida la cantidad de explosivo efectivo en el ensayo fue 1140 gramos de explosivo (PENTOLITA).

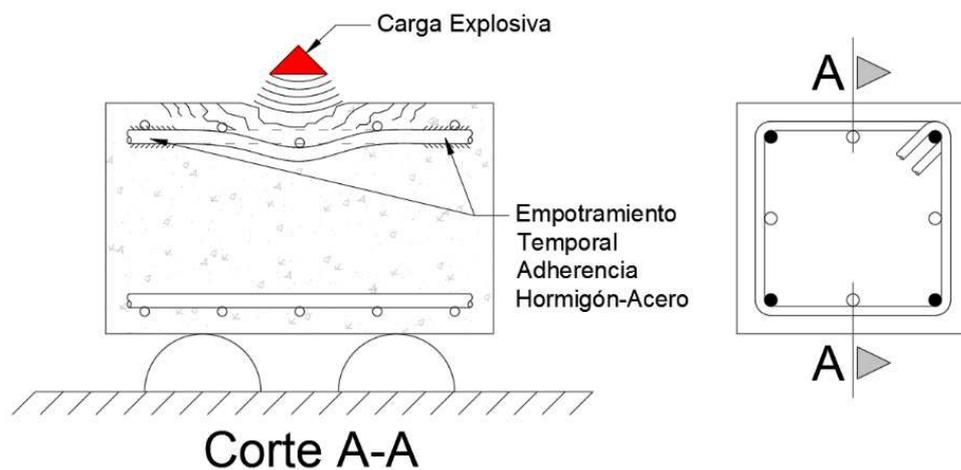
La carga explosiva produjo en la columna ruptura en los estribos centrales, deformación en aceros longitudinales de hasta 9.10 cm, fragmentación del hormigón en una longitud aproximada de un metro hasta fragilizar una parte del núcleo confinado por el acero; además las varillas longitudinales muestran deformaciones en la zona de impacto, se evidencia también impregnaciones de aluminio fundido debido a las láminas de 2 mm utilizadas con las cargas explosivas.

### **6.3.3 Probetas de hormigón armado con resultados admitidos**

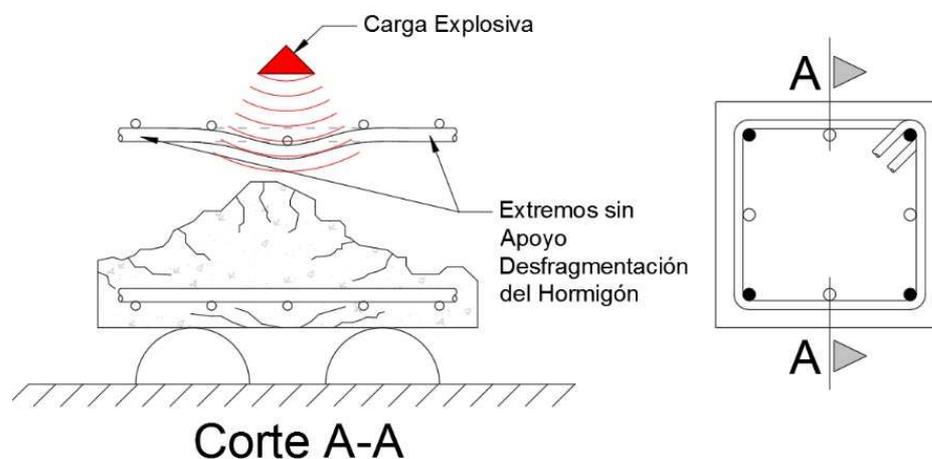
#### **6.3.3.1 Comportamiento en aceros de refuerzo**

En la Figura 108 se observa el comportamiento de las probetas mientras se produce el impacto y transcurridos los primeros milisegundos de la detonación; es

preciso destacar que la probeta constituye un elemento corto en condición de apoyo simple, en la cual su armadura de acero se encuentra adherida y confinada en el hormigón, provocando la deformación inicial en los aceros longitudinales. Seguidamente por efecto de la onda de choque, la presión de incidencia y el calor de detonación producen simultáneamente la desfragmentación del hormigón desde el punto central hasta los extremos y la deformación máxima y ruptura en los aceros longitudinales (ensayos realizados deformación máxima 8 cm, sin evidencia de ruptura); de esta forma se origina la pérdida de resistencia y adherencia en los materiales. Finalmente se genera la expulsión del hormigón en pequeños fragmentos y el cambio de disposición en los aceros de refuerzo como se muestra en la Figura 109.



**Figura 108** Comportamiento inicial de la probeta durante el ensayo

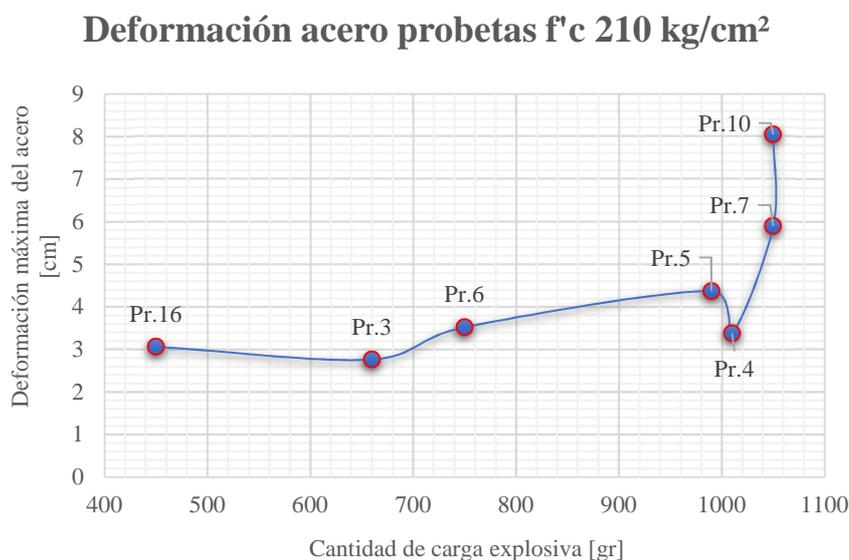


**Figura 109** Comportamiento intermedio de la probeta durante el ensayo

### 6.3.3.2 Discusión de resultados

La información procesada determina que la carga explosiva ubicada sobre la superficie de las probetas de ensayo en función de la condición de forma y peso del explosivo (PENTOLITA) 50/50, son un factor importante para tomar en cuenta dentro del análisis del fenómeno de estudio, en virtud de la tendencia y dispersión de resultados obtenidos con respecto a la deformación del acero longitudinal (ver Figura 110 y Figura 111) y peso del hormigón residual (Figura 112 y Figura 113).

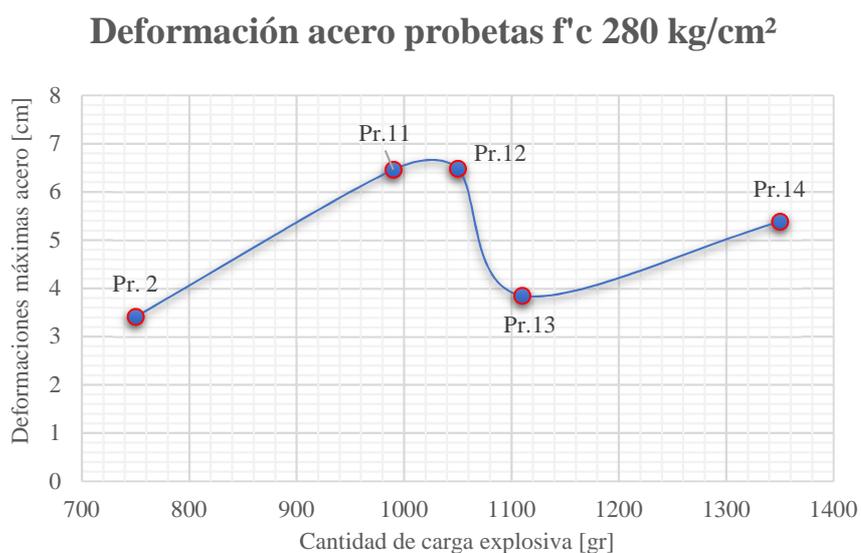
En la Figura 110, se presenta los resultados en función a la deformación del acero longitudinal en probetas  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup>, en esta gráfica se observa una distorsión de resultados en la probeta 4 (E - PP), este hecho se justifica en la baja deformación resultante en el acero, a pesar de la cantidad de explosivo utilizado; por este motivo los valores presentados son excluidos del análisis macro de resultados. Con respecto a la probeta 10 (E - PP), se determina un óptimo desempeño del explosivo en función de la cantidad utilizada, alcanzando una deformación sobre los 8 cm.



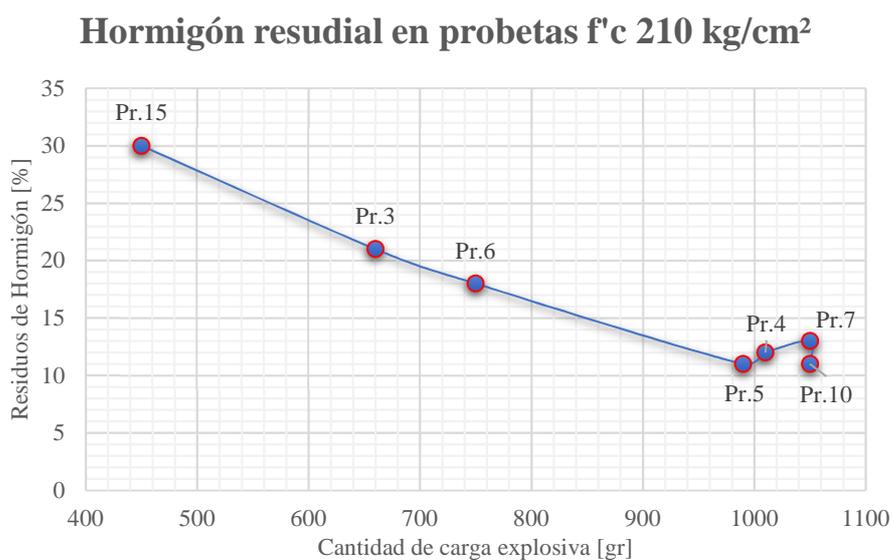
**Figura 110** Deformación del acero longitudinal en probetas  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup>

En la Figura 111, en los resultados presentados en función a la deformación del acero longitudinal en probetas  $f'c$  280 kg/cm<sup>2</sup>, en esta gráfica se observa en la probeta

13 (E - PP), una parecida distorsión de resultados que en la Figura 110, baja deformación a pesar de la cantidad de explosivo utilizado; por este motivo los valores presentados son excluidos del análisis macro de resultados. Con respecto a la probeta 11 (E - PP), se determina un óptimo desempeño del explosivo en función de la cantidad utilizada, alcanzando una deformación de 6.98 cm.



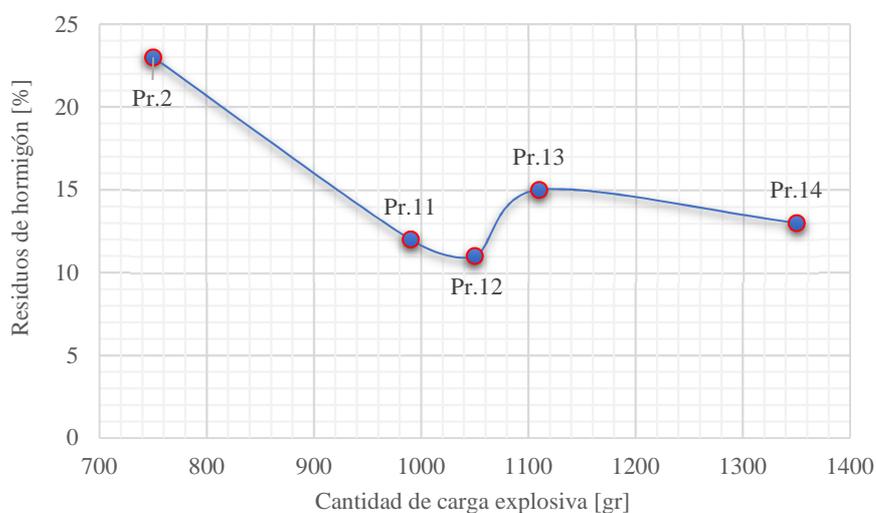
**Figura 111** Deformación del acero longitudinal en probetas f'c 280 kg/cm<sup>2</sup>



**Figura 112** Peso de hormigón residual en probetas f'c 210 kg/cm<sup>2</sup>

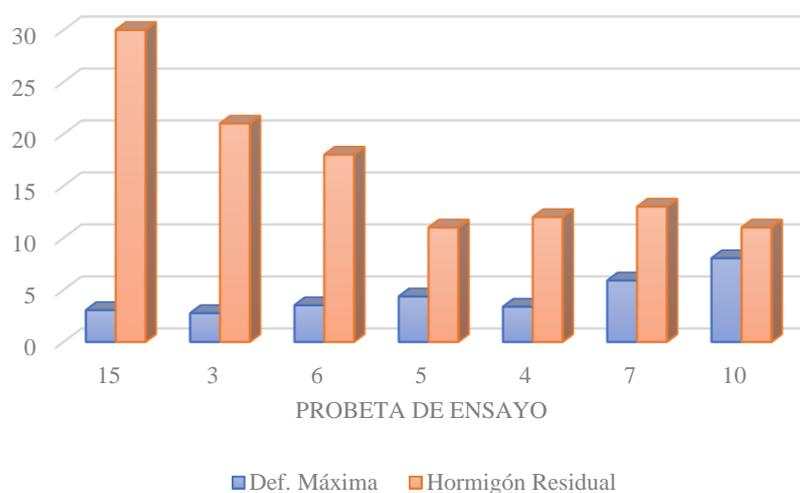
Los resultados que se presentan en probetas con resistencia  $f'c$ : 210 kg/cm<sup>2</sup> y 280 kg/cm<sup>2</sup>, según la Figura 112 y Figura 113, en función de los pesos de hormigón residual posterior a la ejecución de los ensayos destructivos; determinan que al aplicar una carga con explosivo (PENTOLITA) 50/50, en el rango de peso de (900 gr – 1400 gr); se alcanza un porcentaje de hormigón residual mayor 10% y menor al 15%.

### Hormigón residual en probetas $f'c$ 280 kg/cm<sup>2</sup>

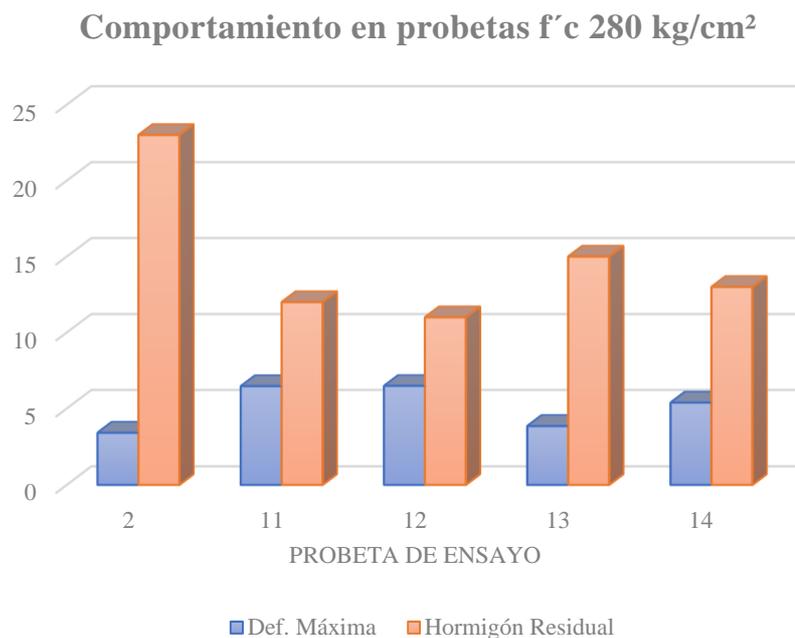


**Figura 113** Peso de hormigón residual en probetas  $f'c$  280 kg/cm<sup>2</sup>

### Comportamiento en probetas $f'c$ 210 kg/cm<sup>2</sup>



**Figura 114** Comportamiento de los materiales en probetas  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup>



**Figura 115** Comportamiento de los materiales en probetas  $f'c$  280 kg/cm<sup>2</sup>

El análisis descriptivo consiste posterior a la detonación en revisar visualmente el material que conforman las probetas de hormigón, este procedimiento post-suceso se realiza con el objetivo de identificar un posible comportamiento de los materiales en cada elemento; es este contexto en la Figura 114 y Figura 115 se describe en resumen el comportamiento alcanzado con respecto a la deformación de acero y peso residual del hormigón en las probetas ensayadas, sobre la base del explosivo utilizado bajo las consideraciones de condición de forma, peso, ubicación y altura con respecto a la superficie de contacto.

En relación con el peso del hormigón residual, se puede establecer que mientras más puntual es la carga explosiva ensayada, menor es la cantidad residual del hormigón, por lo que se dispersa en partículas pequeñas alrededor de la probeta debido a la desfragmentación del material por la presión actuante. Con un análisis similar en la armadura de acero se determina la dependencia de la cantidad de carga explosiva para obtener deformación en los aceros longitudinales y estribos; a mayor cantidad de explosivo existe una mayor dispersión de los elementos alcanzando hasta un cambio significativo de la disposición inicial de las varillas.

Inicialmente incluir las variables de condición de forma, peso, ubicación y altura con respecto a la superficie de contacto del explosivo incrementó el grado de dificultad para establecer una ecuación exacta con respecto a la presión de incidencia; sin embargo, al final fue un planteamiento acertado, ya que permitió establecer una carga explosiva tipo, que optimiza el peso y maximiza el efecto de daño, estos aspectos serán abordados con detalle a continuación.

### 6.3.4 Consideraciones de daño en probetas de hormigón armado

#### 6.3.4.1 Efectos de daño con respecto a la resistencia del hormigón

**Tabla 52**

Análisis de resultados relación de resistencia de hormigón (1)

Probeta	F'c [kg/cm <sup>2</sup> ]	Romp. Cónico [450 gr]	Romp. Cónico [150 gr]	Carga Cilíndrica [150 gr]	Carga Diédrica [180 gr]	Carga Total [gr]	L Acero Long. [cm]	Def. Máx. Acero Long. [cm]
5	210	1	-	-	3	990	44	4.37
11	280	1	-	-	3	990	44	6.98

**Tabla 53**

Análisis de resultados relación de resistencia de hormigón (2)

Probeta	F'c [kg/cm <sup>2</sup> ]	Criterio de falla Conrath ( $\delta/L$ )		Daño Criterio de falla Conrath	Incremento de efecto [%]	Tipo de Carga
5	210	0.099	9.93%	Moderado	-	Rompedor Cónico + Carga Diédrica
11	280	0.159	15.86%	Severo	59.73%	Rompedor Cónico + Carga Diédrica

Los resultados mostrados en la Tabla 52 y Tabla 53, permiten determinar una relación entre la cantidad de carga explosiva 990 gramos de explosivo (PENTOLITA) 50/50, aplicada en dos probetas de hormigón armado de diferente resistencia  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup>, probeta 5 (E - PP) y  $f'c$  280 kg/cm<sup>2</sup>, probeta 11 (E - PP); esta correlación

determina que a igual cantidad y forma de explosivo aplicado en un ensayo destructivo, el efecto de daño en un elemento de  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup> es 59.73% menor que en un elemento de  $f'c$  280 kg/cm<sup>2</sup>.

### 6.3.4.2 Efectos de daño con respecto a la condición de forma del explosivo

Para este análisis se consideró 03 ensayos realizados en diferentes probetas diseñadas y construidas con resistencia del hormigón  $f'c$  280 kg/cm<sup>2</sup>; a la cuales se aplicaron distintas combinaciones de carga explosiva, variando la condición de forma. Las tres cargas explosivas aplicadas tienen como base un rompedor cónico de 450 gramos, como amplificador de efecto daño; sin embargo, diferentes cargas de refuerzo: rompedores cónicos en probeta 2 (E - PP), cargas cilíndricas en probeta 12 (E - PP) y cargas diédricas en la probeta 11 (E - PP), (ver Tabla 54).

**Tabla 54**

Análisis de resultados condición de forma del explosivo (1)

Probeta	F'c [kg/cm <sup>2</sup> ]	Romp. Cónico [450 gr]	Romp. Cónico [150 gr]	Carga Cilíndrica [150 gr]	Carga Diédrica [180 gr]	Carga Total [gr]	L Acero Long. [cm]	Def. Acero Long. [cm]
2	280	1	2	-	-	750	44	3.41
12	280	1	-	4	-	1050	44	6.48
11	280	1	-	-	3	990	44	6.98

**Tabla 55**

Análisis de resultados condición de forma del explosivo (2)

Probeta	Criterio de falla Conrath ( $\delta/L$ )	Peso Base (gr)	Proporción Criterio de falla según Conrath; Peso Base ( $\delta/L$ )		Incremento de efecto [%]	Tipo de Carga
2	7.75%	1050	10.850%	Moderado	-	Rompedor Cónico + Rompedor Cónico
12	14.73%	1050	14.727%	Severo	35.74%	Rompedor Cónico + Carga Cilíndrica
11	15.86%	1050	16.825%	Severo	55.07%	Rompedor Cónico + Carga Diédrica

Para comparar el efecto de daño, se realiza una proporción del criterio de falla a un peso estándar de 1050 gramos como se observa en la Tabla 55, esta correlación determina que, a igual peso de explosivo aplicado en elementos de la misma resistencia de hormigón en un ensayo destructivo, la condición de forma del explosivo influye en el efecto de daño; es así como el daño efectuado cuando se coloca cargas cilíndricas es 35.74 % mayor que utilizar solo cargas cónicas; así también la efectividad de las cargas diédricas es 55.07% mayor en relación a las cargas cónicas.

### 6.3.4.3 Efectos de daño con respecto al uso de perfiles de aluminio

Los resultados mostrados en la Tabla 56, permiten determinar una relación entre la carga explosiva utilizada 1050 gramos de explosivo (PENTOLITA) 50/50, aplicada en dos probetas de hormigón armado de igual resistencia  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup>, siendo en este caso igual la condición de forma y peso del explosivo con la variación que mientras en la probeta 10 (E – PP), se agregó una lámina de aluminio sobre la superficie de contacto del explosivo, la probeta 7 (E – PP), no fue colocada.

**Tabla 56**

Análisis de efecto de daño utilizando láminas de aluminio (1)

Probeta	F'c [kg/cm <sup>2</sup> ]	Romp. Cónico [450 gr]	Lamina Aluminio [2 mm]	Carga Cilíndrica [150 gr]	Carga Total [gr]	Longitud Acero Long. [cm]	Def. Máx. Acero Long. [cm]
7	210	1	No	4	1050	44	5.90
10	210	1	Si	4	1050	44	8.05

**Tabla 57**

Análisis de efecto de daño utilizando láminas de aluminio (2)

Probeta	F'c [kg/cm <sup>2</sup> ]	Criterio de falla Conrath ( $\delta/L$ )		Daño Criterio de falla Conrath	Incremento de efecto [%]	Tipo de Carga
7	210	0.134	13.41%	Moderado	-	Rompedor Cónico + Carga Cilíndrica
10	210	0.183	18.30%	Severo	36.44 %	Rompedor Cónico + Carga Cilíndrica

La correlación aplicada determina que a igual peso y forma de explosivo empleado en un ensayo destructivo, sobre elementos de igual resistencia de hormigón  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup>, el efecto de daño se amplifica 36.44% al utilizar una línea de aluminio de 2 mm, sobre la superficie de contacto del explosivo; estos resultados se pueden observar en la Tabla 57.

## 6.4 Comparación de resultados analíticos y experimentales

Posterior a delimitar la información conseguida y discernir en tablas de comportamiento los resultados, se realiza la verificación entre los valores obtenidos analíticamente y de forma experimental; de esta forma se procede conocer si la cantidad de información es suficiente para establecer el modelo como válido, o de lo contrario encaminar el estudio a un mayor número de resultados experimentales para mejorar la resolución del problema planteado. (Thacker, et al., 2004)

### 6.4.1 Comparación entre resultados analíticos

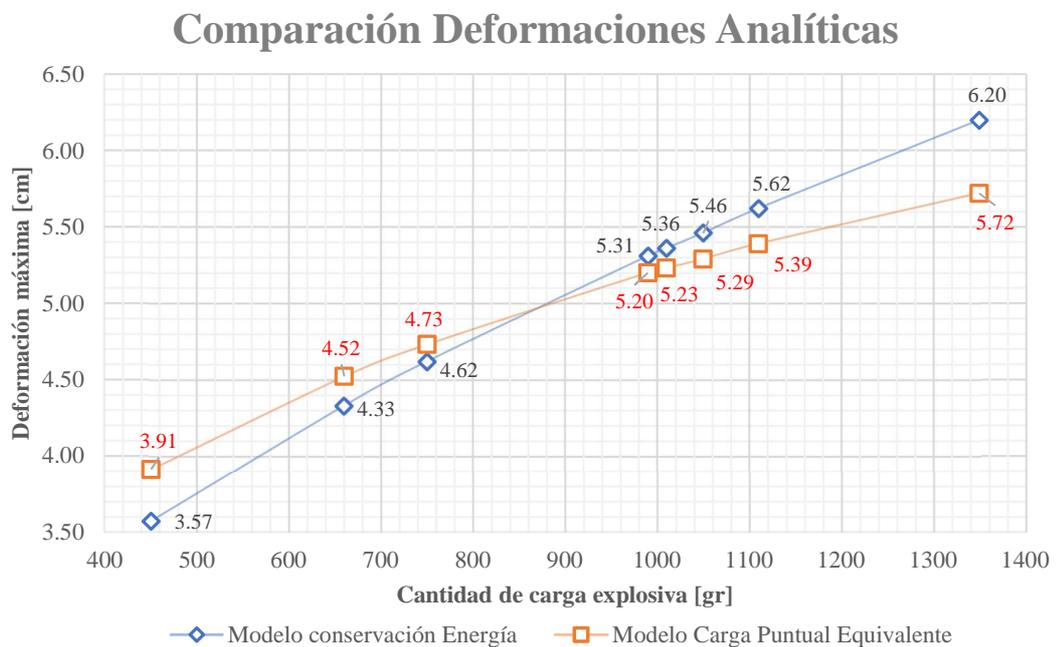
Dentro del modelo matemático planteado se estableció dos metodologías para determinar la deformación máxima de los aceros longitudinales. El primer método planteó la influencia de una carga puntual equivalente que resulta de la relación entre la presión máxima de incidencia y un área de impacto de mayor afectación, en función de la rigidez axial del elemento deformado; el segundo método se basó en la ley de la conservación de la energía en función de una rigidez equivalente total de la probeta de hormigón armado; los valores determinado se muestran Tabla 58 y Figura 116.

**Tabla 58**  
Deformación analítica en aceros longitudinales

<b>Ensayos Experimentales</b> $W_{PENTOLITA}$ [gr]	<b>Deformación Carga Puntual Equivalente</b> [cm]	<b>Deformación Conservación de Energía</b> [cm]	<b>Variación modelos analíticos</b> [%]	<b>Deformación Analítica crítica</b> [cm]
450	3.91	3.57	9.52 %	3.91
660	4.52	4.33	4.39 %	4.52

*Continúa...*

750	4.73	4.62	2.38 %	4.73
990	5.20	5.31	2.07 %	5.31
1010	5.23	5.36	2.43 %	5.36
1050	5.29	5.46	3.11 %	5.46
1110	5.39	5.62	4.09 %	5.62
1350	5.72	6.20	7.74 %	6.20



**Figura 116** Comparación de deformaciones analíticas

En la información expuesta se observa que en función de la cantidad de explosivo (PENTOLITA) utilizado para los ensayos experimentales según se especifica en la Tabla 58, en el rango de (450 a 750) gramos, la condición más crítica de deformación analítica en aceros longitudinales se presenta por el método de carga puntual equivalente, mientras que en el rango de (990 a 1350) gramos, la tendencia crítica cambia por el método de conservación de la energía; además de todos los valores examinados la variación promedio corresponde al 4.47 %, por lo cual se determina una adecuada concepción de los modelos analíticos planteados.

### 6.4.2 Comparación entre resultados experimentales y analíticos

En base a los valores presentados en la Tabla 59, para las probetas de hormigón armado ensayadas, se puede confirmar que los aceros longitudinales cerca de la zona de impacto sufrieron una deformación permanente que supero el límite elástico, este hecho se fijó analíticamente (ver Tabla 58) y se obtuvo experimentalmente (ver Tabla 36); en tal virtud dentro de la zona plástica se observa que en las probetas 7, 10, 11 y 12 (E - PP), presentaron un comportamiento que supero inclusive el límite de deformación analítica establecido, sin embargo, en ningún caso llegaron a la fractura.

**Tabla 59**

Comparación de resultados experimentales y analíticos

Condición Probetas		Deformación Acero Longitudinal		
$W_{PENTOLITA}$ [gr]	Probeta Número	Experimental [cm]	Analítica crítica [cm]	Variación [%]
450	15	3.06	3.91	21.74%
660	3	2.76	4.52	38.94%
750	2	3.41	4.73	27.91%
750	6	3.52	4.73	25.58%
990	5	4.37	5.31	17.70%
990	11	6.98	5.31	31.45%
1010	4	3.38	5.36	36.94%
1050	7	5.90	5.46	8.06%
1050	10	8.05	5.46	47.44%
1050	12	6.48	5.46	18.68%
1110	13	3.85	5.62	31.49%
1350	14	5.38	6.20	13.23%

Los resultados muestran también que a medida que se incrementa la cantidad de explosivo (PENTOLITA), la deformación en los aceros aumenta, sin que este hecho acoja estrictamente una tendencia lineal. Al contrastar los valores numéricos nos permiten establecer un rango de confiabilidad aceptable al existir un margen de variación promedio entre el análisis experimental y analítico del 26.60%; el cual

permitirá ser una referencia en nuevas investigaciones para refinar los modelos analíticos y ajustarlos a consideraciones que no fueron concebidas.

Luego de validar que las deformaciones experimentales se encuentran dentro del rango de aceptabilidad analítica se procede a correlacionar estos valores según la evaluación de daño para elementos estructurales por explosiones propuestos por (Conrath, E. et al., 1999), y que consta en este estudio en el CAPÍTULO II (Tabla 5). Bajo la consideración que las probetas fueron ensayadas en condición de apoyo simple se asume la evaluación para elementos tipo viga de hormigón armado con el criterio de falla de deformación unitaria ( $\delta/L$ ), que relaciona la deformación central respecto a la longitud efectiva del elemento; de esta manera en caso que el valor en porcentaje se encuentre dentro del rango de (4.00% al 7.99%) el daño es ligero, si el rango está dentro del (8.00% al 14.99%) el daño es moderado, y si supera el 15% el daño es severo; en este contexto en la Tabla 60, se presentan la evaluación de daño en las probetas de hormigón armado según la deformación unitaria alcanzada.

**Tabla 60**  
Evaluación de daño en probetas de hormigón armado

CONDICIONES DE LA PROBETA					CRITERIO DE FALLA		
$W_{PENTOLITA}$	Número probeta ensayada	$f'_c$	Longitud Efectiva	Def. Exp.	Daño $\delta/L$	Daño $\delta/L$	Evaluación
[gr]		[kg/cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[adm]	[%]	Observación
450	15	210	44.00	3.06	0.07	6.95%	Ligero
660	3	210	44.00	2.76	0.06	6.27%	Ligero
750	2	280	44.00	3.41	0.08	7.75%	Ligero
750	6	210	44.00	3.52	0.08	8.00%	Moderado
990	5	210	44.00	4.37	0.10	9.93%	Moderado
990	11	280	44.00	6.98	0.16	15.86%	Severo
1010	4	210	44.00	3.38	0.08	7.68%	Ligero
1050	7	210	44.00	5.90	0.13	13.41%	Moderado
1050	10	210	44.00	8.05	0.18	18.30%	Severo
1050	12	280	44.00	6.48	0.15	14.73%	Moderado
1110	13	280	44.00	3.85	0.09	8.75%	Moderado
1350	14	280	44.00	5.38	0.12	12.23%	Moderado

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 60, se determinan valores de daño menores al 8% en las probetas 2, 3, 4 y 15 (E - PP), consecuentemente la calificación de daño en estos elemento es LIGERO; las probetas 5, 6, 7, 12, 13 y 14 (E - PP), tienen valores mayores al 8% y menores al 15%, en así que se clasifican con un de daño MODERADO; en el caso de las probetas 10 y 11(E - PP), los daños superan el 15%, en tal virtud estos elementos son calificados con daño SEVERO.

En función de la calificación de daño severo que se presentan en las probetas 10 y (E - PP) y sobre la base de las características de diseño con las que fueron concebidas y construidas las probetas, además, la particularidad de la carga explosiva utilizada en función de la cantidad, altura de contacto y condición de forma del explosivo (PENTOLITA) 50/50 utilizado, se determina que el material empleado en la probeta 11 (E - PP), cumple con los parámetros de efectividad y optimización para dañar severamente una sección tipo columna de hormigón armado de sección (30 x 30) cm, a través de la combinación rompedores cónicos y cargas diédricas.

## **6.5 Curvas de daño por impacto con cargas explosivas**

### **6.5.1 Curva Teórica**

Esta curva se estableció acorde al análisis efectuado en el CAPÍTULO III, numeral 3.3, sobre la base del manual 3-34.214 (FM 5-250), del ejército de los Estados Unidos; cuyos resultados determinan una relación entre el espesor (E) o radio de perforación (R) expresado en centímetros y el peso de explosivo (PENTOLITA) 50/50, expresado en gramos (ver Tabla 12 y Figura 22).

### **6.5.2 Curva Teórica Experimental**

Al tomar de referencia los resultados descritos en el presente capítulo, numeral 6.4.2, se determina que la carga explosiva utilizada en la probeta 11 (E - PP), cumple los parámetros de efectividad y optimización del material explosivo (PENTOLITA) 50/50, para generar un daño severo en un elemento tipo columna de sección (30 x 30)

centímetros. En este contexto los 990 gramos, representan una carga explosiva tipo, caracterizada experimental y analíticamente bajo los condicionamientos de forma y peso del explosivo; de esta manera se presentan los valores de esta curva ajustando la cantidad de explosivo en la sección de (30 x 30) cm de 780.15 gramos a 990 gramos; seguidamente a partir de este reajuste con la misma tendencia teórica se valida la cantidad de explosivo en secciones mayores y menores, (ver Tabla 63 y Figura 117 ).

### 6.5.3 Curva Experimental

Esta curva se establece sobre los resultados experimentales obtenidos en las probetas de hormigón armado y la columna experimentada en la provincia de Manabí. El primer punto de análisis ratifica el criterio que los 990 gramos del explosivo (PENTOLITA), son la cantidad óptima para fragilizar una sección de (30 x 30) cm, según lo descrito en el numeral 6.4.2. El segundo punto de análisis corresponde en base a los resultados descritos en el numeral 6.3.2, en el cual se determina una evaluación de daño LIGERO para elementos estructurales propuesto por (Conrath, E. et al., 1999) según se muestra en la Tabla 61. Para alcanzar un criterio de de falla SEVERO, se reajustan las condiciones del elemento según se observa en la Tabla 62, este valor permite fragilizar el elemento tipo columna de sección de 2000 cm<sup>2</sup>, aproximadamente (45 x 45) cm.

**Tabla 61**

Criterio de falla obtenido en columna, provincia de Manabí

$W_{PENTOLITA}$ [gr]	Número probeta ensayad	$f'c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Longitud Efectiva [cm]	Def. Exp. [cm]	Daño $\delta/L$ [adm]	Daño $\delta/L$ [%]	Evaluación Observación
<b>1140.00</b>	Manabí	337	140.00	<b>9.10</b>	0.065	6.50%	<b>Ligero</b>

**Tabla 62**

Criterio de falla ajustado en columna, provincia de Manabí

$W_{PENTOLITA}$ [gr]	Número probeta ensayad	$f'c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Longitud Efectiva [cm]	Def. Ajustada [cm]	Daño $\delta/L$ [adm]	Daño $\delta/L$ [%]	Evaluación Observación
<b>2630.77</b>	Manabí	337	140.00	<b>21.00</b>	0.15	15.00%	<b>Severo</b>

Sobre la base del análisis, los dos valores obtenidos de forma experimental, sección (30 x 30) cm y debidamente ajustados, sección (45 x 45) cm, se estandariza una tendencia potencial según se describe en la ecuación (6.5-1), donde “y” representa el peso equivalente en explosivo (PENTOLITA) y “x” el espesor del elemento de hormigón armado de sección cuadrada; los resultados compilados la curva experimental se muestran en la Tabla 63 y la Figura 117.

$$y = 0.2724 x^{2.4104} \quad (6.5-1)$$

#### 6.5.4 Discusión de resultados

Las tres curvas de daño por impacto con cargas explosiva en elementos tipo columna de hormigón armado que se muestran en la Figura 117, constituyen el producto final de esta investigación, que se sustenta bajo criterios teóricos, analíticos y experimentales, cuya tendencia responde que a mayor sección de hormigón armado a demoler, mayor será la cantidad de explosivo a utilizar; por otra parte al contrastar los valores presentados en las tres curvas para las secciones especificadas en la Tabla 63, la variación promedio es del 11.58 %, de esta manera se reafirma la confiabilidad de resultados propuestos.

**Tabla 63**

Curvas de daño por impacto con cargas explosivas

Elementos	Curva Teórica Ajustada	Curva Teórica Experimental	Curva Experimental
Sección cuadrada de hormigón armado	Análisis manual (FM 5-250) U.S. Army	Ajustada con ensayos destructivos en sección (30 x 30) cm	Tendencia potencial en base a los ensayos destructivos efectuados
Espesor / Radio / Lado (cm)	$W_{Pentolita}$ (gr)	$W_{Pentolita}$ (gr)	$W_{Pentolita}$ (gr)
25	587.12	796.98	637.97
30	780.15	990.00	990.00

Continúa...

35	1170.85	1380.70	1435.58
40	1664.33	1874.18	1980.67
45	2269.68	2479.54	2630.77
50	2995.58	3205.43	3391.60
55	3850.36	4060.21	4267.54

### Curvas de daño por impacto con cargas explosivas



**Figura 117** Curvas de daño por impacto con cargas explosivas

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones

- Se realiza 20 ensayos experimentales destructivos, según detalle: 06 ensayos preliminares, 01 ensayo con un elemento extraído de una edificación afectada por el terremoto del 16-A y 13 ensayos normalizados con probetas de hormigón armado, de las cuales: resistencia 337 kg/cm<sup>2</sup> (01 Probeta), resistencia 280 kg/cm<sup>2</sup> (05 Probetas) y resistencia 210 kg/cm<sup>2</sup> (08 Probetas). Para el efecto se diseña y construye probetas tipo columna de hormigón armado de sección cuadrada de dimensiones: (30 x 30) cm, longitud 0.50 m, resistencia de hormigón de: (210 y 280) kg/cm<sup>2</sup> y cuantía del 2 %; en base a la norma ecuatoriana de la construcción vigente NEC-15.
- Se establece y ejecuta una metodología para ensayos normalizados que contempla la aplicación de cargas explosivas armadas en base de explosivo (PENTOLITA) 50/50, sobre una cara y a media longitud de las probetas de hormigón armado; de este modo se varió el peso del explosivo (PENTOLITA) entre 450 y 2280 gramos; como también, la forma del encartuchado entre: cargas cilíndricas, diédricas, rompedores cónicos y mixtas.
- Se evidencia que mientras mayor es la cantidad de hormigón residual existente, menor es la deformación en los aceros longitudinales, debido a que el hormigón absorbe parcialmente la energía liberada.
- Se define que la condición de forma del explosivo influyen positivamente en maximizar el efecto de daño en los aceros longitudinales; es así como a similares condiciones de diseño y construcción de las probetas e igual peso de explosivo, el efecto será distinto si varía la condición de forma del explosivo (PENTOLITA); en este contexto las cargas cilíndricas generan un 35.74 % mayor efecto de daño en relación a la cargas cónicas, mientras que las cargas diédricas generan un 55.07% mayor efecto de daño en relación a la cargas

cónicas; siempre y cuando este tipo de cargas sean empleadas utilizando rompedores cónicos como explosivo amplificador de carga.

- Se establece que el uso de cargas explosivas combinadas entre: rompedores cónicos y cargas diédricas adheridas con perfiles angulares de aleación de aluminio de 2 mm en su superficie de contacto, permiten focalizar y maximizar la dirección de la presión de detonación sobre el elemento a ensayar; en consecuencia, se comprobó que el efecto de daño en los aceros longitudinales se amplifica 36.44% al utilizar una línea de aluminio de 2 mm, sobre la superficie de contacto del explosivo; este hecho influye en maximizar la deformación en la armadura de acero, amplificar el daño y optimizar la cantidad de explosivo a emplear.
- Se define como aspecto más importante el comportamiento del acero longitudinal, ya que este material no llega a la fractura; mientras que el hormigón alcanzó condiciones de segregación y fractura de forma parcial o total; este suceso es uno de los factores que influyen en la dispersión de los resultados que contrastan el modelo analítico del experimental.
- Se establece que con 990 gramos de explosivo (PENTOLITA) 50/50, distribuido en 1 rompedor cónico y 03 cargas diédricas; se alcanza un daño SEVERO en aceros longitudinales cerca de la zona de impacto para secciones tipo columna de (30 x 30) cm, al aplicar la metodología para evaluación de daño en elementos estructurales propuesto por (Conrath, E. et al., 1999), con calificación de daño en condición de: leve, moderado y severo.
- Se determina que las micro-fisuras en los aceros longitudinales son causales de posible colapso de elementos estructurales a mediano plazo; en razón que estas fisuras a pesar de que no venga acompañadas de deformaciones críticas constituyen concentradores de esfuerzo.
- Se establece que cuando el hormigón se desfragmenta sobre el 50%, el elemento pierde su resistencia como hormigón armado, aspecto que incide como causal de falla estructural por pérdida de confinamiento.

- Se considera para la resolución del modelo matemático y la ejecución experimental la ecuación de presión según (Henrych, 1979), esta presión se transforma a una fuerza máxima equivalente por la relación de presión y área; el área se determinó en base a los ensayos experimentales y corresponde al valor efectivo promedio de 625 cm<sup>2</sup>, lo que constituye 2 veces la superficie de contacto del explosivo con las probetas de hormigón armado.
- Se determina que los análisis teóricos levantados en base al manual 3-34.214 (FM 5-250), del ejército de los Estados Unidos, excluyen cualquier tipo de relación con respecto a la resistencia del hormigón; por lo cual los resultados que se genera en este estudio se expresan en términos de cantidad de explosivo (PENTOLITA) y sección transversal, tomando como factor de daño la deformación del acero longitudinal.
- Se determina una curva analítica de daño severo por impacto de cargas explosivas en probetas tipo columna de hormigón armado; el estudio efectuado contrasta la tendencia de resultados obtenidos entre los análisis matemáticos y la ejecución experimental.
- Se establece como comportamiento que a medida que aumenta la sección de hormigón requerida a demoler, incrementa cantidad de explosivo (PENTOLITA) 50/50 a utilizar, considerando que este incremento tiene una tendencia de tipo potencial.
- La dispersión de los resultados teóricos y prácticos se atribuyen a que las fórmulas de cálculo no conciben condiciones de forma del explosivo y el material, contorno de presiones, presión atmosférica, entre otras.
- Se determina al correlacionar las curvas teóricas levantadas y el resultado final de este estudio, que las cantidades óptimas de explosivo para generar daño en elementos diseñados a flexo-compresión es mayor en 11.58 % promedio, que los valores determinados de forma teórica.
- Se genera la necesidad de experimentar el comportamiento de este fenómeno físico en elementos tipo columna de hormigón armado de longitudes constructivas en edificaciones y bajo cargas de trabajo axial; a fin de determinar

por efecto de la detonación la disipación de energía en el material y evidenciar la fractura o deformación del mismo.

- Se determina necesario realizar un mayor número de ensayos específicos para obtener una curva estadística de resultados y analizar el comportamiento de los elementos con un gramaje delimitado; es necesario considerar que el modelo establece una presión sobre la cara de la probeta sin toma en cuenta la forma de las cargas ni el espacio generado entre ellas por lo debe ser optimizado.
- Se presenta una propuesta de diseños estructurales (ver Anexos: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11) para probetas de hormigón armado en escala real, que incluye un banco de pruebas que simula condiciones de trabajo en elementos tipo columna en una edificación; a fin de ajustar condiciones de borde en una nueva investigación.
- En base al artículo 21, del vigente reglamento de Régimen Académico a la Ley Orgánica de Educación Superior, expedido según resolución RPC-SE-13-No.-051-2013; en cuyo numeral 3, párrafo 8; que aborda la Unidad de Titulación para programas de grado, mismo señala: “Todo trabajo de titulación deberá consistir en una propuesta innovadora que contenga, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta. Para garantizar su rigor académico, el trabajo de titulación deberá guardar correspondencia con los aprendizajes adquiridos en la carrera y utilizar un nivel de argumentación coherente con las convenciones del campo del conocimiento”; en tal virtud, al haber cubierto los contenidos y alcanzar el objetivo del estudio, se concluye la pertinencia y cabal observancia de la normativa legal que habilita el cumplimiento de este requisito parcial previa la obtención del título de Ingeniero Civil.

## **7.2 Recomendaciones**

- Para ajustar la experimentación a condiciones de borde ideales, se recomienda una nueva investigación que conciba implementar los diseños estructurales propuestos, (ver Anexos: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11) para probetas de hormigón

armado en escala real y un banco de pruebas (prototipo) que simule las condiciones de trabajo de elementos tipo columna en una edificación (carga axial); así también refinar los modelos matemáticos planteados y mejorar paralelamente los protocolos de ensayo, además la toma de mediciones durante la ejecución experimental; usufructuando así la infraestructura tecnología disponible.

- Al observar un amplio espectro en el área de conocimiento aprendida, se recomienda motivar la investigación e innovación de nuevos estudios con mayor profundidad sobre el tema, asociados al comportamiento plástico y la mecánica de la fractura de los materiales por medio modelos matemáticos, experimentales y computacionales; a su vez establecer reparos a la Norma Ecuatoriana de la Construcción en cuanto a parámetros de diseños para mitigar acciones terroristas en diseños estructurales.
- Para mantener parámetros de seguridad y control en los procesos de almacenamiento, transporte y manipulación de material explosivo, se recomienda en futuras investigaciones mantener la vinculación con personal técnico especialista en el manejo de explosivos y la habilitación de instalaciones debidamente adecuadas y certificadas para el efecto; en virtud que el manejo de este tipo de material es de uso restringido en el país e implica condiciones de alto riesgo y de tipo legal.
- Los resultados generados en este estudio respaldan la necesidad para la creación de una línea de investigación en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, afín a las demoliciones controladas, correlacionada a Seguridad y Defensa, Estructuras y Construcciones, entre otras.

## REFERENCIA

- ACI. (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete. *Código ACI-318S-11*. (C. 318, Ed.) USA, Michigan, Farmington Hills: American Concrete Institute ACI. Obtenido de [www.concrete.org](http://www.concrete.org)
- Akhavan, J. (2004). *The Chemistry of Explosives* (2da ed.). (R. S. Chemistry, Ed.) Cambridge, GB: RSCP Published.
- 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.
- Army, U. S. (2007). Field Manual 3-34.214 (FM 5-250). *Explosives and Demolitions*. Washington, DC, United State of America: U.S. Government, Headquarters, Department of the Army.
- Astarlioglu, S. et al. (2013). Behavior of reinforced concrete columns under combined effects of axial and blast-induced transverse loads. *Engineering Structures*, 55, 26-34.
- Baker, W. E. (1973). *Explosions in Air*. Austin, TX, USA: Southwest Research Institute, University of Texas Press.
- Blanco, M. (2012). Criterios Fundamentales para el diseño Sismoresistente. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 7(3), 71-84. Obtenido de [marianela@gmail.com](mailto:marianela@gmail.com)
- Brode, H. (1955). Numerical Solutions of Spherical Blast Waves. *Journal of Applied Physics*, 26(6), 766-775. doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.1722085>
- 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.

- COSUDE. et al. (2017). Construir mejor con mampostería confinada. Ecuador: Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación (COSUDE).
- Crawford, J.E. et al. (2001). Composite retrofits to increase the blast resistance of reinforced concrete buildings. *Proceedings of the 10th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures*, San Diego, CA.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1963). *The Feynman Lectures on Physics* (Vol. 1). California: California Institute of Technology.
- Foglar, M. & Kovar, M. (2013). Conclusions from experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks. *International Journal of Impact Engineering*, 59, 18-28.
- Fujikura, S. et al. (2007). Technical Report MCEER-07-0005. *Experimental Investigation of Blast Performance of Seismically Resistant Concrete-Filled Steel Tube Bridge Piers*. (S. Fujikura, M. Bruneau, & D. Lopez-Garcia, Edits.) MCEER, University at Buffalo, The State University of New York. Obtenido de <http://mceer.buffalo.edu>
- Guevara, T. L., & García, L. E. (February de 2005). The Captive and Short-Column Effects. *Earthquake Spectra*, 21(1), 141-160.
- Henrych, J. (1979). *The Dynamics of Explosion and its Use*. USA: Elsevier Scientific Publishing.
- Karlos, V. & Solomos, G. (2013). Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components. *Report EUR 26456 EN*. (J. R.-I. Citizen, Ed.) Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2788/61866
- Li, J. et al. (2015). Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion. *Engineering Structures*, 102(1), 395-408.
- Mays, G. C., & Smith, P. D. (Edits.). (1995). Blast effects on buildings. *Design of building to optimize resistance to blast loading*, ISBN: 0727720309. London, UK: Thomas Telford Publications.
- 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. Obtenido de <http://www.ebrary.com>

- NATO. (2010). Allied ammunition storage and transport publication 1. *Manual of NATO safety principles for the storage of military ammunition and explosives, AASTP-1*. (M. A. (MAS), Ed.) Belgium: North Atlantic Treaty Organization NATO.
- Ngo, T. et al. (January de 2007). Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview. (P. M. T. Ngo, Ed.) *Electronic Journal of Structural Engineering EJSE Special Issue, Loading on Structures*, 76-91. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/279897768>
- ODA-UN, 01.50. (2015). International Ammunition Technical Guideline IATG 01.50. *UN explosive hazard classification system and codes, 2da*. Geneve. Obtenido de [www.un.org/disarmament/un-safeguard](http://www.un.org/disarmament/un-safeguard)
- ODA-UN, 01.80. (2015). International Ammunition Technical Guideline IATG 01.80. *Formulae for ammunition management*. Geneve. Obtenido de [www.un.org/disarmament/un-safeguard/](http://www.un.org/disarmament/un-safeguard/)
- Ortiz, F. G. (2011). *Diccionario de metodología de la investigación científica (3era. ed.)*. México D.F.: LIMUSA.
- Rigby, S. E., Tyas, A., & Bennett, T. (2012). Single-Degree-of-Freedom response of finite targets subjected to blast loading - The influence of clearing. *Engineering Structures*, 396-404.
- Rincón, J. et al. (2015). Cálculo de parámetros termodinámicos para explosivos militares. Aplicación de fundamentos termodinámicos y propiedades de los explosivos militares. (J. Rincón, J. Fonseca, & R. Carvajal, Edits.) *Revista Científica General José María Córdova*, 13(16), 221-239.
- SaferGuard-UN. (21 de 03 de 2017). *UN SaferGuard*. Obtenido de International Ammunition Technical Guidelines: <https://www.un.org/disarmament/un-safeguard/kingery-bulmash/>
- 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.
- Smith, P., & Hetherington, J. (Edits.). (1994). *Blast and ballistic loading of structures*. Oxford: Boston: Butterworth-Heinemann.

- Tai, Y. S., Chu, T. L., Hu, H. T., & Wu, J. Y. (2011). Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air blast load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 140-147.
- Thacker, B. H., Doebling, S. W., Hemez, F. M., Anderson, M. C., Pepin, J. E., & Rodriguez, E. A. (2004). *Concepts of Model Verification and Validation*. Los Alamos National Lab, Department of Energy (DOE). Los Alamos: Charmian Schaller.
- Trajkovski, J. t al. (2014). Minimum mesh design criteria for blast wave development and structural response - MMALE method. (J. Trajkovski, R. Kunc, J. Perenda, & I. Prebil, Edits.) *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(11), 1999-2017. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-78252014001100006>
- U.S. DoD. (2012). General Explosives Safety Information and Requirements. *DoD Ammunition and Explosives Safety Standards Manual, 1(6055.09-M), 2008 Incorporating Change 1, March 12, 2012*. Washington DC, Virginia, United States of America: U.S. Department of Defense.
- U.S. DoD. (2014). Structures to resist the effects of accidental explosions. *Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02), 2008 Incorporating Change 2, 1 September 2014*. Washington DC, Virginia, United States of America: U.S. Department of Defense.
- Weaver, W., & Johnston, P. (1987). *Structural Dynamics by Finite Elements*. (W. Hall, Ed.) Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.: Prentice Hall.
- X. Gu et al. (2016). *Basic Principles of Concrete Structures*. (X. Gu, X. Jin, & Y. Zhou, Edits.) Berlin: springer-Verlag Berlin Heidelberg and Tongji University Press 2016. doi:10.1007/978-3-662-48565-1\_2
- Zakrisson, B. (2010). Numerical and Experimental Studies of Blast Loading. *Licentiate Thesis - Luleå University of Technology, Division of Solid Mechanics, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering*. Örnsköldsvik, Västernorrland, Sweden: Printed by Universitetstryckeriet.
- Zakrisson, B. et al. (2012). Modelling and simulation of explosions in soil interacting with deformable structure. *Central European Journal of Engineering*, 532-550. doi:10.2478/s13531-012-0021-5

## ANEXOS

<b>Código</b>	<b>Representación</b>	<b>Fojas</b>
Anexo 1	Calificación de información reservada, según memorando ESPE-CICTE-2017-0058-M, de fecha 24 de febrero de 2017	02 A-4
Anexo 2	Plano de especificación técnica para probetas de hormigón armado (Piloto).	01 A-4
Anexo 3	Recolección de información en ensayos destructivos	34 A-4
Anexo 4	Memoria Técnica de cálculo y diseño para Columnas de Hormigón armado con anclajes de apoyo.	12 A-4
Anexo 5	Planos de especificación técnica para columnas de hormigón armado y placas de apoyo.	03 A-3
Anexo 6	Memoria Técnica de cálculo y diseño para elementos de la máquina de ensayo.	18 A-4
Anexo 7	Memoria Técnica de cálculo y diseño para conexiones de la máquina de ensayo.	17 A-4
Anexo 8	Planos de especificación técnica para máquina de ensayo, elementos y conexiones.	01 A-0
Anexo 9	Memoria Técnica de cálculo y diseño para cimentación de apoyo de la Máquina de Ensayo.	03 A-4
Anexo 10	Memoria Técnica de cálculo y diseño para anclajes de apoyo en la cimentación.	07 A-4
Anexo 11	Planos de especificación técnica para cimentación y anclaje de la máquina de ensayo.	01 A-3
Anexo 12	Reporte de verificación de la similitud de contenido mediante la herramienta Urkund.	01 A-4