



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

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

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

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

**TEMA: MODELACIÓN DE DAÑO EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO A  
ESCALA REAL POR EFECTO DE CARGAS EXPLOSIVAS, MEDIANTE  
SIMULACIÓN NUMÉRICA Y COMPUTACIONAL**

**AUTORES:**

**CAPT. DE E. TAPIA GONZEMBACH, RODRIGO JAVIER**

**CAPT. DE E. MADRID CORONEL, KLEVER SANTIAGO**

**DIRECTOR: ING. NÉSTOR DAVID MEJÍA ALMEIDA, Mgs.**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**MODELACIÓN DE DAÑO EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO A ESCALA REAL POR EFECTO DE CARGAS EXPLOSIVAS, MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA Y COMPUTACIONAL**" fue realizado por los señores **Capt. de E. Tapia Gonzembach, Rodrigo Javier** y **Capt. de E. Madrid Coronel, Klever Santiago**, ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 11 de julio de 2019

Firma:

Ing. Mejía Almeida, Néstor David M.Sc.

C.C 1714547898



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros *Capt. de E. Tapia Gonzembach, Rodrigo Javier y Capt. de E. Madrid Coronel, Klever Santiago*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“MODELACIÓN DE DAÑO EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO A ESCALA REAL POR EFECTO DE CARGAS EXPLOSIVAS, MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA Y COMPUTACIONAL”***, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando en las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 11 de julio de 2019

Firmas:

Madrid Coronel, Klever Santiago

C.C 171364923-2

Tapia Gonzembach, Rodrigo Javier

C.C 171369555-7



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

AUTORIZACIÓN

*Nosotros Capt. de E. Tapia Gonzembach, Rodrigo Javier y Capt. de E. Madrid Coronel, Klever Santiago autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación "MODELACIÓN DE DAÑO EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO A ESCALA REAL POR EFECTO DE CARGAS EXPLOSIVAS, MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA Y COMPUTACIONAL" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Sangolquí, 11 de julio de 2019

Firmas:

.....  
**Madrid Coronel, Klever Santiago**  
C.C 171364923-2

.....  
**Tapia Gonzembach, Rodrigo Javier**  
C.C 171369555-7

## **DEDICATORIA**

A mi hija Sara Elizabeth, fuente de inspiración y fuerza.

A mi esposa Irene, mi amiga, mi amor y soporte incondicional.

A mis padres Rodrigo y Libertad, mi gran ejemplo a seguir.

**Rodrigo J. Tapia Gonzembach**

**Capt. de E**

## **DEDICATORIA**

A mis amados padres Luis y Susana, por su ejemplo de constancia y dedicación.

A mi amada esposa Diana Sánchez, por su amor, apoyo y comprensión.

A mi amado hijo Klever Alessandro, mi razón de vida y lucha constante.

**Klever Santiago Madrid Coronel**

**Capt. de E**

## AGRADECIMIENTOS

Indudablemente el primer agradecimiento al fin de esta etapa de la vida es a Dios, quien me ha permitido vivir, tener los padres y hermano que tengo, disfrutar de la familia que he formado, aprender de los amigos que he conocido y poner todos los actores y situaciones en mi camino para la consecución de este logro.

Es prudente ahora agradecer a mis padres por sus incesantes consejos y preocupación en cada uno de mis objetivos emprendidos, este es uno más que hemos alcanzado juntos.

Gracias infinitas a mi esposa Irene y a mi hija Sara, por haber comprendido mi tiempo de ausencia, por ayudarme en todo momento y finalmente por regalarme su alegría y amor sin medida; esta titulación también es suya.

La formación integral del ser humano comienza en el hogar y se complementa en las aulas, es por eso que quiero hacer un justo reconocimiento a todos mis maestros quienes no solo se preocuparon de impartir los conocimientos inherentes a la profesión, sino que fueron más allá inculcando valores básicos para convivencia. Quiero agradecer de manera especial al Sr. Ing. David Mejía Almeida M.Sc tutor de este proyecto de titulación, el trabajo realizado bajo su supervisión ha sido un intercambio próspero de información para la generación de conocimiento.

La amistad de todos aquellos quienes de alguna u otra manera colaboraron en el transcurso de la carrera universitaria merece un sincero agradecimiento, las vivencias de momentos difíciles y alegría forjaron nuestra amistad. En este punto mis sinceros

agradecimientos a Klever Madrid, viejo y gran amigo, con quien he tenido el gusto de acabar este camino y desarrollar este trabajo.

Finalmente, expreso mi agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” y al Ejército Ecuatoriano por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios en Ingeniería Civil, los conocimientos adquiridos serán aplicados para engrandecer el nombre de la institución y del arma de Ingeniería.

**Rodrigo Tapia Gonzembach**

**Capt. de E.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi Dios todo poderoso que me ha brindado la dicha de tener unos maravillosos padres, hermanos, esposa y mi hijo que son la fuente de inspiración para cada día seguir luchando.

A mis padres por darme la oportunidad y el apoyo de poder superarme en cada etapa de mi vida, confiando en mis capacidades, pero no podría haberlo realizado sin su ejemplo de perseverancia, constancia y paciencia para conseguir los objetivos que uno se plantea en la vida.

Agradezco al amor de mi vida mi esposa amada, por su cariño, comprensión y apoyo incondicional en cada paso dado en este trayecto, y además por darme el mayor regalo del mundo nuestro hijo amado Alessandro, este título es suyo porque el sacrificio y paciencia fue de los tres, dejando muchas cosas pendientes por apoyarme a conseguir este sueño.

A mis hermanos por ser mi fortaleza y mi guía durante todo el tiempo de nuestras vidas, y por darme mis maravillosos sobrinos en quienes queremos inculcar lo mejor que nuestros padres nos enseñaron.

A todos mis familiares que fueron papel fundamental dentro de mi formación ética y moral con su apoyo de aliento y buenos consejos.

Agradezco a los docentes, compañeros y amigos que fueron parte de mi formación profesional y coadyuvan al fortalecimiento y engrandecimiento de la noble institución como es la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE".

Finalmente agradezco al Ing Mejía David mi tutor de tesis y a mi amigo Rodrigo Tapia, ya que ellos fueron la parte más esencial en el trabajo de titulación dedicando horas en investigar problemas que se fueron presentando en el desarrollo de este estudio.

**Klever Santiago Madrid Coronel**

**Capt. de E**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xix</b>
 <b>CAPÍTULO I</b>	
<b>ASPECTOS GENERALES</b>	
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Justificación e importancia.....	3
1.4 Objetivos .....	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos .....	4
1.5 Resumen .....	4
 <b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Introducción.....	6
2.2 Antecedentes investigativos .....	7
2.3 Fundamentación teórica .....	15

2.3.1	Métodos de Elementos Finitos (FEM).....	15
2.3.2	LS-DYNA.....	17
2.3.3	Diseño basado en simulación LS-DYNA .....	18
2.3.4	Tipos de Modelización LS-DYNA .....	19
2.3.5	Métodos de Integración Temporal .....	26
2.3.6	Método Explícito e Implícito.....	27
2.3.7	Elementos con Integración Reducida y con Integración Completa.....	28
2.3.8	Elementos solidos 3D .....	29
2.3.9	Elementos tipo viga .....	31
2.3.10	Materiales.....	32
2.3.11	Hormigón.....	32
2.3.11.2	Velocidad de Deformación.....	35
2.3.11.3	Modelo de Hormigón RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma Model) .....	36
2.3.11.4	Modelo de erosión .....	41
2.3.11.5	Efecto Brisance .....	44
2.3.11.6	Spalling.....	45
2.3.12	Acero .....	46
2.3.12.1	Material elastoplástico (MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY) .....	47
2.3.12.2	Ecuación de estado. Parámetro de Grüneisen (Y).....	48
2.3.13	Explosivos.....	50
2.3.13.1	Física de la Detonación .....	51
2.3.13.2	Velocidad de la Detonación .....	52
2.3.13.3	Perfil de onda de detonación y el Estado de Chapman-Jouget (C-J) .....	53

2.3.13.4 Ecuaciones de Estado para Explosivos (EOS).....	54
2.3.13.5 Ecuación de Estado JWL.....	54
2.3.13.6 Material. Combustión de alto explosivo .....	56
2.4 Resumen .....	59

### **CAPÍTULO III**

#### **MODELAMIENTO, SIMULACIÓN Y ESCANEEO**

3.1 Introducción.....	61
3.2 Metodología de la investigación .....	61
3.3 Modelo matemático del fenómeno físico .....	64
3.3.1 Descripción geométrica del modelo.....	64
3.3.2 Modelos constitutivos y ecuaciones de estado.....	67
3.3.3 Carga axial.....	69
3.3.4 Condiciones de borde.....	70
3.4 Solución mediante elementos finitos .....	71
3.4.1 Mallado.....	71
3.4.2 Método para incluir las varillas de acero en el hormigón armado.....	74
3.4.3 Contactos entre partículas SPH y solidos.....	74
3.4.4 Algoritmo de solución. Problema con elementos finitos.....	75
3.5 Escaneo en tres dimensiones.....	77
3.6 Resumen .....	81

### **CAPÍTULO IV**

#### **POST – PROCESAMIENTO DE MODELOS**

4.1 Introducción.....	83
4.2 Procesamiento de archivos escaneados .....	84
4.2.1 Volumen de fragmentación.....	84

4.2.2 Deformaciones .....	85
4.3 Validación de simulaciones computacionales.....	87
4.4 Comportamiento de materiales.....	91
4.4.1 Hormigón bajo cargas dinámicas .....	92
4.4.2 Acero bajo cargas dinámicas.....	97
4.4.3 Explosivo y presión de incidencia.....	99
4.5 Efecto de la onda de choque .....	100
4.6 Resumen .....	107

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 Conclusiones	108
5.2 Recomendaciones.....	113
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>115</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Límites de erosión para explosivos en contacto con estructuras</i> .....	42
<b>Tabla 2</b>	<i>Detalle de armado de columnas</i> .....	65
<b>Tabla 3</b>	<i>Detalle de medidas de conos explosivos</i> .....	66
<b>Tabla 4</b>	<i>Resistencia a la compresión del hormigón <math>f_c</math></i> .....	67
<b>Tabla 5</b>	<i>Datos de entrada para tarjeta RHT</i> .....	68
<b>Tabla 6</b>	<i>Datos de entrada para caracterización del acero de refuerzo</i> .....	68
<b>Tabla 7</b>	<i>Caracterización de la Pentolita 50/50</i> .....	69
<b>Tabla 8</b>	<i>Carga axial para sección de columna</i> .....	70
<b>Tabla 9</b>	<i>Grados de libertad de la cabeza y pie de columna</i> .....	71
<b>Tabla 10</b>	<i>Número de elementos de columnas de hormigón armado</i> .....	72
<b>Tabla 11</b>	<i>Número de nodos por tipo de cono</i> .....	74
<b>Tabla 12</b>	<i>Especificaciones técnicas de Escáner Go!Scan 3D G1</i> .....	78
<b>Tabla 13</b>	<i>Volumen y relación de fragmentación</i> .....	85
<b>Tabla 14</b>	<i>Desplazamientos de varilla central del refuerzo longitudinal</i> .....	86
<b>Tabla 15</b>	<i>Simulaciones computacionales (desplazamientos y tiempos)</i> .....	87
<b>Tabla 16</b>	<i>Porcentaje de error en medidas de volumen de fragmentación</i> .....	89
<b>Tabla 17</b>	<i>Porcentaje de error en medidas de deformación</i> .....	90
<b>Tabla 18</b>	<i>Porcentaje de daño de columnas de hormigón</i> .....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Imágenes de ensayo en la losa con explosivo. ....	9
<b>Figura 2.</b> Secuencia de la cámara de alta velocidad .....	10
<b>Figura 3.</b> Comparación del modelo numérico y experimental .....	11
<b>Figura 4.</b> Comparación con el daño real .....	12
<b>Figura 5.</b> Configuración de prueba y modelo numérico de una columna.....	14
<b>Figura 6.</b> Simulación del atentado del edificio de la AMIA-Argentina .....	15
<b>Figura 7.</b> Deformación de la rejilla en un análisis Lagrangiano .....	20
<b>Figura 8.</b> Flujo de material a través de una malla estacionaria. ....	21
<b>Figura 9.</b> Restitución óptima de la malla mediante la formulación de ALE .....	21
<b>Figura 10.</b> Problema de impacto de alta velocidad.....	22
<b>Figura 11.</b> Interpolación de la función .....	24
<b>Figura 12.</b> Integración reducida sin tensión. ....	29
<b>Figura 13.</b> Elemento sólido 3D hexaedro con 8 nodos. ....	30
<b>Figura 14.</b> Orientación de los ejes .....	31
<b>Figura 15.</b> Solicitaciones del hormigón .....	33
<b>Figura 16.</b> Comparación de las curvas de dos elementos.....	34
<b>Figura 17.</b> Variación de deformación. ....	35
<b>Figura 18.</b> Superficies de límite de tensión y carga en el modelo de resistencia .....	38
<b>Figura 19.</b> Simulación con malla de 2 mm. ....	44
<b>Figura 20.</b> Falla instantánea del material “desintegración” .....	45
<b>Figura 21.</b> Fractura dinámica del hormigón.....	46

<b>Figura 22.</b> Tensión efectiva vs curva de deformación plástica efectiva .....	48
<b>Figura 23.</b> Modelo físico de una onda de detonación.....	52
<b>Figura 24.</b> Curva presión-distancia del perfil de una onda de detonación .....	54
<b>Figura 25.</b> Procedimiento para análisis con elementos finito .....	63
<b>Figura 26.</b> Geometría de columnas de hormigón armado .....	65
<b>Figura 27.</b> Geometría descriptiva de conos de explosivo.....	66
<b>Figura 28.</b> Distribución de carga axial en los nodos .....	69
<b>Figura 29.</b> Orientación del sistema de coordenadas para columnas.....	70
<b>Figura 30.</b> Mallado de 12 mm para elementos sólidos y tipo viga.....	72
<b>Figura 31.</b> Cono formado con partícula SPH .....	73
<b>Figura 32.</b> Flujograma del algoritmo de solución del problema .....	76
<b>Figura 33.</b> Condiciones de borde en la máquina.....	77
<b>Figura 34.</b> Empotramiento de placa en columnas de hormigón .....	78
<b>Figura 35.</b> Escáner Go!Scan 3D G1 .....	79
<b>Figura 36.</b> Placa de modelo escáner Go!Scan 3D G1 .....	79
<b>Figura 37.</b> Puntos de control para escaneo. ....	80
<b>Figura 38.</b> Proceso de escaneo en 3D.....	80
<b>Figura 39.</b> Imágenes de escaneo digital en 3D .....	81
<b>Figura 40.</b> Sólido en 3D de columna escaneada .....	84
<b>Figura 41.</b> Desplazamiento de varilla longitudinal central. ....	86
<b>Figura 42.</b> Volumen de fragmentación $f'c=28.7$ MPa .....	88
<b>Figura 43.</b> Volumen de fragmentación $f'c=43.7$ MPa .....	88
<b>Figura 44.</b> Escaneo – Simulación Col 0.3x0.3 (m), $f'c=28.7$ MPa .....	90

<b>Figura 45.</b> Escaneo – Simulación Col 0.3x0.3 (m), $f'c=43.7$ MPa .....	91
<b>Figura 46.</b> Efecto del explosivo en el hormigón en la cara de contacto .....	92
<b>Figura 47.</b> Daño en el hormigón en zona más alejada a la detonación. ....	93
<b>Figura 48.</b> Desarrollo del daño de la columna, $f'c=28.7$ MPa .....	94
<b>Figura 49.</b> Desarrollo del daño de la columna, $f'c=43.7$ MPa.....	95
<b>Figura 50.</b> Deformación frontal, Col 0.3x0.3 (m), $f'c=43.7$ MPa.....	96
<b>Figura 51.</b> Acortamiento axial de las columnas, Col 0.3 x 0.3 .....	98
<b>Figura 52.</b> Curva Desplazamiento vs Tiempo del acero, Col 0.3 x 0.3.....	99
<b>Figura 53.</b> Curva Presión vs Tiempo del explosivo.....	100
<b>Figura 54.</b> Expansión de la onda de presión de la carga cónica .....	101
<b>Figura 55.</b> Cámara Phantom $T=4.21e-4$ (seg).....	102
<b>Figura 56.</b> LS-DYNA $T=4.14e-4$ (seg).....	102
<b>Figura 57.</b> Contornos de presión, $T= 0.00$ seg .....	103
<b>Figura 58.</b> Contornos de presión, $T= 1.997 E-05$ seg.....	104
<b>Figura 59.</b> Contornos de presión, $T= 2.9955 E-05$ seg .....	104
<b>Figura 60.</b> Contornos de presión, $T= 4.997E-05$ seg.....	105
<b>Figura 61.</b> Contornos de presión, $T= 9.9993 E-05$ seg .....	105
<b>Figura 62.</b> Contornos de presión, $T= 8.9963 E-05$ seg .....	106
<b>Figura 63.</b> Contornos de presión, $T= 2.7997 E-04$ seg .....	106
<b>Figura 64.</b> Contornos de presión, $T= 8.6997 E-04$ seg .....	107

## RESUMEN

El uso de elementos finitos para el análisis de fenómenos físicos de altas energías, permite recrear el comportamiento de los componentes que participan en estos eventos, evitando de esta manera tener que ejecutarlos en ensayos experimentales. En el trabajo de investigación, modelamiento, simulación computacional y numérica, e interpretación de los resultados generados por el hidrocódigo de elementos finitos LS-DYNA. El modelo constitutivo de daño Riedel-Hiermaier-Thoma Model (RHT), permite la simulación de la falla y fragmentación del hormigón, considerando un correcto valor de la erosión por deformación plástica del cual se realiza un estudio comparativo entre, el volumen de erosión de la simulación y el volumen de fragmentación obtenido del procesamiento de imágenes digitales del escaneo en tres dimensiones. Este estudio comparativo, abarca también las mediciones de deformación de los refuerzos longitudinales de la columna, permitiendo validar el modelo computacional desarrollado. Esta validación alcanza un 96.73% de confiabilidad, permitiendo así ensayar en nuevos estudios, simulaciones computacionales de este fenómeno en estructuras completas de hormigón armado, a fin de estudiar la caída controlada de una edificación como trabajo futuro.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **LS-DYNA**
- **MODELO DE DAÑO RHT**
- **EROSIÓN**
- **EXPLOSIVO EN CONTACTO**
- **ESCANEEO EN 3D**

## **ABSTRACT**

The use of finite elements for the analysis of physical phenomena of high energies, allows to recreate the behavior of the components that participate in these events, thus avoiding having to execute them in experimental trials. In the research, modeling, computational and numerical simulation, and interpretation of the results generated by the finite element hydrocode LS-DYNA. The Riedel-Hiermaier-Thoma Model (RHT) damage constitutive model, allows the simulation of the failure and fragmentation of concrete, considering a correct value of erosion by plastic deformation of which a comparative study is carried out between, the erosion volume of the simulation and fragmentation volume obtained from the digital image processing of the three-dimensional scan. This comparative study also covers the deformation measurements of the longitudinal reinforcements of the spine, allowing the computational model developed to be validated. This validation reaches a 96.73% reliability, thus allowing to test in new studies computational simulations of this phenomenon in complete reinforced concrete structures, in order to study the controlled fall of a building as future work.

### **KEYWORDS:**

- **LS-DYNA**
- **RHT DAMAGE MODEL**
- **EROSION**
- **EXPLOSIVE CONTACT**
- **3D SCANNING**

## NOMENCLATURA

### **Smooth Particle Hydrodynamics**

$P$	Conjunto de partículas
$X_j(t)$	ubicación de la partícula $j$
$W_j(t)$	Peso de la partícula $j$
$\delta$	$W(x_i - x_j, h)$ cuando $h=0$
$\tau_{ij=xi-xj}, \mu$	Coefficiente de viscosidad de fluidos
$p_i$	Presión
$k$	Rigidez del fluido
$\rho_0$	Densidad inicial
$F_i^{external}$	Fuerzas externas

### **Métodos de integración temporal**

$M$	Matriz de masa
$\ddot{x}$	Vector de Aceleración
$F_i(\dot{x}, x, t)$	Fuerzas internas desarrolladas durante la deformación
$F_e(\dot{x}, x, t)$	Fuerzas externas aplicadas y fuerzas de volumen

**Funcionamiento Hormigón**

$\sigma$	Esfuerzo (Tensión total)
$\sigma^T$	Tensión elástica
$\varepsilon$	Deformación
$E$	Módulo de elasticidad (MOE)
$f'_c$	Resistencia a la compresión del hormigón
$f'_t$	Resistencia a la tracción del hormigón
$S$	Desviador de tensión
$p$	Presión hidrostática uniforme (tensión media)
$I_1$	Invariante 1 del esfuerzo de tensión
$J_2$	Invariante 2 de la tensión de esfuerzo desviador
$J_3$	Invariante 3 de la tensión de esfuerzo desviador
$\Gamma(\theta)$	Función angular
$\Psi$	Relación del radio
$\lambda$	Deformación plástica efectiva
$\eta(\lambda)$	Función del parámetro interno de daño

**Modelo de hormigón RHT**

$\rho - \alpha$	Relación de compactación
$\alpha_0$	Porosidad inicial
$\alpha(t)$	Presión en el tiempo t.
$P_{el}$	Aplastamiento inicial de poros
$P_{comp}$	Presión de compactación
N	Exponente de porosidad
$p(\rho, e)$	Presión en términos de densidad y especificidad de energía interna
$p^*$	Resistencia al corte
Q	Máxima reducción de la resistencia
$\varepsilon_p^f$	Deformación plástica en el fallo
D	Parámetro de daño se acumula con la deformación plástica
$\sigma_d(p^*, s, \dot{\varepsilon}_p)$	Superficie de daño resultante
$\dot{\varepsilon}_p$	Flujo plástico

**Ecuación de estado Grüneisen**

Y	Parámetro Grüneisen
P	Presión

$K_T^1$	Primera derivada del módulo de volumen con respecto a la presión
H	Estado de referencia
E	Sistema con energía interna
v	Volumen específico
$\alpha$	Coefficiente de expansión térmica
cv	Calor específico constante
K	Módulo de volumen
$\rho_0$	Densidad sólida
$C_0$	Velocidad del sonido elástica

### **Ecuación de estado JWL**

p	Presión
V	Volumen relativo
E	Energía interna específica
A	Constante de calibración de datos de prueba
B	Constante de calibración de datos de prueba
R1	Constante de calibración de datos de prueba
R2	Constante de calibración de datos de prueba

$\omega$  Constante de calibración de datos de prueba

**Combustión de alto explosivo**

$p_{eos}$  Presión de la ecuación de estado

V Volumen relativo

E Energía interna

D Velocidad de detonación

tl Tiempo de iluminación

F Fracción de quemadura

$V_{CJ}$  Volumen relativo de Chapman-Jouget (C-J)

## **CAPÍTULO I**

### **ASPECTOS GENERALES**

#### **1.1 Introducción**

El presente capítulo trata de explicar el beneficio al usar programas que puedan simular acciones que conlleven riesgos, como es la aplicación de explosivos a elementos estructurales, ya que pueden predecir anticipadamente un suceso.

Las demoliciones de infraestructuras por cargas explosivas interrelacionan propiedades físicas, químicas y mecánicas dentro del empleo de explosivos. Estas propiedades se pueden obtener por medio de la recreación experimental. Dicha experimentación conlleva un consumo excesivo de recursos y riesgos para su ejecución.

La simulación computacional constituye un medio versátil y de bajo costo en comparación con las prácticas reales, para verificar, validar y comprobar el principio físico de los elementos que se sometan a estudio. Esta simulación está basada en la utilización de elementos finitos, el cual es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de un gran número de fenómenos, este es el caso de los eventos producidos por la interacción entre el hormigón armado y la carga explosiva en un periodo extremadamente pequeño de tiempo.

En el presente estudio se utilizará el programa LS-DYNA elaborado por Livermore Software Technology Corporation (LSTC), el mismo que es utilizado a nivel mundial en varios campos de la industria como son la construcción, militar, aeroespacial, automotriz y en ingeniería biológica. Este software nos brindará un soporte completo para el

desarrollo de modelos computacionales de columnas de hormigón armado sometidas a cargas explosivas los cuales serán validados con un alto grado de confiabilidad respecto a los ensayos realizados en campo.

En consecuencia, se describe el grado de confiabilidad al usar el software LS-DYNA y descripción de los resultados a obtener.

## **1.2 Antecedentes**

El realizar ensayos en campo para obtener datos experimentales de la respuesta física de un elemento estructural ante carga explosiva, conlleva a un gasto excesivo de recursos económicos y logísticos, a parte del riesgo físico al que se exponen las personas que manipulan los explosivos en las pruebas.

Para optimizar dichos recursos existe una variedad de softwares en el mercado que puede simular el hecho, siendo uno de los más eficientes para este tipo de trabajo el programa Ls Dyna, el cual utilizaremos en esta investigación partiendo de datos obtenidos en campo del Proyecto de Investigación Militar “*Desarrollo de curvas de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de Hormigón Armado a través de simulación computacional y ensayos experimentales*”, datos con los cuales se puede modelar el daño de las columnas de hormigón armado a escala real por efecto de cargas explosivas, mediante simulación numérica y computacional.

El realizar la simulación numérica y computacional tiene beneficios en reducción de costos en prototipo, mejora e innovación, menores costos de desarrollo, confianza en resultados y replanteamiento de problema en desarrollo (López, 2018).

Actualmente el realizar una simulación computacional aporta a varias investigaciones dentro del ámbito de ingeniería estructural, ya que es una técnica que permite visualizar el comportamiento físico de elementos estructurales sometidos a diferentes condiciones, dependiendo el tipo de explosivo y la carga axial que intervenga.

### **1.3 Justificación e importancia**

La simulación computacional en elementos estructurales ante cargas explosivas busca desarrollar modelos constitutivos, modelos que representan una definición matemática del comportamiento de un material basado en ensayos de laboratorio o de campo, el cual incluye componentes que afectan el comportamiento de los materiales.

Es importante esta investigación porque constituye un valioso aporte al ámbito militar y constructivo, ya que busca en el tiempo aprovechar las bondades del programa en la simulación de una demolición controlada aplicada a edificaciones en estado de riesgo de colisión y puedan realizarlo directamente los especialistas-técnicos del Cuerpo de Ingenieros del Ejército.

Dentro del ámbito de la seguridad y la defensa se cuenta con personal preparado en el uso de demoliciones controladas netamente militares, y dentro del Cuerpo de Ingenieros del Ejército personal capacitado en forma general en conocimiento estructural básico y el uso de la tecnología, punto de partida para proporcionar información sobre el funcionamiento de una simulación y el uso de la misma para operaciones y objetivos tanto militares como civiles.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Modelar el daño en columnas de hormigón armado a escala real por efecto de cargas explosivas, mediante el análisis de cantidad explosivo, variación de carga axial y discretización de los elementos estructurales tipo columna para realizar su simulación computacional.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Definir teóricamente el comportamiento físico del hormigón, acero y hormigón armado, además de los esfuerzos dinámicos producidos por la carga explosiva (PENTOLITA) en un elemento estructural tipo columna.
- Establecer un modelo computacional que refleje el estado final de probetas de hormigón armado a escala real luego de haber sido sometidas a la detonación de cargas explosivas, considerando todas las variables directas e indirectas que intervienen en el fenómeno en estudio.
- Validar y verificar el modelo computacional respecto a la información obtenida en los ensayos experimentales, alcanzando un alto nivel de confiabilidad.

## **1.5 Resumen**

La utilización de un software que genere resultados validados a nivel mundial, brinda la capacidad de realizar simulaciones computacionales a mayor grado como la ejecución de una demolición controlada a escala real, evitando riesgos innecesarios, pre

visualizando el comportamiento de la estructura y generando un ahorro significativo en el uso de recursos.

En el siguiente capítulo se desarrollará toda la base teórica para describir el comportamiento mecánico de los distintos materiales y el modelamiento de las columnas de hormigón armado sometidas a cargas explosivas en el software LS-DYNA.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Introducción

El presente capítulo exteriorizará definiciones básicas de las principales teorías que constituyen el software LS-DYNA, para explicar de forma numérica el procedimiento que realiza el programa para llegar a una correcta simulación, basadas en los datos que se ingresen según el objetivo que se quiere alcanzar.

La simulación pretende obtener la fractura de un elemento estructural sometido a cargas explosivas de forma aproximada a la derivada en el campo.

El uso de explosivos en edificaciones ha resultado ser un método efectivo para trabajos de demolición en zonas residenciales, ya que los métodos convencionales implican un riesgo cuando el trabajo se realiza en lugares donde existan muchos peatones y vías de tráfico.

La primera vez que se utilizó una demolición de edificios en zonas habitadas o edificadas fue realizada en Gothenburg-Suecia, con la voladura de un edificio situado sobre un estrato deslizante de arcilla, el mismo había comenzado a inclinarse de modo que se consideró arriesgado utilizar un método convencional para derribarlo. Para el trabajo se midieron las vibraciones en los edificios circundantes en el radio de la voladura, después de la demolición con un resultado efectivo no se observaron valores nocivos, ni siquiera en edificios situados a pocos metros de distancia. (Gustafsson, 1977).

En la demolición de edificios hay varios principios básicos fundamentales que deben considerarse; como la destrucción de los elementos vitales de sustentación de la estructura de modo que el propio peso del edificio haga por si solo el trabajo, también las cargas han de subdividirse para que proporcionen una fractura completa y otro principio fundamental es la correcta colocación de iniciadores con desfases de tiempo e intervalos que dispongan de forma adecuada la dirección de rotura deseada. (Luccioni, Ambrosini, & Danesi, 2004).

En este capítulo, se explicará inicialmente el estado actual de las investigaciones sobre el tema, para luego realizar una revisión sobre elementos finitos, tipos de modelamiento y los métodos de integración para dar solución a problemas no lineales.

Se revisará también los tipos de elementos finitos, modelos constitutivos de materiales y ecuaciones de estado que se interrelacionan para caracterizar a cada uno de los elementos de una columna de hormigón armado sometida a una carga explosiva.

## **2.2 Antecedentes investigativos**

Las investigaciones previas de aplicaciones del software LS-DYNA permiten resolver análisis dinámicos CAE (Directorios de software para análisis y simulación en ingeniería) de modelos 3D por el método de elementos finitos, el cual puede resolver problemas reales, modelos complejos no lineales, cuerpos rígidos, análisis térmico, análisis de fluidos, de multi física, además puede explotar multi procesamiento para un mejor desempeño de cálculo.

A continuación se plantean algunos estudios realizados, referentes al comportamiento de elementos estructurales ante cargas explosivas y su simulación computacional con el programa LS-DYNA.

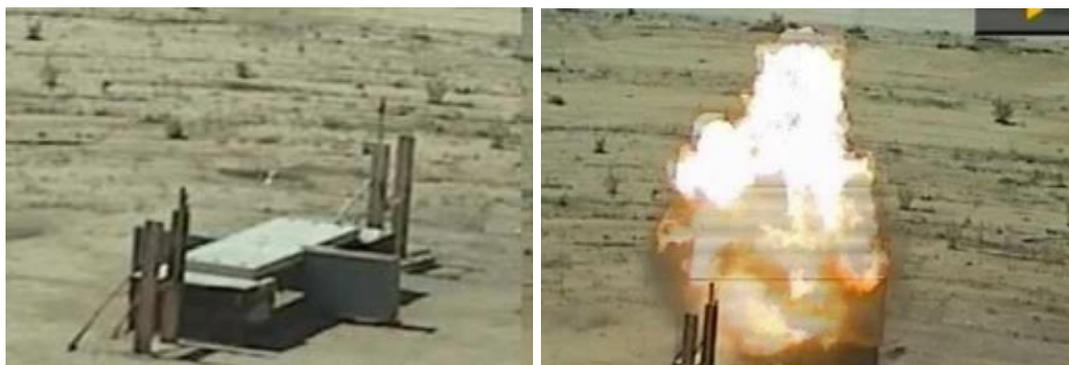
Wu, Li, & Su (2018) basó su estudio en el efecto de losas de hormigón armado ante cargas explosivas, con pruebas experimentales realizadas en campo y simulación computacional con el programa LS-DYNA. Cabe mencionar que en los ensayos experimentales se colocó las cargas explosivas directamente sobre la superficie de las losas para el análisis de la degradación de los materiales.

La simulación fue desarrollada bajo diferentes condiciones de cargas explosivas para reproducir el comportamiento estructural de las losas de hormigón armado. El análisis comparativo de los resultados en campo con la simulación llegó a determinar el desempeño óptimo de la losa ante la carga explosiva se da cuando se utiliza hormigón de alto rendimiento es decir con un  $f'c > 250 \text{ kg/cm}^2$ . Wu et al. (2018).

Castanera (2015), en su evaluación del tamaño óptimo de mallado en losas de hormigón frente a cargas explosivas como muestra la Figura 1, aplica en su investigación de campo modelos de hormigón tomando en cuenta la superficie de resistencia, efectos de velocidad de deformación y escala, y la acumulación de daños.

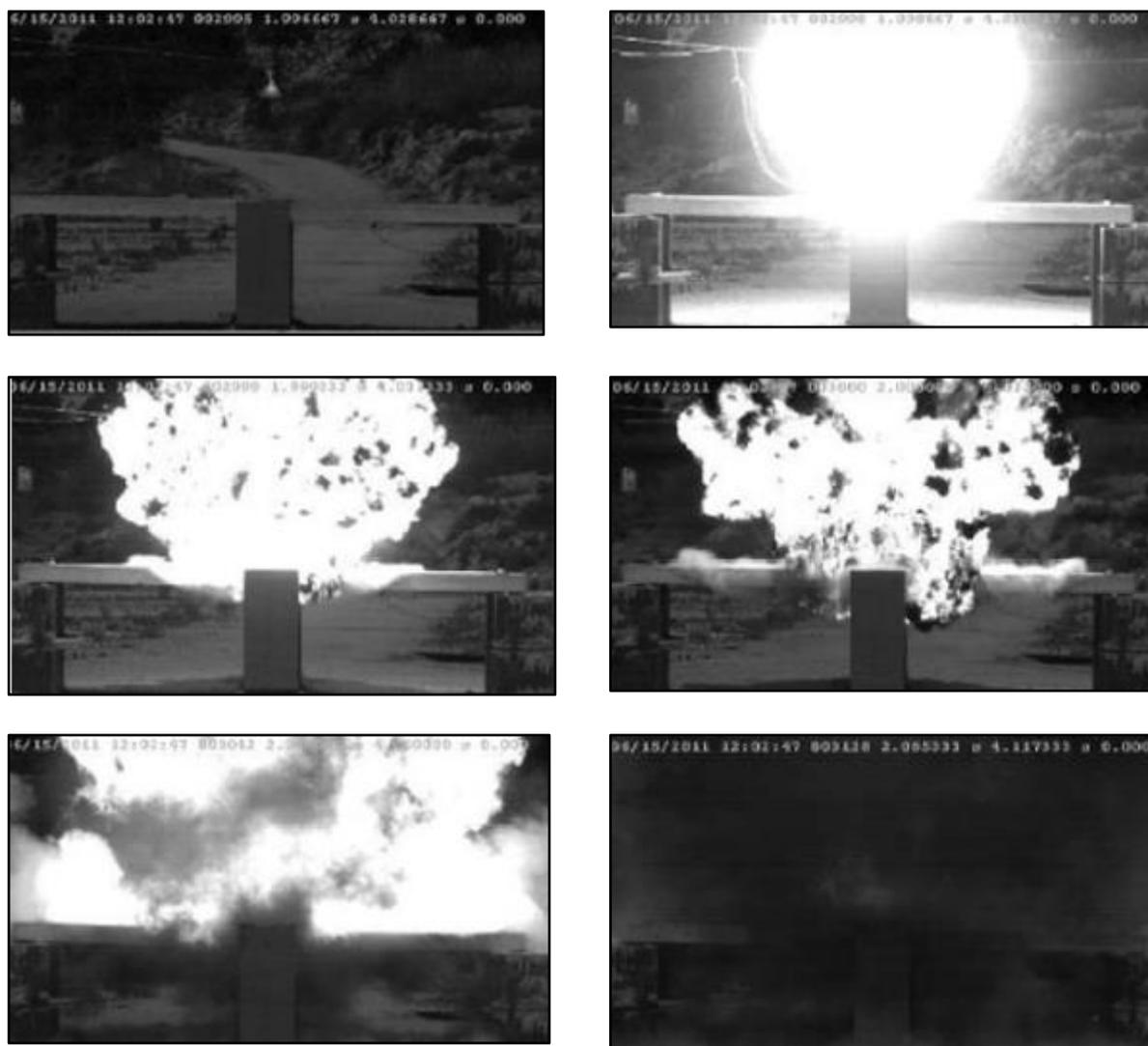
Para la toma de datos en campo usa diferentes dispositivos para obtener parámetros necesarios para su investigación como se muestra en la Figura 2, tales como captadores de presión, acelerómetros, sistema de adquisición de datos, cámara de alta velocidad, detector de metales, martillo Schmidt.

El explosivo que utiliza es el PG2 de uso militar, de fácil adherencia y moldeo a cualquier geometría, su evaluación experimental en base a impulso que obtuvo es 860 g de PG2 equivalen a 1000 g de TNT. Su estudio llega a determinar que el modelo de material de hormigón más óptimo es el K&C (Karagozian and Case Model) y tamaño de mallado de 12 mm es el más adecuado entre los analizados. (Castanera, 2015).



**Figura 1.** Imágenes de ensayo en la losa con explosivo.  
Fuente: (Castanera, 2015)

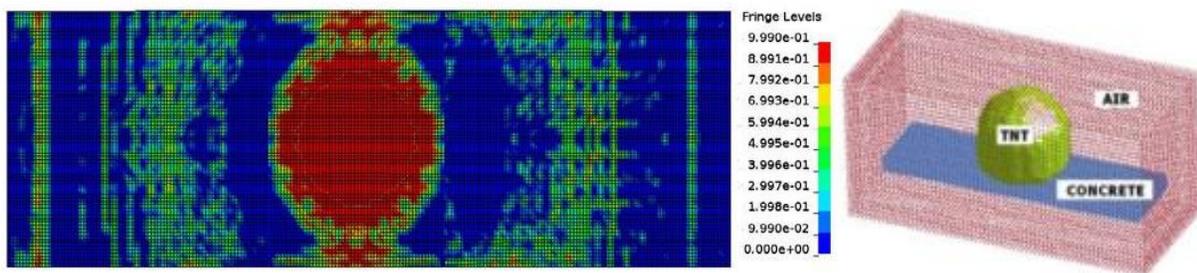
Según Astarlioglua (2013) el comportamiento dinámico de los elementos tipo columna de hormigón armado bajo efectos combinados de cargas transversales axiales inducidas durante una explosión, se la pueda analizar considerando un modelo de un grado de libertad, considerando variables como la carga axial, la presión y la resistencia de los materiales estableciendo diagramas de respuesta en el tiempo de las variables determinadas para el análisis del fenómeno físico. La simulación numérica fue desarrollada con el software ABAQUS.



**Figura 2.** Secuencia de la cámara de alta velocidad  
Fuente: (Castanera, 2015)

El análisis del estudio llega a determinar que la fuerza axial de compresión a la que se sometieron las columnas de hormigón armado durante las pruebas de campo, tiene una influencia significativa en su comportamiento cuando los elementos estructurales se someten a cargas inducidas por explosión transversal. (Astarlioglu, 2013).

Según Foglar, M. & Kovar, M. (2013) su estudio investigativo se basa en la comparación de un análisis experimental y simulación numérica como se detalla en la Figura 3, del comportamiento de los tableros de puentes ante cargas explosivas, la simulación numérica fue desarrollada en el software LS-DYNA, determinando un rendimiento eficiente de los tableros reforzados con fibra en relación con los construidos con hormigón armado convencional, lo cual se evidenció, en la resistencia residual a la compresión, menor fragmentación y proyección de escombros, menor deflexión, además el carácter de la falla cambió de frágil a dúctil.

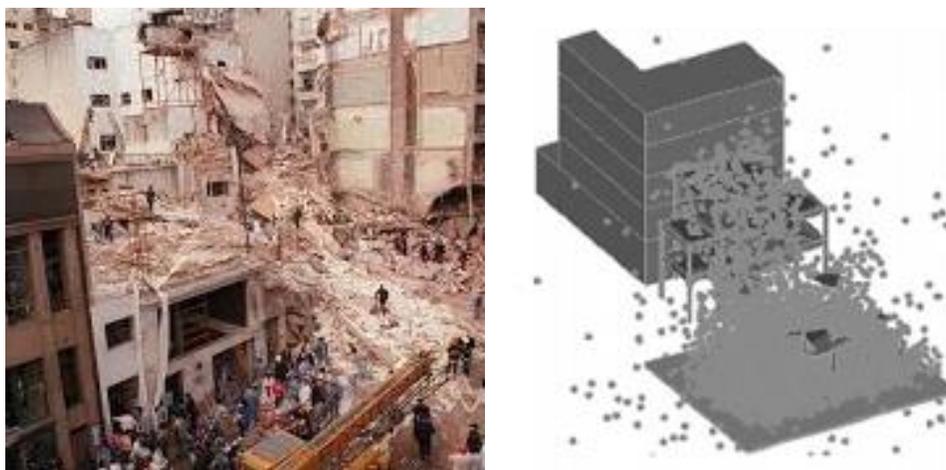


**Figura 3.** Comparación del modelo numérico y experimental  
Fuente: (Foglar, 2013)

El fin del estudio fue dar alternativas de protección ante acciones terroristas en infraestructura vial, junto a la colaboración del ejército y la policía de la República Checa. (Foglar, 2013).

Luccioni et al. (2004), realiza el análisis de la falla estructural de un edificio de concreto reforzado causado por una carga explosiva, este estudio lo efectuaron con la ayuda del software AUTODYN para simular lo sucedido con un edificio real que sufrió un ataque terrorista. Se puede observar en la Figura 4 la comparación del daño real producido por

la carga explosiva a la elaborada con el programa, el cual valida el procedimiento de simulación que utilizaron. La simulación numérica representada muestra la caída de las losas que resultaron colgando de la parte trasera del edificio, así como una vista de los marcos de hormigón armado que quedaron después de la explosión.



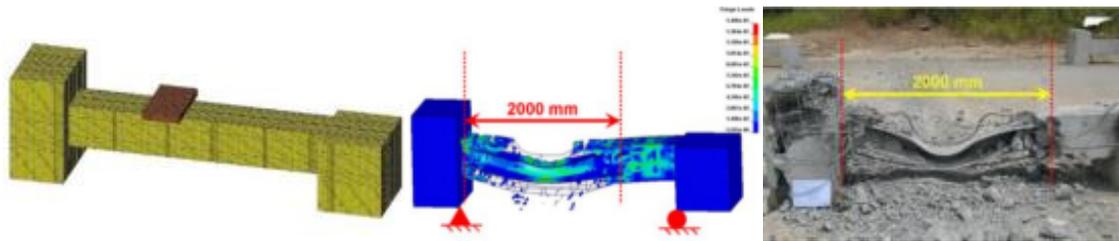
**Figura 4.** Comparación con el daño real  
Fuente: Luccioni et al. (2004)

Este tipo de análisis hoy en día representa la única forma de ejecutar con éxito un estudio completo de colapso de un edificio, el cual se debió a un mecanismo gravitacional, por lo que concluyen en su estudio que la destrucción se originó por la detonación de las columnas inferiores. Además, el tipo de análisis presentado se puede usar para la evaluación de la vulnerabilidad de una estructura con el fin de elegir configuraciones estructurales que eviten que el daño se extienda más allá del causado directamente por la explosión. Luccioni et al. (2004).

Según Alok (2016) las cargas explosivas se clasifican como cargas de campo lejano y de campo cercano en términos de la distancia escalada, asociadas a las explosiones que

ocurren a distancias de más de o menos de  $1.18 \text{ m/kg}^{1/3}$  respectivamente. Las ondas explosivas de una explosión de campo lejano llegan simultáneamente y se distribuye la presión de forma uniforme sobre un objetivo. Los cálculos de respuesta se pueden realizar utilizando las relaciones del software comercial basado en física de alta fidelidad como LS-DYNA, AUTODYN, y ABAQUS. Por otro lado, para explosiones de campo cercano, la interacción entre las ondas explosivas y las estructuras son más complejas ya que se caracterizan por una bola de fuego de temperatura extremadamente alta.

En el estudio realizado los datos experimentales disponibles se centran en la respuesta del concreto reforzado de losas, muros y diversos elementos de fachada. Las explosiones de contacto y de campo cercano generan altas sobrepresiones, por lo que se requiere un marco de reacción para proporcionar el soporte que son las condiciones para el elemento estructural de prueba y también para resistir las cargas dinámicas, para lo cual se realizaron pruebas en columnas colocadas horizontalmente en el suelo como muestra la Figura 5, asumiendo que el suelo proporcionó la reacción como una losa en la posición horizontal, la colocación de explosivos no es complicada y podría ser colocado para cualquier condición. Sin embargo, las condiciones de soporte no se replicaron precisamente en esta configuración y no se incluyó el efecto de refuerzo de unión viga-columna. (Alok, 2016).



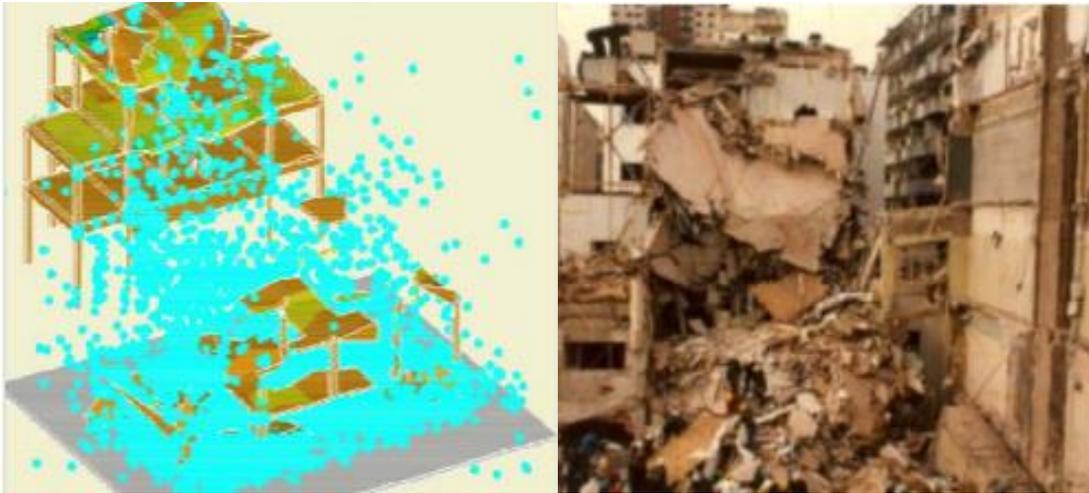
**Figura 5.** Configuración de prueba y modelo numérico de una columna  
Fuente: (Alok, 2016)

El estudio llegó a determinar que los algoritmos Lagrangian-Eulerian acoplados se han utilizado ampliamente para modelar la interacción fluido-estructura, donde la Ecuación de Estado JWL es ideal para un modelado del explosivo con resultados aceptables, comparando así los resultados experimentales de miembros estructurales sometidos a explosiones de campo cercano con modelos numéricos de la prueba. Estas comparaciones se limitan a losas, elementos de fachada, placas de acero y paredes. (Alok, 2016).

Bermejo (2015) explora distintas opciones prácticas para el modelado y cálculo numérico por ordenador de estructuras de hormigón armado sometidas a explosiones, empleando integración explícita en el tiempo para estructuras de dinámica rápida, pudiendo predecir daños por la propia explosión o el posible colapso progresivo de la estructura. El estudio fue realizado por el software LS-DYNA diseñando los diferentes modelos constitutivos en hormigón y acero.

Eventos como ataques terroristas fueron la motivación del estudio, ya que muchas edificaciones son susceptibles de sufrir agresiones, dependen en su mayoría de su situación geográfica, por lo que ha llevado a muchos autores a realizar análisis del

comportamiento del material y su respuesta estructural. Podemos observar en la Figura 6 la simulación computacional del colapso de una estructura por efecto de cargas explosivas. (Bermejo, 2015).



**Figura 6.** Simulación del atentado del edificio de la AMIA-Argentina  
Fuente: (Bermejo, 2015)

El estudio llegó a determinar que por medio de elementos finitos con el uso del programa LS-DYNA se puede estimar los efectos de colapso progresivo en edificios cuando alguno de sus elementos constructivos es dañado por el efecto de una explosión perdiendo su capacidad resistente. (Bermejo, 2015).

## **2.3 Fundamentación teórica**

### **2.3.1 Métodos de Elementos Finitos (FEM)**

El FEM analiza un problema físico mediante un procedimiento numérico donde los modelos son una aproximación de la realidad física, proceso el cual requiere pasos primordiales como la preparación de un modelo adecuado, resolución de ecuaciones

diferenciales, control de los datos matemáticos y la interpretación cualitativa de los resultados. (Morales, 2014).

Para esta formulación de FEM se requiere supuestos que reflejen las características principales de un problema físico para formular el modelo matemático que gobierne la estructura. (Zagal, 2012).

Un análisis completo de elementos finitos consta de tres etapas distintas: pre-procesamiento, simulación numérica, y post-procesamiento. En la primera etapa se describe la geometría de la estructura luego se ejecuta el resto del proceso de modelado donde se define condiciones de contorno, materiales, propiedades de sección, formulación de tipos de elementos, tipos de contacto, entre otras, la segunda etapa de este proceso es la simulación o análisis numérico y la tercera etapa comienza con la comprobación de los problemas durante la solución y proporciona resultados utilizando variables fundamentales. (Morales, 2014).

Para trabajar con este método, los sistemas se representan por una simplificación de la estructura real, que consta de múltiples regiones discretas simplificadas y conectadas, además de ecuaciones de equilibrio, junto con consideraciones físicas aplicables, así como relaciones constitutivas, se aplican a cada elemento, y se construye un sistema de varias ecuaciones (Zagal, 2012).

El sistema de ecuaciones se resuelve para los valores desconocidos usando técnicas de álgebra lineal o esquemas no lineales, dependiendo del problema. Siendo un método aproximado, la precisión de los métodos de análisis de elementos finitos puede ser

mejorada refinando la discretización en el modelo, usando más elementos y nodos. Además de la industria aeroespacial, otras de las áreas en las que comúnmente es usado el método de elementos finitos son en los problemas y modelos estructurales, transferencia de calor, dinámica de fluidos y electromagnetismo (Zagal, 2012).

Según López (2018), el método de elementos finitos es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas utilizado en los diversos problemas de ingeniería y física, y que el ingreso de datos para el uso del programa se tiene que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tipo de elemento finito.
- Mallado.
- Propiedades del material.
- Propiedades de elementos.
- Verificar calidad de malla (control que la malla sea óptima para el problema que se está modelando).
- Introducir cargas y condiciones de contorno.
- Señalar opciones de análisis (cuasi-estático o modal-dinámico).
- Determinar resultados para estudio posterior (gráficas).
- Interpretación de resultados.

### **2.3.2 LS-DYNA**

LS-DYNA es un hidrocódigo de elementos finitos de propósito general para el análisis de grandes deformaciones estáticas y de la respuesta dinámica de estructuras, que toma en cuenta el problema físico, el modelo matemático y el método numérico, además el

programa incluye una amplia variedad de modelos de material. El tamaño de los elementos finitos debe tender a cero manteniendo en equilibrio entre el tamaño del elemento finito y el tiempo de procesamiento del modelo (López, 2018).

Mediante el método explícito que usa LS-DYNA se obtienen soluciones rápidas para problemas de corta duración, grandes deformaciones dinámicas, problemas cuasi-estáticos con grandes deformaciones; junto con complejos problemas de impacto o contacto. LS-DYNA comenzó llamándose Dyna3D, como proyecto militar estadounidense desarrollado por John O. Hallquist en 1976. Tras años de desarrollo, el código se traslada a la compañía privada (Livermore Software Technology Corporation) pasando al actual nombre LS-DYNA, por lo que se permite la transferencia de resultados entre ambos, haciendo posible que se realicen análisis con gran utilidad combinando soluciones explícitas e implícitas. (Colorado, 2008).

Según Castanera (2015) para una determinada simulación en el LS-DYNA, se pueden combinar cualquiera de las múltiples características del programa para modelar una amplia variedad de situaciones, ya que es uno de los paquetes de software para análisis de elementos finitos más flexibles, una licencia de LS-DYNA automáticamente tiene acceso a todas las prestaciones del programa, desde un análisis mecánico estático lineal hasta métodos de resolución de flujo y térmicos avanzados.

### **2.3.3 Diseño basado en simulación LS-DYNA**

En lugar de crear un prototipo físico que es más costoso, se crea un modelo virtual cuyo propósito es simular el comportamiento real del objeto en estudio (López, 2018).

Según el mismo autor, los beneficios del uso del programa son:

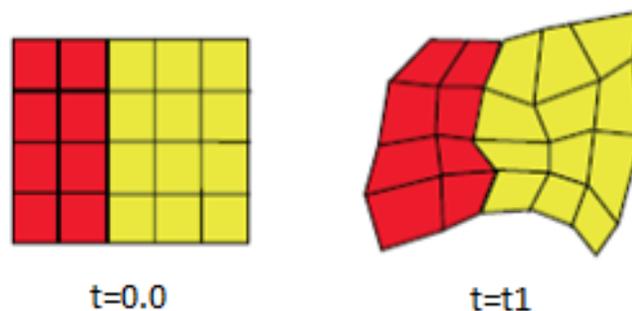
- Reducción de los tiempos de puesta en el mercado.
- Reducción del coste de los prototipos.
- Mejora de la innovación.
- Menores costes de desarrollo.
- Mejor calidad del producto.
- Replanteamiento del proceso del desarrollo.
- Confianza en los resultados.

#### **2.3.4 Tipos de Modelización LS-DYNA**

El modelado numérico en el LS-DYNA involucra la parte dinámica con la estructural, y uno de sus múltiples usos relaciona aquello con los efectos causados frente a una detonación, donde infiere la propagación de ondas de choque; por ello, se utiliza modelos de simulación que están relacionados desde el punto de vista del material y al volumen de control, éstos son el Lagrangiano que toma en cuenta el punto de vista material, donde los materiales y el mallado se mueven como uno solo, el euleriano basado en el punto de vista de espacio fijo o volumen de control; donde las magnitudes son funciones de su posición en el volumen de control y del tiempo, el ALE (Arbitrario Lagrangiano-Euleriano), son modelos no fijados a priori en el espacio (euleriano) o fijado a un material (lagrangiano), el SPH (Hidrodinámica de Partículas “Suaves”) son modelos lagrangianos sin malla, cada partícula está separada una distancia sobre el cual sus propiedades son “suavizadas” por una función tipo kernel que convierte lo que sería un problema de

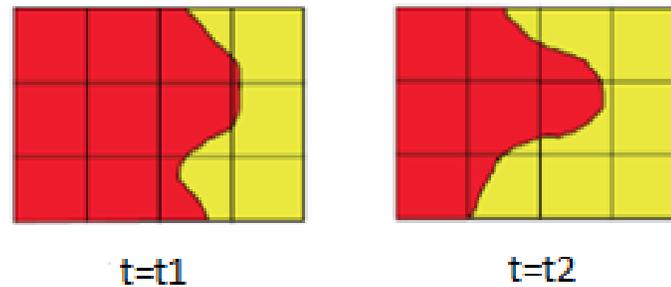
clasificación no lineal, a un sencillo problema de clasificación lineal en un espacio dimensional. (Castedo, 2018).

En la actualidad, gran parte de los códigos de dinámica estructural, utiliza el análisis lagrangiano para encontrar una solución, análisis en el cual el material que compone un elemento continúa en el elemento y no segrega partículas dentro o fuera de ese parámetro. La malla numérica mostrada en la Figura 7 se deforma de acuerdo con el flujo de materia, de modo que no tiene lugar el transporte de material entre dos elementos. (Pushkaraj, Whittaker, & Aref, 2010).



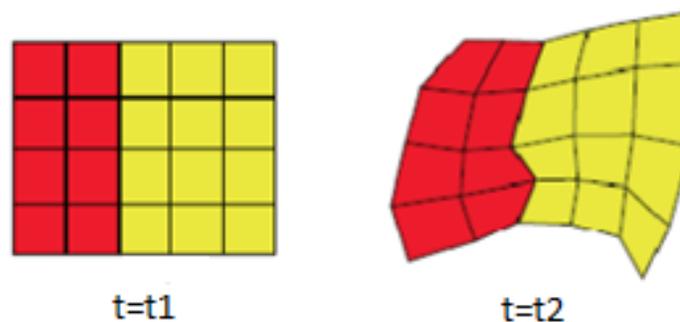
**Figura 7.** Deformación de la rejilla en un análisis Lagrangiano  
Fuente: Pushkaraj et al. (2010).

En cambio en un análisis Euleriano, el flujo de material, a medida que el material se mueve de uno elemento a otro a través de una malla estacionaria, la serie temporal de propiedades de materiales, los interfaces de materiales y las superficies libres; no pueden ser rastreados con la misma precisión que en un análisis Lagrangiano, tal como se muestra en la Figura 88. Pushkaraj et al. (2010).



**Figura 8.** Flujo de material a través de una malla estacionaria.  
Fuente: Pushkaraj et al. (2010)

El análisis combinado Arbitrary Lagrangian Eulerian denominado ALE, es capaz de solucionar los aspectos de dinámica de fluidos y estructurales ante una detonación como muestra la Figura 9, el solucionador ALE maneja grandes distorsiones (una deficiencia de los solucionadores lagrangianos) pero conserva la capacidad de identificar claramente las interfaces (una deficiencia de los solucionadores eulerianos). Pushkaraj et al. (2010).

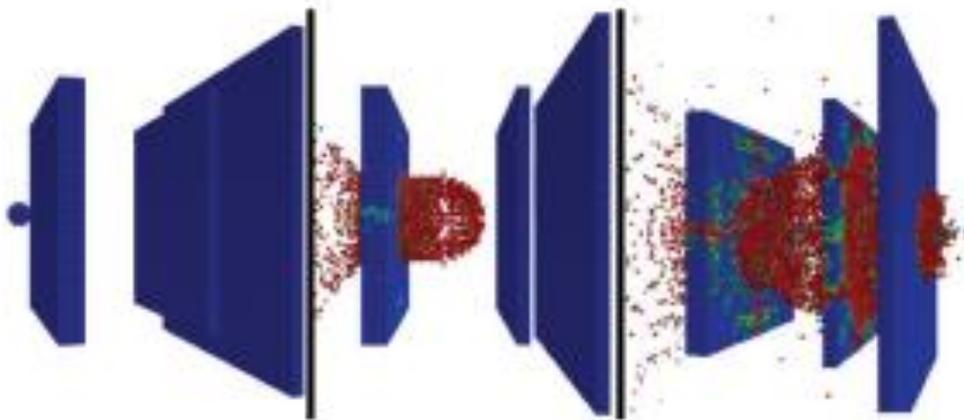


**Figura 9.** Restitución óptima de la malla mediante la formulación de ALE  
Fuente: Pushkaraj et al. (2010)

En nuestra investigación se emplea el método de la Hidrodinámica de Partículas Suaves (SPH), es un método basado en la simulación del comportamiento de los fluidos, donde el procesamiento brinda información como la velocidad y la densidad, teniendo además su aplicación extensamente a problemas que involucran flujos incompresibles,

conducción de calor, explosivos e impactos de la velocidad, evitando las limitaciones de deformación extrema dado por el enredo de la malla. Modela también los complejos comportamientos de interfaz de superficie libre y materiales, por ello se incluyen la descomposición de sólidos en fragmentos, dados por el método de elementos finitos, la diferencia principal a los métodos clásicos con el SPH es la ausencia de una cuadrícula, por lo tanto; las partículas son el marco computacional en el que se resuelven las ecuaciones de control. (Villaverde, 2010).

Este método se caracteriza en un marco Lagrangiano, ya que puede manejar altas deformaciones como muestra la Figura 10, con borde móvil, interfaz móvil y superficie libre, aplicada tanto para piezas sólidas como fluidas, posee múltiples opciones de acoplamiento (métodos de interacción) entre diferentes partes de SPH y entre partículas de SPH y sólido, convirtiendo de forma adaptativa los elementos sólidos en partículas SPH para manejar deformaciones severas. (Villaverde, 2010).



**Figura 10.** Problema de impacto de alta velocidad.  
Fuente: (Villaverde, 2010).

El método SPH se basa en fórmulas de integración numérica de partículas en movimiento, función que se puede escribir como la integral definida ec. (1) propuesta (Gingold & Monaghan, 1977), de las cuales se deducen las demás ec. (2), (3), (4) y (5).

$$\int_{\Omega} f(x) dx = \sum_{j \in P} W_j(t) f(x_j(t)) \quad (1)$$

Dónde:  $(X_j(t), W_j(t)) j \in P$ ,  $P$  es el conjunto de las partículas,  $X_j(t)$  es la ubicación de la partícula  $j$  y  $W_j(t)$  es el peso de la partícula  $j$ .

La formulación de integral definida junto con el núcleo suavizado conduce a la definición de la aproximación de partículas de una función. El valor interpolado de una función  $U(x)$  en la posición  $(x)$  usando el método SPH de la ec. (2) es:

$$\prod^h(u(x_i)) = \sum_{j \in \Omega} W_j(t) u(x_j) W(x_i - x_j, h) \quad (2)$$

Dónde la suma es sobre todas las partículas dentro  $\Omega$  y dentro de un radio  $2h$ ,  $W$  es un núcleo de interpolación basado en ranura de radio  $2h$ . Imita la forma de una función delta, pero sin las colas infinitas. Es una función  $C^2$ .

La función del núcleo se define como la siguiente:

$$W(x_i - x_j, h) = \frac{1}{h} \theta \left\{ \frac{x_i - x_j}{h(x, y)} \right\} \quad (3)$$

Dónde  $W(x_i - x_j, h) \rightarrow \delta$  cuando  $h \rightarrow 0$ ,  $\delta$  es la función de Dirac,  $h$  es una función de  $x_i$  y  $x_j$  y son la denominada longitud de suavizado de Kernel.

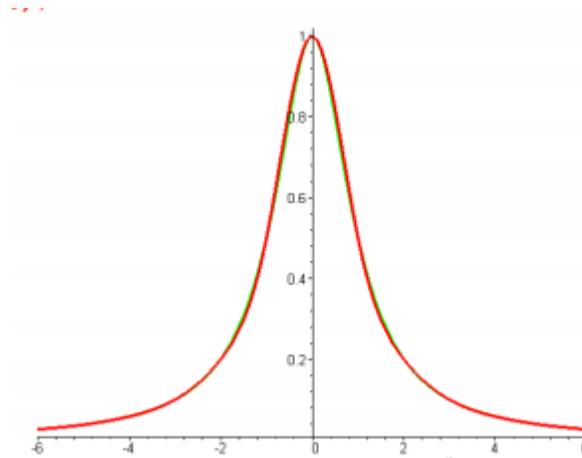
Y se define la función cúbica B-spline:

$$\theta(d) = C * \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}d^2 + \frac{3}{4}d^3, & \text{cuando } 0 \leq d \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2 - d^3), & \text{cuando } 1 \leq d \leq 2 \\ 0 & d > 2 \end{cases} \quad (4)$$

El gradiente de la función  $u(x)$  se da al aplicar el operador de derivación en la longitud de suavizado.

$$\nabla \prod^h(u(x_i)) = \sum_j W_j u(x_j) \nabla W(x_i - x_j, h) \quad (5)$$

En la Figura 11 se observa el gráfico de una interpolación cúbica spline de solución única, que es el valor de una función y el de su derivada en cada uno de los nodos. (Xu, 2013).



**Figura 11.** Interpolación de la función  
Fuente: (Xu, 2013)

## Ecuación de Continuidad y Ecuación de Momento

La aproximación de partículas de la ec. (6) de continuidad propuesta por (Gingold & Monaghan, 1977), se define como:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) w_{ij\beta} \quad (6)$$

La forma discretizada de la ec. (7) de momento SPH se desarrolla como:

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = - \sum_j \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} (\sigma_i^{\alpha\beta} \pm \sigma_j^{\alpha\beta}) w_{ij\beta} \quad (7)$$

La formulación anterior asegura que la tensión sea automáticamente continua a través de las interfaces del material. Se pueden lograr diferentes tipos de resultados de momento de SPH mediante la aplicación de las ecuaciones de identidad en la ecuación de momento de SPH normal. La formulación simétrica de la ecuación de momento de SPH puede reducir los errores que surgen del problema de inconsistencia de partículas (Xu, 2013).

De la ec. (7) se derivaron las siguientes fuerzas ec. (8) del cuerpo de partículas:

$$F_i^{pressure} = - \sum_j m_j \frac{\rho_i + \rho_j}{2\rho_j} \nabla W(r_{ij}, h)$$

$$F_i^{viscosity} = \mu \sum_j m_j \frac{v_i - v_j}{2\rho_j} \nabla^2 W(r_{ij}, h) \quad (8)$$

Donde  $r_{ij} = x_i - x_j$ ,  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad del fluido. La presión  $p_i$  se calcula mediante la ec. (9) constitutiva:

$$p_i = k (\rho_i - \rho_0) \quad (9)$$

Donde  $k$  es la rigidez del fluido y  $\rho_0$  es su densidad inicial. Finalmente, para la aceleración de una partícula  $i$  tenemos ec (10):

$$a_i = 1 / \rho_i (F_i^{pressure} + F_i^{viscosity} + F_i^{external}) \quad (10)$$

Donde  $F_i^{external}$  son fuerzas externas tales como fuerzas del cuerpo o fuerzas debidas a contactos.

### 2.3.5 Métodos de Integración Temporal

Una solución aceptable para problemas no lineales, en la mayoría de los casos únicamente da una resolución numérica, para este caso se estudia la solución temporal de la Ecuación Dinámica ec. (11) analizada en el estudio realizado por (Santos, 2018).

$$M\ddot{x} + Fi - Fe = 0 \quad (11)$$

Dónde: matriz de masa  $M = \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 \\ 0 & 0 & m3 \end{bmatrix}$ , vector de Aceleración  $\vec{a} = \ddot{x}$ , fuerzas

internas desarrolladas durante la deformación  $F_i = (\dot{x}, x, t)$ , fuerzas externas aplicadas y fuerzas de volumen  $F_e(\dot{x}, x, t)$ .

### 2.3.6 Método Explícito e Implícito

El LS-DYNA permite la utilización de dos modos de integración temporal la explícita (por defecto), e implícita. El método implícito es apropiado para obtener solución de problemas que presenten condiciones estáticas como el analizar una estructura ante cargas permanentes, donde los elementos no sufren grandes aceleraciones, para problemas no lineales el tamaño de los pasos de tiempo debe ser lo suficientemente pequeños para obtener la convergencia, aunque este se puede garantizar. (García, 2014)

Para el estudio realizado y por ser un problema altamente dinámico con grandes desplazamientos y velocidades, se emplea la solución explícita; es decir, esta solución trabaja con altas frecuencias. En problemas no lineales se realiza una convergencia directa ya que las ecuaciones están desacopladas, por lo que se pueden resolver directamente, además que el LS-DYNA por defecto realiza una integración en tiempo de tipo explícito, así que en el paso de tiempo n-esimo utiliza la ec. (12). (Santos, 2018).

$$M\ddot{x}^{(n)} + Fi^{(n)} - Fe^{(n)} = 0 \quad (12)$$

El cálculo de la solución explícita se hace por incrementación directa, en tiempos pequeños condicionalmente estables, utilizando los resultados de pasos anteriores, por lo que necesita control de convergencia el cual restringe el tamaño del tiempo para así ajustarse a la solución y acercarse más a la respuesta analítica. (Santos, 2018).

Dentro de los campos de aplicación resuelve problemas dinámicos de corta duración con respuesta de frecuencias altas, propagación de ondas y similares, impacto de choques, penetración y explosiones. (Santos, 2018).

### **2.3.7 Elementos con Integración Reducida y con Integración Completa**

La variedad de elementos disponibles en LS-DYNA usualmente emplea integración reducida, utilizada en este estudio; en la cual las tensiones y deformaciones se deducen únicamente en el punto medio de cada elemento, teniendo una ventaja en su eficiencia computacional ya que recurre al modelo de material una vez por cada punto de integración en cada paso de tiempo, empero aparecen modos espurios con una deformación o de energía nula. (Blind & Richard, 2009).

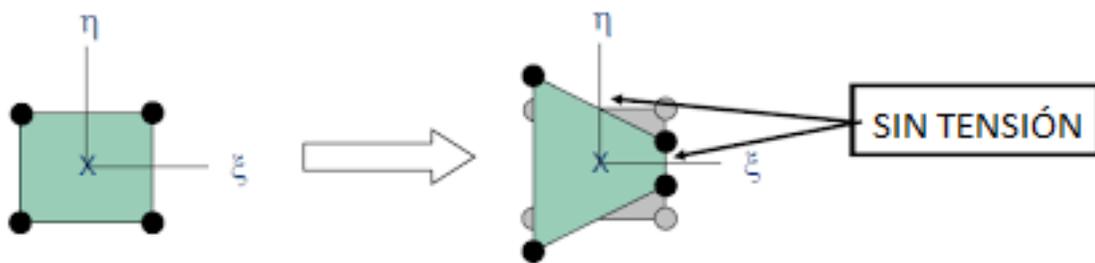
Refiere a energía nula a la deformación que se produce en el elemento, pero no es una energía interna asociada, por ello el nombre de “modos de energía nula”, dichos modos se pueden evitar mediante el “CONTROL DE HOURGLASS”. (Santos, 2018).

El propósito del HOURGLASS es el control de deformación de los elementos finitos para definir las propiedades de viscosidad en masa, necesaria para propagar las ondas de choque en materiales. Generalmente, los valores predeterminados están bien, excepto en problemas donde las presiones son muy altas, adicional si tienen baja densidad puede ser necesario reducir los valores de viscosidad ya que la tensión viscosa puede ser significativa (Blind & Richard, 2009).

El “HOURGLASS” dentro del LS-DYNA posee varias opciones disponibles tanto para elementos sólidos, como para elementos tipo Shell, para el estudio realizado se utiliza la forma viscosa con integración de volumen exacto para elementos sólidos. Todos los elementos sólidos utilizados representan grandes deformaciones y rotaciones, es decir el elemento sólido LS-DYNA tipo 1 se reduce integrando con el control de HOURGLASS y se usa en los refuerzos de borde, LS-DYNA tipo 3 es un sólido totalmente integrado de

segundo orden de ocho nodos con rotaciones nodales usado generalmente en placas de sujeción, estas simulaciones utilizan integración reducida. (Blind & Richard, 2009).

En algunos controles con la integración reducida como muestra la Figura 12, no aparecen deformaciones en los puntos de integración y por lo tanto tampoco tensiones. (Santos, 2018).



**Figura 12.** Integración reducida sin tensión.

Fuente: (Santos, 2018).

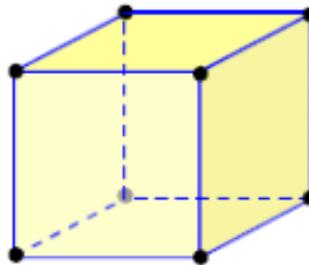
La integración completa hace referencia al orden de integración mínima requerida para la integración exacta de la energía de deformación, que aplica a elementos no distorsionados con propiedades de material lineal. (Blind & Richard, 2009).

La integración que se realiza puede ser una integración completa o reducida, integración completa se puede encontrar en la contribución de cizallamiento a la rigidez que se integra exactamente, mientras que en una contribución volumétrica a la rigidez se evalúa utilizando una integración reducida. (Blind & Richard, 2009).

### 2.3.8 Elementos solidos 3D

Para modelar sólidos y estructuras sin ninguna simplificación geométrica a priori en el LS-DYNA, utiliza elementos sólidos 3D que por defecto son hexaedros de 8 nodos como

muestra la Figura 13, que emplean integración reducida con control de HOURGLASS, también se pueden utilizar elementos sólidos de 8 nodos con integración completa, pero son más costosos en tiempo de computación, además que si se usan elementos con integración completa no es necesario el control de HOURGLASS. Los tetraedros y pentaedros son hexaedros degenerados (se colapsan o duplican algunos de los nodos), lo que pueden ocasionar problemas por lo que se recomienda limitar su uso en la mayor parte posible. (Blind & Richard, 2009).

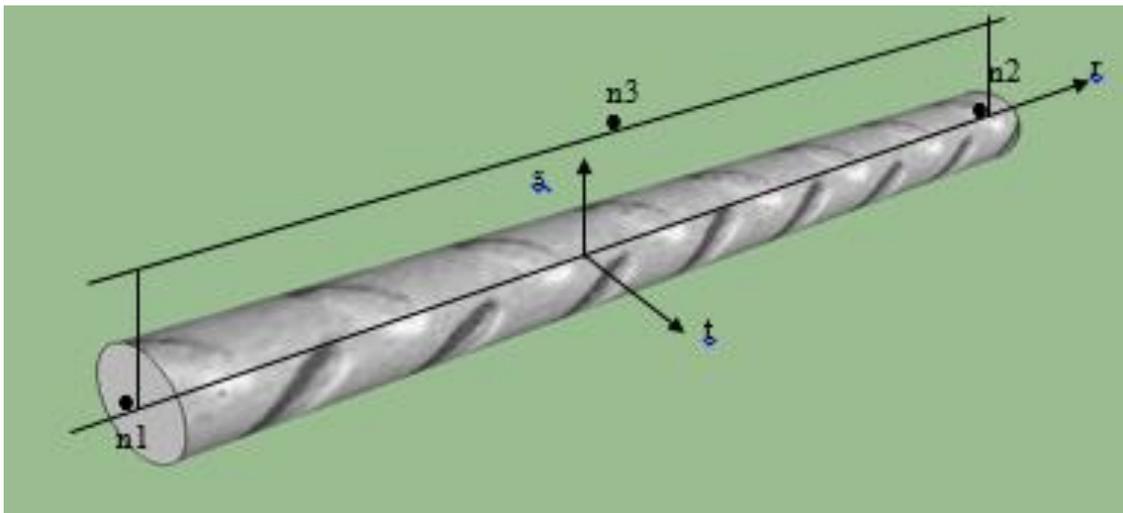


**Figura 13.** Elemento sólido 3D.  
Fuente: (Blind & Richard, 2009).

Al utilizar elementos sólidos 3D, da la ventaja de simplificaciones relativas a las cargas, a la geometría y a los modelos constitutivos del material, así como las condiciones de contorno que son tratadas de forma más realista que en las denominadas láminas y vigas; empero, es mayor en el coste computacional, en el post-procesado de resultados, el refinamiento del mallado y presentan un mal comportamiento para estructuras de pequeño espesor, ya que tienen un esfuerzo mayor en la preparación del mallado. (Santos, 2018).

### 2.3.9 Elementos tipo viga

Otra particularidad del programa LS-DYNA, es definir el comportamiento de los elementos tipo viga 3D, el cual sirve para tratar los casos de flexión, cortante y torsión del elemento, por lo que es necesario definir correctamente la orientación de los ejes de la sección, tal como muestra la Figura 14. (Santos, 2018).



**Figura 14.** Orientación de los ejes

Fuente: (Santos, 2018).

Para obtener una respuesta adecuada se define a los elementos a través de 3 nodos  $n1$ ,  $n2$ ,  $n3$ , mediante los cuales se puede hacer referencia a un plano, como muestra la Figura 144, que el plano principal de la viga es el r-s. El tercer nodo nunca se usa para imponer condiciones de contorno. (Santos, 2018).

De las formulaciones disponibles en el LS-DYNA (\*SECTION\_BEAM-ELEFORM) en este estudio se utilizó la que el programa da por defecto; el criterio de Hughes-Liu, ya que es una integración en la sección transversal que permite el cálculo de volumen del sólido con una base dada. (Santos, 2018).

### **2.3.10 Materiales**

Para realizar simulaciones adecuadas se debe seleccionar modelos de material de acuerdo a las características y comportamiento. El simulador LS-DYNA es un código de elementos finitos de propósito general para el análisis de grandes deformaciones estáticas y de la respuesta dinámica de estructuras, el cual incluye una amplia variedad de modelos de material que son capaces de simular el comportamiento. (Hu, Wu, & Li, 2016).

### **2.3.11 Hormigón**

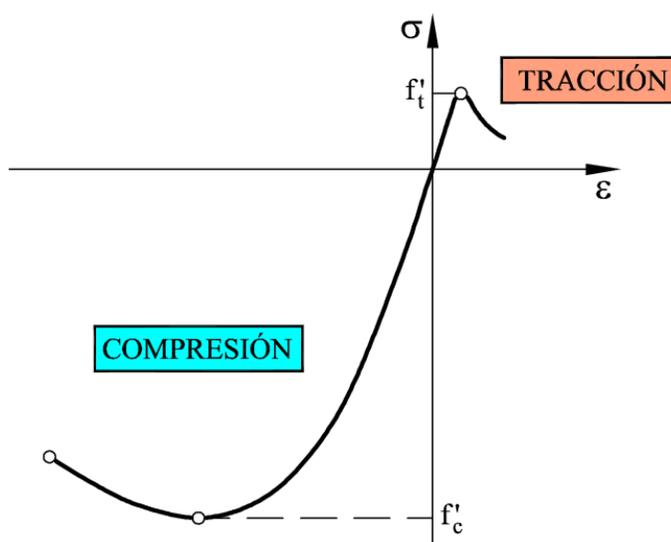
La base primordial de las estructuras depende de la resistencia del hormigón, debido a sus buenas características, cuyo análisis y modelización en deformaciones dinámicas supone un campo de investigación de gran importancia en la actualidad. (Castanera, 2015).

El Ls- Dyna basado en elementos finitos es capaz de simular problemas reales complejos en el que se han desarrollado distintos modelos de hormigón, entre los modelos más utilizados se puede encontrar el Karagozian and Case Model (K&C) y el Riedel-Hiermaier-Thoma Model (RHT), el cual se explicará posteriormente. (Castanera, 2015).

#### **2.3.11.1 Propiedades mecánicas del hormigón**

La característica particular de cualquier elemento estructural se basa en sus propiedades mecánicas, la cual conlleva a evaluar la relación que existe entre esfuerzos y deformaciones admisibles. (Bischoff & Perry, 1991).

Según Hu et al. (2016) la resistencia del hormigón depende de sus solicitaciones, sea éste a tracción o a compresión dependiendo la zona como muestra la Figura 15, las cuales exhiben resistencias muy diferentes, es así que el comportamiento a tracción, aunque no presenta una zona clara de fluencia es frágil, con resistencia baja y comportamiento dúctil, en cambio a compresión se presenta con resistencias mayores, por lo que la resistencia a compresión es 10 veces mayor que a tracción.

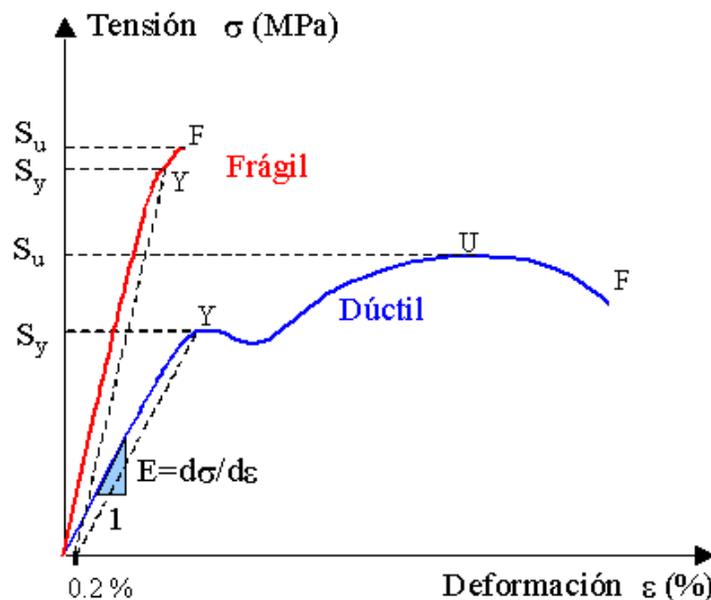


**Figura 15.** Solicitaciones del hormigón  
Fuente: Hu et al. (2016)

Los valores que determinan la resistencia a la compresión dependerán del tamaño y la forma del espécimen, dosificación, procedimientos de mezclado, métodos de muestreo, moldeado, edad, temperatura y condiciones de humedad durante el curado. Hu et al. (2016).

Dentro de una estructura convencional de concreto la resistencia a la compresión se lo expresa en términos de esfuerzo generalmente en kg/cm<sup>2</sup> y con alguna frecuencia lb/pulg<sup>2</sup>. Se puede evaluar esta resistencia mediante pruebas mecánicas que pueden ser destructivas, las cuales permiten probar repetidamente la muestra de manera que se pueda estudiar la variación de la resistencia u otras propiedades con el paso del tiempo. Hu et al. (2016).

La resistencia a la tensión determina las propiedades de los materiales elásticos como es el caso del acero que permite definir el límite de fluencia, la resistencia a la rotura y la ductilidad del material. En la Figura 16 se puede observar dos curvas correspondientes a un ensayo de tracción de un material frágil y uno dúctil, donde se puede concluir que la ductilidad admite grandes deformaciones. (Borrvall, 2011).



**Figura 16.** Comparación de las curvas de dos elementos  
Fuente: Hu et al. (2016).

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo

$\varepsilon$  = Deformación

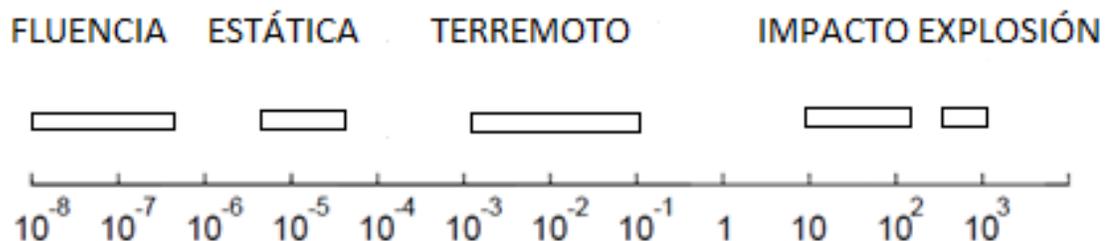
$S_y$  = Esfuerzo de tensión admisible

$S_u$  = Esfuerzo de tensión último

$E$  = Módulo de elasticidad

### 2.3.11.2 Velocidad de Deformación

La magnitud que mide el cambio de deformación respecto al tiempo se llama velocidad de deformación, la cual se da por las acciones dinámicas resultado de los desplazamientos y deformaciones que aparecen en la estructura, teniendo un rango de valores muy amplio desde  $10^{-8} s^{-1}$  para la fluencia, hasta  $10^3 s^{-1}$  en el caso de detonaciones con explosivos de alta energía tal como muestra la Figura 17. (Bischoff & Perry, 1991).



**Figura 17.** Variación de deformación.

Fuente: (Bischoff & Perry, 1991)

La velocidad de deformación, influye en el comportamiento de los materiales las cuales inducen a las acciones exteriores. Para el caso de acciones impulsivas, parte de los

esfuerzos se transmiten a través de la estructura, en forma de ondas de tensión y de deformación. Hu et al. (2016).

### **2.3.11.3 Modelo de Hormigón RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma Model)**

El hormigón constituye una roca artificial, utilizada generalmente en la estructura de edificaciones por su gran desempeño a compresión. Este material tiene un bajo desempeño a tracción por lo que es necesario combinarlo con varillas de acero para ser utilizado como material base de elementos estructurales (Medina, 2008).

“La resistencia a la tracción ( $f_t$ ) es 92% inferior que la resistencia a la compresión ( $f_c$ )”. (Castanera, 2015).

El diseño de columnas atiende solicitaciones de cargas verticales y cargas sísmicas, lo cual exige una gran resistencia a compresión y flexibilidad. La combinación del hormigón simple con el acero se transforma en un material dúctil; ya que los modelos constitutivos para el modelamiento de daño en hormigón deben producir una transición entre el comportamiento elástico lineal o no lineal, el régimen de endurecimiento no lineal y el estado débil último al superar los valores máximos. (Castanera, 2015).

Los modelos de hormigón difieren en aproximación las siguientes áreas; actualizaciones elásticas y plásticas, formulaciones de superficies de resistencia, efectos de velocidad de deformación y escala; y, acumulación de daños (Zhenguo, Tu, & Yong, 2010).

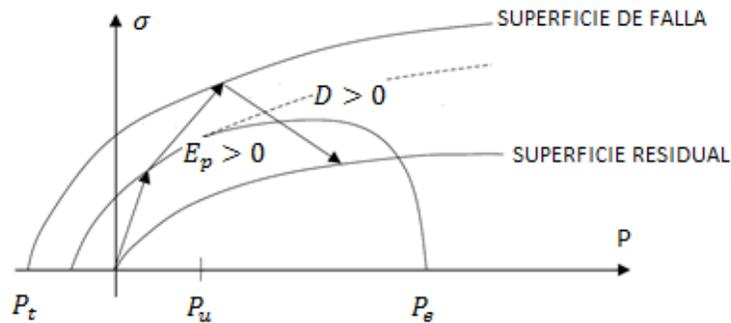
Cuando se produce daño en el hormigón, este empieza a acumularse, posteriormente la resistencia se reduce debido al colapso de la superficie de resistencia en el espacio tensorial. (Borrvall, 2011).

El modelo de hormigón RHT es un modelo de falla al que incorpora características que son necesarias para una correcta descripción de la resistencia dinámica a presiones relevantes de impacto. La resistencia al corte se describe por medio de tres superficies límite; la superficie de elasticidad inelástica, la superficie de falla y la superficie residual, todo depende de la presión. Los comportamientos posteriores al rendimiento y posteriores al fallo se caracterizan por el endurecimiento y el daño por deformación, respectivamente, y los efectos de la tasa de deformación son un ingrediente importante en este contexto. (Borrvall, 2011).

Dicho modelo RHT se expresa en términos de tres superficies de límite de tensión; la superficie de elasticidad inicial, la superficie de falla y la superficie de fricción residual. La superficie de falla, es decir, la resistencia máxima del concreto, se forma a partir de los parámetros del material, incluida la compresión, resistencia a la tracción y al corte del hormigón. (Borrvall, 2011).

La tensión alcanza la superficie de falla, impulsado por la tensión plástica, que a su vez representa la superficie del límite de tensión posterior a la falla mediante la interpolación entre la superficie de falla y la superficie de fricción residual; al igual, las deformaciones plásticas junto con las propiedades de endurecimiento del concreto, al ser insumos de entrada, se utilizan para formar una superficie de rendimiento efectivo mediante la interpolación entre la superficie de rendimiento inicial y la superficie de falla

como se muestra en la Figura 18. Para un material totalmente dañado, no hay dependencia de la velocidad de deformación y la resistencia al corte solo se soporta en condiciones confinadas, es decir, cuando existen presiones positivas. (Borrvall, 2011).



**Figura 18.** Superficies de límite de tensión  
Fuente: (Borrvall, 2011).

En el modelo RHT, la presión está descrita por la Ecuación de Estado (EOS) de Mie-Gruneisen con una curva polinomial de Hugoniot y una relación de compactación  $\rho - \alpha$ , además en el modelo de compactación, definimos una variable histórica que representa la porosidad que se inicializa en  $\alpha_0 > 1$ ; esta variable representa la fracción actual de densidad entre el material de la matriz y el hormigón poroso, la cual disminuirá con el aumento de la presión (Bischoff & Perry, 1991).

La evolución de esta variable se describe en la ec. (13) analizada por (Bischoff & Perry, 1991).

$$\alpha(t) = \max \left\{ 1, \min \left\{ \alpha_0, \min_{s \leq t} \left\{ 1 + (\alpha_0 - 1) \left[ \frac{P_{comp} - P(s)}{P_{comp} - P_{el}} \right]^N \right\} \right\} \right\} \quad (13)$$

Donde  $\alpha(t)$  indica la presión en el tiempo  $t$ . Esta expresión también implica el aplastamiento inicial de poros  $P_{el}$  y presión de compactación  $P_{comp}$  y el exponente de porosidad  $N$ . Para definir la presión actual de aplastamiento de poros, se utiliza la ec. (14).

$$P_c = P_{comp} - (P_{comp} - P_{el}) \left[ \frac{\alpha - 1}{\alpha_0 - 1} \right]^{1/N} \quad (14)$$

El resto del modelo de presión (EOS), se proporciona en términos de densidad y especificidad de energía interna, dependiendo de las entradas del usuario esta se rige por  $B_0 > 0$ , especificada en la ec. (15).

$$p(\rho, e) = \frac{1}{\alpha} \begin{cases} (B_0 + B_1\eta)\alpha\rho e + A_1\eta + A_2\eta^2 + A_3\eta^3 & \eta > 0 \\ B_0\alpha\rho e + T_1\eta + T_2\eta^2 & \eta < 0 \end{cases} \quad (15)$$

Para la descripción de la resistencia al corte usamos la ec. (16).

$$p^* = p/f'c \quad (16)$$

La máxima reducción de la resistencia se da en función de la presión relativa ec. (17)

$$Q = Q(p^*) = Q_0 + Bp^* \quad (17)$$

Finalmente, la dependencia de la tasa de deformación viene dada por la ec. (18).

$$f(x) = \begin{cases} F_r^c, & 3p^* \geq -F_r^c \\ F_r^c - \frac{3p^* - F_r^c}{F_r^c - F_r^t f_r^*} (F_r^t - F_r^c), & F_r^c > 3p^* \geq -F_r^t f_r^* \\ F_r^t, & -F_r^t f_r^* > 3p^* \end{cases} \quad (18)$$

Cuando los estados de endurecimiento alcanzan la resistencia máxima del concreto en la superficie de falla, el daño se acumula durante la carga inelástica adicional

controlada por la tensión plástica en este extremo, la deformación plástica en el fallo se da como presenta la ec. (19).

$$\varepsilon_p^f = \begin{cases} D1(p^* - (1 - D)p_t^*)^{D2}, & p^* \geq (1 - D)p_t^* + \left(\frac{\varepsilon_p^m}{D1}\right)^{1/D2} \\ \varepsilon_p^m, & (1 - D)p_t^* + \left(\frac{\varepsilon_p^m}{D1}\right)^{1/D2} > p^* \end{cases} \quad (19)$$

El parámetro de daño se acumula con la deformación plástica según ec. (20).

$$D = \int_{\varepsilon_p^h}^{\varepsilon_p} \frac{d\varepsilon_p}{\varepsilon_p^h} \quad (20)$$

Y la superficie de daño resultante ec. (21).

$$\sigma_d(p^*, s, \varepsilon_p) = \begin{cases} \sigma_y(p^*, s, \varepsilon_p, 1)(1 - D) + Df_c\sigma_r^*(p^*), & p^* \geq 0 \\ \sigma_y(p^*, s, \varepsilon_p, 1)\left(1 - D - \frac{p^*}{p_t^*}\right), & (1 - D)p_t^* \leq p^* < 0 \end{cases} \quad (21)$$

El flujo plástico se produce en la dirección de la tensión desviadora, es decir ec. (22):

$$\dot{\varepsilon}_p \sim s \quad (22)$$

Pero para la tensión hay una opción para configurar el parámetro correspondiente a la influencia del plástico volumétrico, usando  $\lambda \leq 1$  para el caso especial de  $\lambda = 1$  ec. (23):

$$\dot{\varepsilon}_p \sim s - pI \quad (23)$$

Esto se introduce para reducir el ruido en la tensión; se puede usar una deformación por falla para erosionar elementos con deformación severa, que por defecto se establece en 200%. (Bischoff & Perry, 1991).

#### 2.3.11.4 Modelo de erosión

La erosión inicia cuando la deformación plástica alcanza un límite efectivo ec. (24) y ec. (25). (Luccioni, Aráoz, & Labanda, 2013).

$$\varepsilon_{eff}^p \geq (\varepsilon_{eff}^p)_{lim} \quad (24)$$

$$\varepsilon_{eff}^p = \int \dot{\varepsilon}_{eff}^p dt \quad \dot{\varepsilon}_{eff}^p = \frac{\sqrt{3J_2} - \sigma_y}{3G} \quad (25)$$

Donde:

$\sigma_y$ : Tensión de rendimiento uniaxial

$G$ : Módulo de corte

El modelo de tensión plástica efectiva, es un criterio basado en la plasticidad, con la ventaja de que las deformaciones plásticas son irreversibles y se pueden interpretar físicamente como deformaciones irrecuperables. La ec. (25) define un flujo de plástico, normalmente utilizado en hidrocódigos en los que se desacoplan las respuestas hidrostáticas, sin embargo, se puede utilizar un flujo plástico más complejo. Aunque tiene fundamentos físicos, no se han encontrado referencias que usen este tipo de criterio de erosión para concreto de bajo resistencia o cargas explosivas. Luccioni et al. (2013).

El criterio de erosión y los límites en los resultados presentada en la Tabla 1 estudio realizado por Luccioni et al. (2013), fue desarrollada en base a las aplicaciones relacionadas con elementos de hormigón armado sometidos a cargas explosivas, es

difícil establecer cuál es el mejor criterio de erosión ya que el criterio debería ser apropiado para obtener el tipo de falla esperada. Luccioni et al. (2013).

**Tabla 1**

*Límites de erosión para explosivos en contacto con estructuras*

Estructura	Material	Tamaño de malla [mm]	Criterio de falla	Límite erosión	Referencia
			Tensión	0.99	
Placa de hormigón	Hormigón 48 MPa	2	Daño y tensión efectiva	0.2	(Zhou & Hao, 2009)
			Tensión efectiva	2	
Compuesto de hormigón/columna de acero	Hormigón 40 MPa	50	Principal deformación por tracción	0.1	Wu et al. (2011)
Concreto reforzado con fibra (FRC) Cilindro	FRC 1% 28 MPa	-	Tensión de corte	0.4	Wang et al. (2009)
			Esfuerzo de tracción	5.4 MPa	
Concreto reforzado con fibra (FRC) Cilindro	FRC 1.5% 30 MPa	-	Tensión de corte	0.4	Wang et al. (2009)
			Esfuerzo de tracción	6.0 MPa	
Concreto reforzado con fibra (FRC) Cilindro	FRC 2% 32 MPa	-	Tensión de corte	0.4	Wang et al. (2009)
			Esfuerzo de tracción	7.5 MPa	

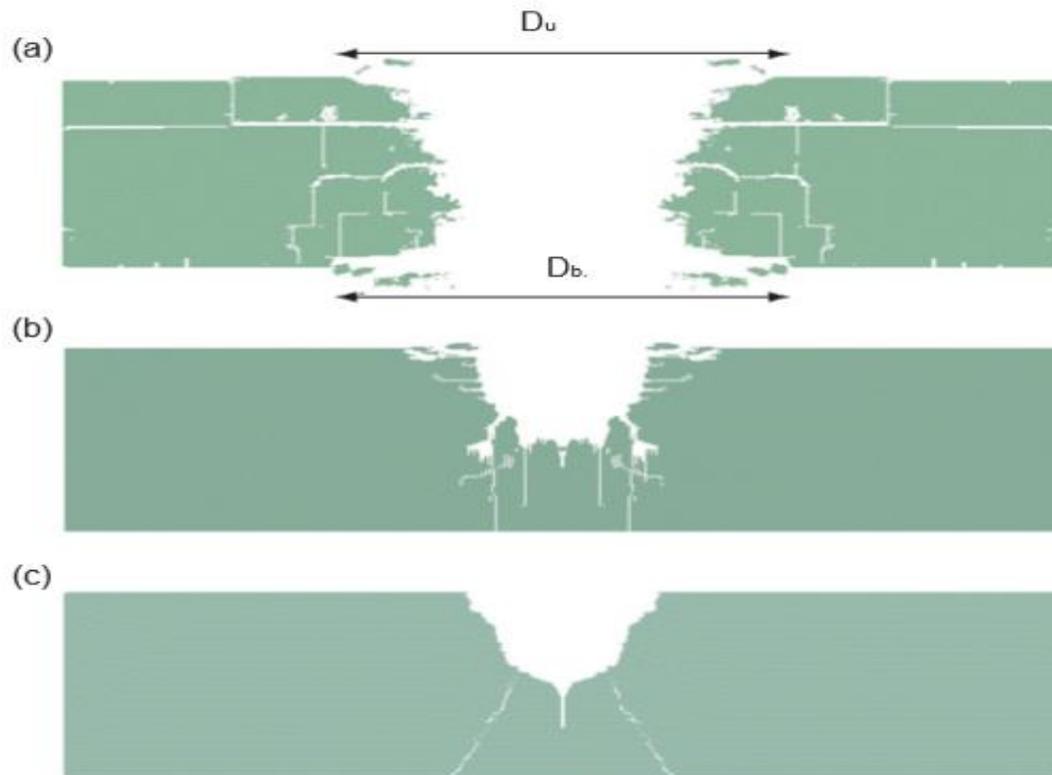
El tipo de falla puede cambiar de una falla de corte local a una falla de flexión cuando se incrementan los límites de erosión. Además, la determinación de la curva de fragilidad

para un nivel de daño extremo (colapso) fue descrita por Luccioni et al. (2013), a partir de un análisis numérico de paredes de mampostería bajo cargas de explosión considerando la incertidumbre del límite de erosión del material, no es fácil definir a priori un límite, ya que la tasa de deformación no se conoce previamente y seguramente es variable dentro de la estructura Luccioni et al. (2013).

El criterio establecido en la deformación geométrica instantánea, es capaz de representar fallas de concreto bajo cargas cercanas, pero si es basado en la tensión máxima también puede reproducir fallas debido a cargas explosivas a cierta distancia de separación, además la fragmentación del concreto se simula mejor utilizando un criterio de erosión basado en la tensión. Luccioni et al (2013).

Es decir, una combinación de límites de tensión geométrica instantánea y límites de tensión de tracción representa un criterio de erosión adecuado para reproducir diferentes tipos de fallas de concreto bajo cargas explosivas, utilizando una malla muy fina para obtener la forma de la zona dañada registrada en las pruebas bajo contacto o cerca de cargas de voladura. Luccioni et al. (2013).

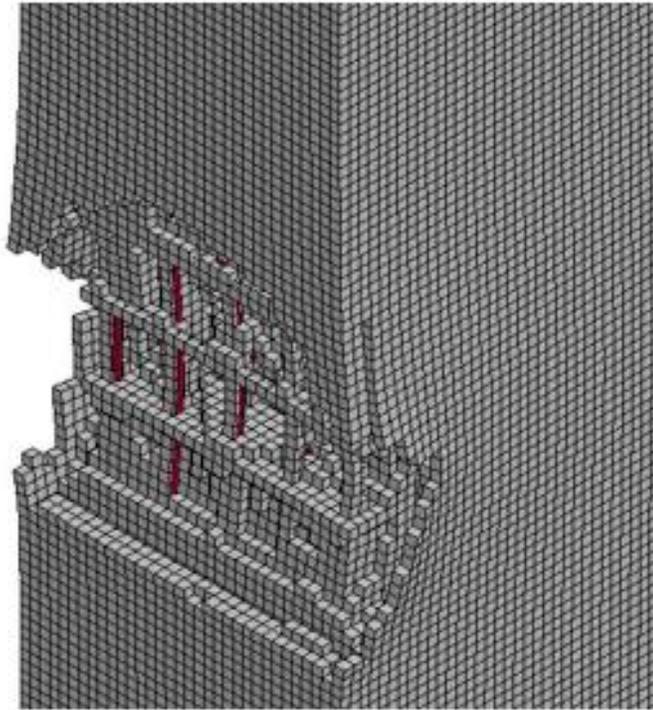
Es importante considerar que el criterio de erosión cambia dependiendo del tamaño del mallado, en la Figura 19, podemos observar la simulación de una losa con un tamaño de malla de 2 mm para diferentes límites de erosión. (a)  $(\varepsilon_{eff})_{lim} = 0.001$ ; (b)  $(\varepsilon_{eff})_{lim} = 0.01$ ; (c)  $(\varepsilon_{eff})_{lim} = 0.1$ .



**Figura 19.** Simulación con malla de 2 mm.  
Fuente: Luccioni et al. (2013).

### 2.3.11.5 Efecto Brisance

Cuando el explosivo se encuentra en contacto, los materiales sólidos se exponen a la onda de choque por lo que experimentan aplastamiento o desintegración del material como muestra en la Figura 20, este comportamiento es conocido como efecto brisance Luccioni et al. (2004).

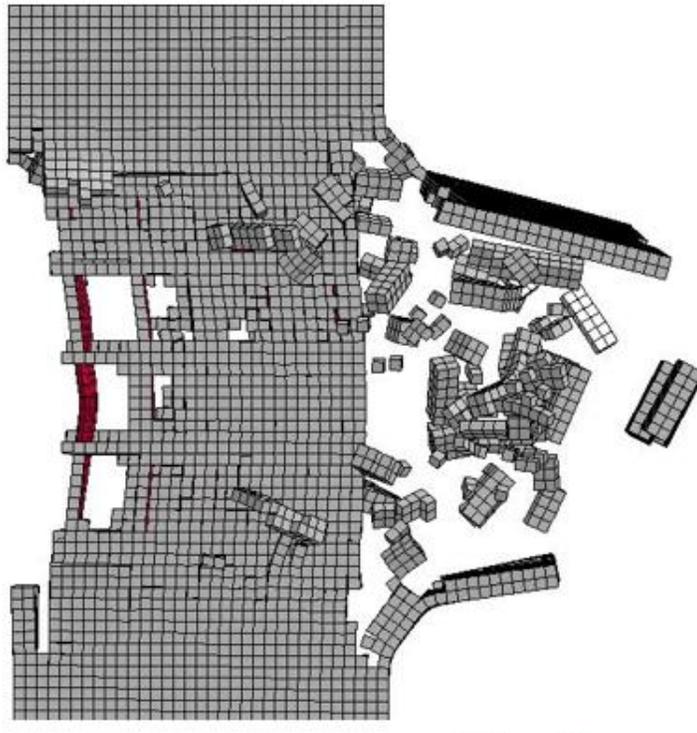


**Figura 20.** Falla instantánea del material

Por su parte Smith & Hetherington(1994) indican que este efecto de golpe de martillo desintegra totalmente el material en regiones cercanas al punto de detonación.

#### **2.3.11.6 Spalling**

El Spalling es una fractura dinámica inducida por la onda de choque, cuyo proceso generalmente consiste en la nucleación, el crecimiento y la coalescencia de una gran cantidad de defectos microscópicos como muestra la Figura 21. El hormigón se clasifica como un material casi frágil con un comportamiento de fallo dinámico muy complejo que combina comportamientos frágiles y dúctiles en la meso escala. Como resultado, podría producirse una rotura quebradiza y dúctil (Ohtsu, Uddin, Tong, & Murakami, 2007).



**Figura 21.** Fractura dinámica del hormigón

Ohtsu et al. (2007) también afirman que el daño por desprendimiento se produce cuando la onda de presiones dentro del material interactúa con la porción restante del pulso incidente, de tal manera que produce tensiones de tracción que exceden el umbral para el inicio del daño.

### **2.3.12 Acero**

El acero es un hierro con un contenido de carbono entre 0,03% y 1,075%, el mismo conserva las características metálicas del hierro en su forma más pura, pero la adición de carbono y otros elementos metálicos o no metálicos mejora sus propiedades físico-

químicas, especialmente su resistencia, puede reciclarse indefinidamente sin perder sus atributos, por ello su producción es a gran escala. (Castanera, 2015).

Existen varios tipos de acero según su aleación, que permiten diferentes usos y aplicaciones, lo que lo convierte en un material versátil, ningún material puede igualarlo en resistencia al impacto o la fatiga. Su variedad y disponibilidad lo hacen adecuado para numerosos usos como la construcción, aeronáutica, automotriz, entre otros. (Castanera, 2015).

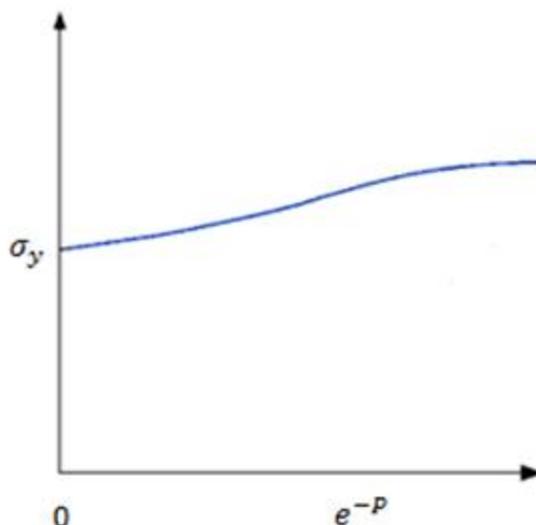
### **2.3.12.1 Material elastoplástico (MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY)**

Un material elastoplástico se puede definir mediante una curva de tensión frente a una tensión arbitraria y una deformación arbitraria con dependencia de velocidad. Adicionalmente se puede definir el fallo basado en una deformación plástica o un tamaño de paso de tiempo mínimo. (Livermore Software Technology Corporation y Dyna More, 2019).

Si se consideran capas laminadas o tipo sándwich con propiedades de material no uniformes (esto se define a través de la regla de integración especificada por el usuario), se recomienda el modelo, MAT\_LAYERED\_LINEAR\_PLASTICITY. Si se utilizan elementos sólidos y si las cepas elásticas antes de ceder son finitas, el modelo, MAT\_FINITE\_ELASTIC\_STRAIN\_PLASTICITY, trata las cepas elásticas con una formulación hiperelástica. (Livermore Software Technology Corporation y Dyna More, 2019).

El comportamiento de la tensión de esfuerzo puede tratarse mediante una curva de tensión bilineal; es decir, una curva de tensión efectiva frente a una de tensión plástica

efectiva, similar a la que se muestra en la Figura 22. (Livermore Software Technology Corporation y Dyna More, 2019).



**Figura 22.** Tensión vs deformación

Fuente: (Livermore Software Technology Corporation y Dyna More, 2019).

### 2.3.12.2 Ecuación de estado. Parámetro de Grüneisen ( $\gamma$ )

Una cantidad importante en geofísica es el parámetro Grüneisen ( $\gamma$ ), ya que a menudo se utiliza en ecuaciones que describen el comportamiento termo elástico de los materiales a altas temperaturas y presiones.

Este parámetro se basa en su parte microscópica, que relaciona las frecuencias vibratorias de átomos en un material y la macroscópica que le relaciona con propiedades termodinámicas como la capacidad de calor y la expansión térmica. (Vocadlo, Poirer, & Price, 2000).

Para obtener las propiedades a altas presiones y temperaturas, se lo realiza de forma experimental de un valor exacto para  $\gamma$ . Muchas de estas expresiones relacionan  $\gamma$  con la presión atmosférica ( $P = 0$ ), y con la primera derivada del módulo de volumen con

respecto a la presión ( $K_T^{-1}$ ). Estas relaciones pueden ampliarse para tener en cuenta la variación de  $\gamma$  con la presión. Vocadlo et al. (2000).

En estos casos más generales,  $\gamma$  ( $P$ ) es una función de la ecuación de estado. A pesar de la relación intrínseca entre  $\gamma$  y EOS, es frecuente que la elección de la forma funcional tanto del parámetro Grüneisen como de la ecuación de estado, debe relacionarse independientemente el uno del otro, y no de forma arbitraria; esto ha dado lugar a una amplia gama de valores de  $\gamma$ . Vocadlo et al. (2000).

El funcionamiento numérico de la ec. (26) de estado de Mie-Grüneisen, según (Scapin, 2013), tenemos la expresión general:

$$P - P_H = \frac{\gamma}{v} (E - E_H) \quad (26)$$

Donde H identifica el estado de referencia, E sistema con energía interna, P presión, y v el volumen específico.

El parámetro de Grüneisen ec. (27) se define como:

$$\gamma = v \frac{dP}{dE} = v \frac{\alpha K}{C_v} \quad (27)$$

En la que  $\alpha$  es igual al coeficiente de expansión térmica,  $C_v$  el calor específico constante, v el volumen y K el módulo Bulk a temperatura constante. A partir de esto, es posible concluir que  $\gamma$  es una medida del cambio en la presión producida por un cambio en la energía bajo la condición de volumen constante. (Scapin, 2013).

Como aproximación, se puede considerar que la relación  $\gamma / v$  es constante como muestra la ec. (28):

$$\frac{\gamma}{v} = \frac{\gamma_0}{v_0} \quad (28)$$

Donde  $\gamma_0$  y  $v_0$  se calculan a presión cero. Otra posible definición, que considerada una corrección de volumen de primer orden de la igualdad anterior, da la ec. (29):

$$\gamma = \gamma_0 \frac{v}{v_0} + a \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \quad (29)$$

La formulación utilizada en la mayoría de los códigos del LS-DYNA en el que se puede escribir la ec. (30) de Mie-Grüneisen es:

$$P(\mu, E) = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2\right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{1 + \mu^2}\right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (30)$$

Donde  $\rho_0$  es la densidad sólida,  $C_0$  la velocidad del sonido elástica,  $\gamma_0$  el parámetro Grüneisen,  $a$  es la corrección de volumen.

La definición de material expandido es ec. (31):

$$P(\mu, E) = \rho_0 C_0^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (31)$$

### 2.3.13 Explosivos

Un explosivo es aquella sustancia química que, mediante una causa externa como el rozamiento, calor, entre otros, se transforma en gases; liberando grandes cantidades de calor, presión o radiación en un tiempo determinadamente corto, además permiten predecir cuáles serán los resultados de fragmentación, desplazamiento y vibraciones más

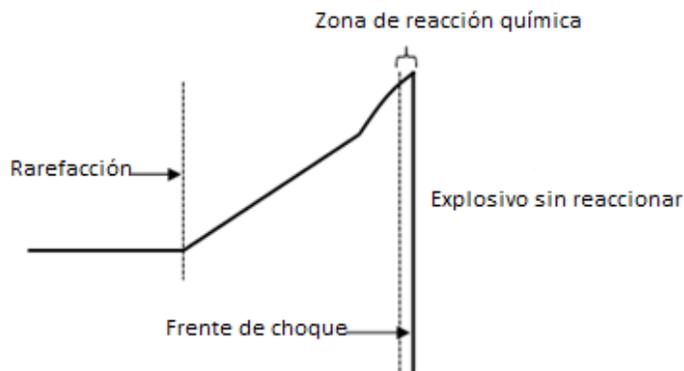
probables, y su clasificación depende de su composición química y/o física. (Watanabe, 2011).

Las características más importantes son la potencia, la energía desarrollada, velocidad de detonación, densidad, presión de detonación, resistencia al agua y sensibilidad. (Watanabe, 2011).

### **2.3.13.1 Física de la Detonación**

El proceso de detonación es un estado estable, es decir, la velocidad de la onda es constante y los productos de la detonación están en el mismo estado, independientemente de la posición de la onda en la distancia y el tiempo. Pushkaraj et al. (2010).

La detonación es un flujo inerte el mismo significa que es un flujo no reactivo, es decir, no pueden ocurrir más reacciones dentro del flujo, este modelo físico se encuentra representado en la Figura 23. En la cual se observa la discontinuidad de salto, teniendo en cuenta que la zona de reacción detrás del frente de choque se muestra solo con fines explicativos y se supone que su longitud es cero. Una onda de rarefacción se muestra detrás de la zona de reacción del frente de choque y representa la expansión de los productos de detonación desde una región de mayor densidad a una región de menor densidad. (Zukas & Walters, 1998).



**Figura 23.** Modelo físico de onda de detonación  
Fuente: (Zukas & Walters, 1998)

Todo el proceso de detonación se observa como una onda de choque que se mueve a través de un explosivo, el cual a medida que el frente de choque avanza, comprime y eleva la temperatura del explosivo adyacente sin reaccionar por encima de su punto de ignición. (Zukas & Walters, 1998).

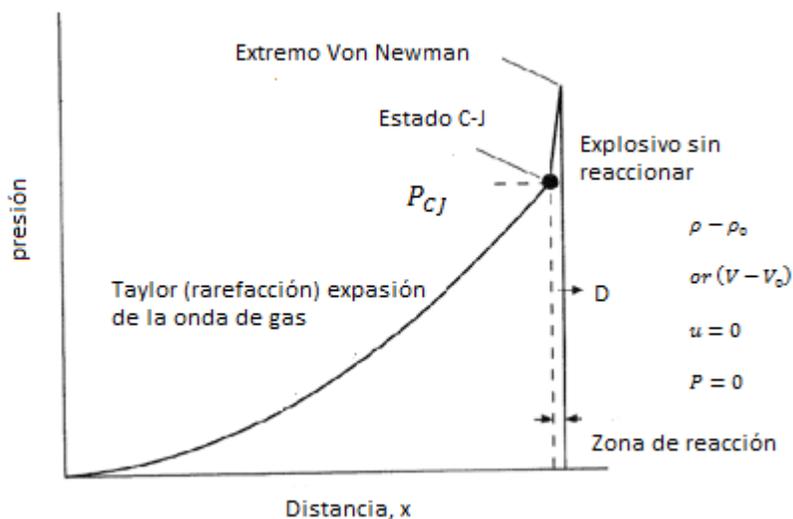
### 2.3.13.2 Velocidad de la Detonación

El fenómeno anteriormente descrito, que hace referencia; al frente de choque, la reacción química y el borde de ataque de la onda de rarefacción están en equilibrio, y por lo tanto se mueven a la misma velocidad, a ello se define como la velocidad de detonación; es decir, el calentamiento del explosivo inicia una reacción química dentro de una pequeña zona justo detrás del frente de choque conocido como la zona de reacción, esta reacción es exotérmica y se completa instantáneamente, ya que la energía liberada por la reacción, impulsa el choque hacia adelante, por lo que al mismo tiempo los productos gaseosos de la reacción se expanden y forman una onda de rarefacción que se mueve hacia el frente de detonación. Pushkaraj et al. (2010).

### **2.3.13.3 Perfil de onda de detonación y el Estado de Chapman-Jouget (C-J)**

La química de la detonación es un proceso de estado estable y el frente de choque la presión permanece constante y la velocidad de detonación no cambia con el tiempo. La presión, la velocidad y la densidad cambian significativamente en un frente de choque y este fenómeno se conoce como el salto de detonación. (Zukas & Walters, 1998).

Según Zukas & Walters (1998), para explicar la condición de salto de detonación del explosivo sin reaccionar a los efectos gaseosos, considera un perfil idealizado de una onda de detonación como se muestra en la Figura 24. El vértice en la parte frontal de la onda de detonación se llama la punta Von Neuman, el mismo que representa el estado de choque que inicia la reacción. La región delgada detrás del extremo de Von Neuman es la zona de reacción donde ocurre toda la reacción química. El extremo de la parte posterior de la zona de reacción se denomina plano de Chapman-Jouget (C-J) y su estado es característico de un material explosivo con una densidad inicial dada donde interactúan la presión, densidad y velocidad de choque. Así mismo se denomina onda de Taylor a la onda de rarefacción que es responsable de llevar los productos gaseosos del estado C-J al estado totalmente expandido a presión ambiental.



**Figura 24.** Curva presión-distancia  
Fuente: (Zukas & Walters, 1998)

#### 2.3.13.4 Ecuaciones de Estado para Explosivos (EOS)

Para explosivos de alta densidad se ha desarrollado varios EOS empíricos, incluidos BKW (Becker-Kistiakowski-Wilson), JCZ (Jacobs-Cowperthwaite-Zwisler), LJD (Lennard-Jones Devonshire) y JWL (Jones-Wilkin-Lee). El uso de cada EOS se limita a partir del rango de los datos experimentales utilizados. (Zukas & Walters, 1998).

Es fundamental que una EOS sea elegida cuidadosamente y calibrada de forma adecuada; por lo que, de los EOS citadas anteriormente, la EOS JWL puede modelar de manera adecuada los explosivos, ya que su procesamiento es más eficiente y se puede calibrar fácilmente.

#### 2.3.13.5 Ecuación de Estado JWL

En la detonación de un explosivo en un gran volumen de aire, como por ejemplo en las detonaciones de aire libre extremas, cualquier combustible que no haya reaccionado normalmente no se convierte en energía adicional, ya que las temperaturas dentro de la

bola de fuego disminuyen rápidamente y se suprime la reacción química. Sin embargo, cuando el mismo alto explosivo se detona en un ambiente cerrado, es decir, dentro de una cámara o habitación, la temperatura y la presión permanecen muy por encima del ambiente y pueden soportar la liberación de energía adicional, si los reactivos encuentran suficiente oxígeno adicional. Algunos explosivos mejorados están diseñados para aprovechar el tiempo de postcombustión tardía mediante la inclusión de partículas no explosivas. (Schwer L. , 2016).

Las concentraciones de los productos de una detonación pueden obtenerse utilizando códigos de equilibrio térmico y la cantidad de oxígeno requerida para permitir un proceso completo de combustión al reaccionar puede estimarse suponiendo una reacción estequiométrica de los reactivos. (Schwer L. , 2016).

En espacios cerrados, una detonación en un tiempo determinado empieza la postcombustión cuando la onda de choque se refleja desde una pared e interactúa con los productos de detonación, suponiendo que este choque reflejado provoca una mezcla suficiente de oxígeno externo con los reactivos disponibles en los productos de detonación. La poscombustión termina cuando la temperatura desciende por debajo de la necesaria para sostener la reacción o el consumo de oxígeno externo disponible. (Schwer L. , 2016).

La ecuación de estado JWL relaciona la presión-volumen en la expansión de la onda de Taylor mostrado en la Figura 18 y está dada por la ec. (32):

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V} E \quad (32)$$

Donde  $p$  es la presión,  $V$  es el volumen relativo,  $E$  es la energía interna específica y  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  y  $\omega$  son constantes obtenidas mediante la calibración de los datos de prueba. Estos parámetros se determinan a partir de la detonación de un cilindro de explosivos confinados por un metal similar al cobre. Pushkaraj et al. (2010).

La presión C-J es una función de la energía cinética y, por lo tanto, es la velocidad del cilindro de cobre en expansión, la velocidad del cobre en expansión se mide hasta que se fractura la pared del cilindro de cobre, su correlación con la presión C-J se utiliza para determinar las constantes y para una derivación completa de la EOS de JWL. Pushkaraj et al. (2010).

### **2.3.13.6 Material. Combustión de alto explosivo**

#### **(MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN)**

La combustión de este tipo de material permite modelar la detonación de un explosivo alto, además admite definir una ecuación de estado. (Livermore Software Technology Corporation y Dyna More, 2019).

Los puntos de quemado,  $F$ , que multiplican las ecuaciones de estados para altos explosivos, controlan la liberación de energía química para simular detonaciones. En cualquier momento, la presión en un elemento altamente explosivo viene dada por la ec. (33): (Livermore Software Technology Corporation y Dyna More, 2019).

$$p = F p_{eos}(V, E) \quad (33)$$

Donde  $p_{eos}$  es la presión de la ecuación de estado,  $V$  es el volumen relativo y  $E$  es la densidad de energía interna por unidad de volumen inicial.

En la fase de inicialización, se calcula un tiempo de iluminación  $t_l$  para cada elemento dividiendo la distancia desde el punto de detonación hasta el centro del elemento por la velocidad de detonación  $D$ . Si se definen múltiples puntos de detonación, el punto de detonación más cercano determina  $t_l$ . La fracción de quemadura  $F$  ec. (34), (35) y (36) se toma como el máximo. (Livermore Software Technology Corporation y Dyna More, 2019).

$$F = \max(F_1, F_2) \quad (34)$$

Cuando:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{2(t - t_1)DA_{emax}}{3V_e}, & \text{si } t > t_1 \\ 0, & \text{si } t \leq t_1 \end{cases} \quad (35)$$

$$F_2 = \beta = \frac{1 - V}{1 - V_{CJ}} \quad (36)$$

Donde  $V_{CJ}$  es el volumen relativo de C-J y  $t$  es la hora actual. Si  $F$  excede de 1, se restablece a 1. Este cálculo de la fracción de quemado generalmente requiere varios pasos de tiempo para que  $F$  alcance la unidad, extendiendo así el frente de quemado sobre varios elementos. Después de alcanzar la unidad,  $F$  se mantiene constante. Si se utiliza la opción de  $\beta = 1.0$ , cualquier compresión volumétrica causará detonación entonces  $F = F_2$  y la  $F_1$  no se calcula. (Livermore Software Technology Corporation y Dyna More, 2019).

Si se utiliza  $\beta = 2.0$ , el modelo explosivo se comportará como un material elasto-plástico si se definen el módulo de volumen, el módulo de corte y la tensión de

rendimiento. Por lo tanto, con esta opción, el material explosivo se puede comprimir sin causar detonación.

En cambio, el material altamente explosivo puede comportarse como un sólido elasto-plástico antes de la detonación. En este caso, se actualiza la tensión, a una tensión de prueba elástica,  $*S_{ij}^{n+1}$ , de la ec. (35) se obtiene ec. (37):

$$*S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^n + S_{ip}\Omega_{pj} + S_{jp}\Omega_{pi} + 2G\dot{\epsilon}_{ij}dt \quad (37)$$

Donde G es el módulo de corte, y  $\dot{\epsilon}_{ij}$  es la tasa de deformación desviadora.

La segunda invariante de tensión,  $J_2$ , se define en términos de los componentes de tensión desviadora ec. (38) como:

$$J_2 = \frac{1}{2}S_{ij}S_{ij} \quad (38)$$

La tensión de rendimiento es  $\sigma_y$ . Si se ha producido el rendimiento, es decir  $\phi > 0$ , la tensión del ensayo desviador se escala para obtener la tensión desviadora final en el momento  $n + 1$  sujeta a la ec. (39):

$$S_{ij}^{n+1} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3J_2}} * S_{ij}^{n+1} \quad (39)$$

Si  $\phi \leq 0$ , entonces ec. (40):

$$S_{ij}^{n+1} = *S_{ij}^{n+1} \quad (40)$$

Antes de la presión de detonación viene dada por la expresión ec. (41):

$$p^{n+1} = K \left( \frac{1}{V^{n+1}} - 1 \right) \quad (41)$$

Donde K es el módulo de volumen.

Una vez que el material explosivo detona el material se comporta como un gas entonces ec. (42):

$$S_{ij}^{n+1} = 0 \quad (42)$$

## 2.4 Resumen

En este capítulo se revisó definiciones de los parámetros de ingreso en el software LS-DYNA para poder simular de forma adecuada el fenómeno físico. Intervinieron dentro de este estudio el método de elementos finitos mediante una integración temporal con elementos de integración reducida, así como los tipos de elementos finitos sólidos, viga y SPH que generan las condiciones ideales para cada elemento que conforma la columna de hormigón armado y el explosivo, facilitando su integración e interrelación.

Debido al comportamiento del hormigón ante cargas de onda de choque o impactos balísticos, se selecciona un modelo de daño apropiado que obtenga la caracterización estática y dinámica del material, apoyado en una ecuación de estado incluida dentro del modelo constitutivo. El acero por su parte, presenta un desarrollo elastoplástico.

Las cargas explosivas, deben ser simuladas con un modelo constitutivo que recree el consumo de este material, además, se utiliza la ecuación de estado JWL para obtener los cambios de presión y volumen que se desprenden a gran velocidad en una detonación.

En el siguiente apartado se detalla los parámetros con los que fueron desarrollados los modelos computacionales y el proceso de escaneo en tres dimensiones de las

columnas. El proceso de escaneo sirvió para realizar mediciones de gran precisión que puedan ser utilizadas para la validación.

## **CAPÍTULO III**

### **MODELAMIENTO, SIMULACIÓN Y ESCANEEO**

#### **3.1 Introducción**

En la actualidad la utilización de hidrocódigos facilita la resolución numérica de problemas de gran complejidad, obteniendo simulaciones que ayudan a comprender fenómenos físicos y conllevan a una mejor interpretación de sus resultados.

Para obtener resultados óptimos y coherentes es necesario suministrar al programa computacional, modelos que contemplen información adherida a la realidad del ensayo a simularse, es por esto, que en este capítulo se definirá la geometría y tipo de mallado de cada uno de los elementos que intervinieron en las prácticas experimentales, así como las condiciones de borde y el detalle de armadura de refuerzo de las columnas, además, la información necesaria para calibrar los modelos constitutivos de los materiales y sus respectivas ecuaciones de estado. También se incluye un flujograma de funcionamiento del código que gobierna la simulación desarrollada.

Al final se tratará brevemente sobre los ensayos experimentales y el proceso llevado a cabo para el desarrollo del escaneo en tres dimensiones.

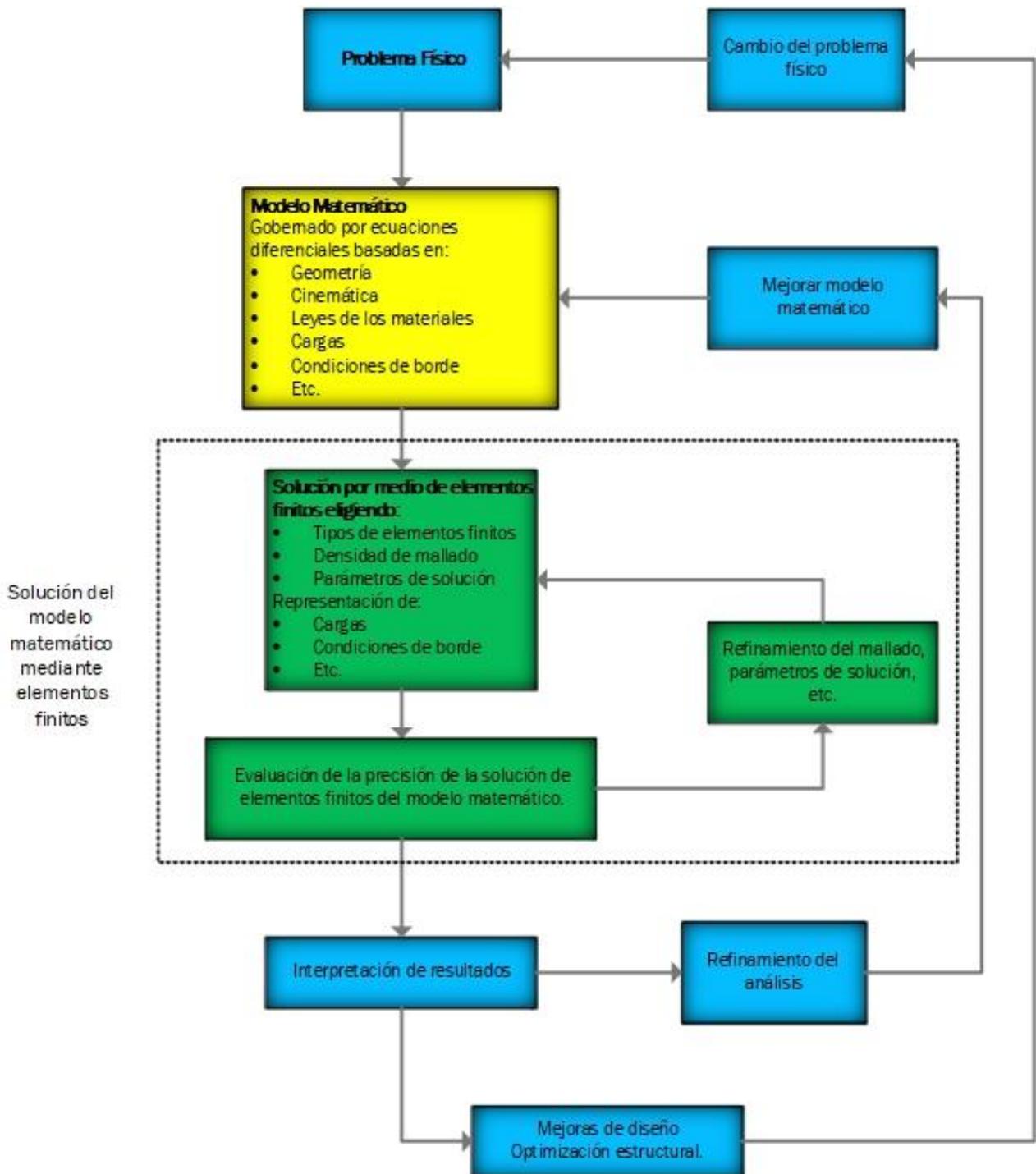
#### **3.2 Metodología de la investigación**

La metodología de investigación que se empleó es un estudio exploratorio - explicativo, ya que por medio de la exploración bibliográfica y en base a los resultados obtenidos mediante las simulaciones se obtuvieron resultados coherentes y acordes a la realidad del fenómeno descrito. La investigación bibliográfica sumada a los conocimientos sobre

el comportamiento de los materiales son el insumo principal para la modelación de los elementos estructuras bajo condiciones de cargas explosivas.

Partiendo de los modelos teóricos establecidos en investigaciones previas, se alcanzó la modelación de todos los elementos que intervienen en este estudio. Además, relacionando con la matemática discreta y otras ramas afines de la ciencia se pudo establecer simulación computacional confiable que simule el estado final de un elemento estructural tipo columna a escala real luego de ser sometido a la acción de la detonación.

Para el presente estudio se utilizó el método de elementos finitos que nos facilita resolver problemas físicos en el análisis de ingeniería y diseño. El problema físico típicamente involucra una estructura real o componente estructural sujeto a ciertas cargas. La idealización del problema físico a un modelo matemático requiere ciertas suposiciones que juntas conducen a ecuaciones diferenciales que gobiernan el modelo matemático el cual es resuelto por un análisis de elementos finitos. Dado que la técnica de solución de elementos finitos es un procedimiento numérico, es necesario evaluar la solución con exactitud (Bathe, 2006). Si no se cumplen los criterios de precisión, la solución numérica debe repetirse con parámetros de solución refinada hasta que se alcance la exactitud. Está claro que la solución de elementos finitos resolverá solo el modelo matemático seleccionado y que todas las suposiciones en este modelo se reflejarán en la respuesta predicha (Bathe, 2006). La Figura 25 resume el proceso de análisis de elementos finitos utilizado para este estudio.



**Figura 25.** Procedimiento para análisis con elementos finito  
 Fuente: (Bathe, 2006)

### **3.3 Modelo matemático del fenómeno físico**

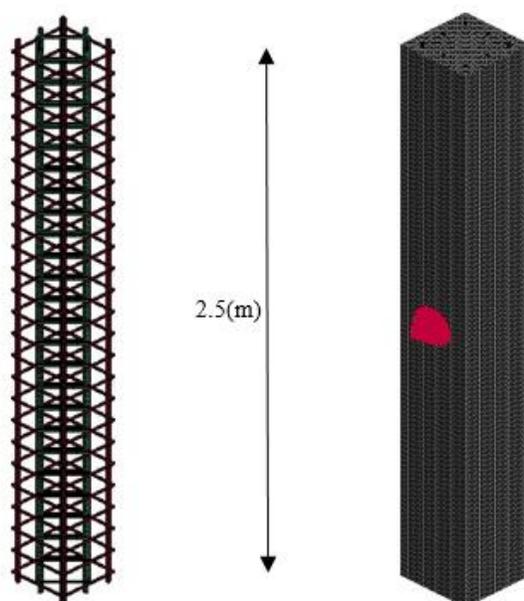
Los modelos computacionales desarrollados para este estudio se basaron en los ensayos experimentales desarrollados por Peralta & Sarango (2019), para la determinación de curvas de daño por impacto en columnas de hormigón armado. Mediante la utilización de elementos finitos se modeló dos columnas de hormigón armado, en las cuales se ensayó cargas axiales y cargas explosivas de pentolita.

En las siguientes secciones se describe con detalle la geometría de cada uno de los elementos modelados, el mallado utilizado para cada uno de ellos, sus condiciones de borde, los modelos constitutivos de los materiales y sus respectivas ecuaciones de estado.

#### **3.3.1 Descripción geométrica del modelo**

##### **3.3.1.1 Columnas de Hormigón armado**

En la Figura 26 se muestra las probetas modeladas con una altura de 2.5 metros y una sección de 0.3 x 0.3 metros. El diseño del acero de refuerzo se realizó con una cuantía del 1.5% (Mejia & Vazconez, 2017), considerando el refuerzo para esfuerzos a flexión, compresión y corte, por tanto el modelamiento del acero se ejecutó como se muestra en la Tabla 2.



**Figura 26.** Geometría de columnas de hormigón armado

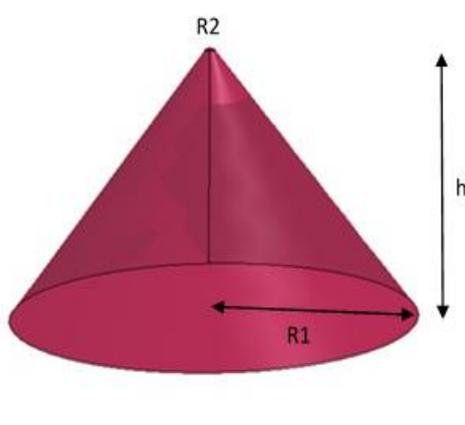
**Tabla 2**

*Detalle de armado de columnas*

Sección	f'c (MPa)	Armadura Longitudinal	Reforzamiento Transversal @ 10 cm	Gráfica
0.3 X 0.3	28.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 4ø16 mm</li> <li>● 4ø14 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 1 E1 ø10 mm</li> <li>● 1 E2 ø10 mm</li> </ul>	
0.3 X 0.3	43.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 4ø16 mm</li> <li>● 4ø14 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 1 E ø12 mm</li> <li>● 2 V ø12 mm</li> </ul>	

### 3.3.1.2 Cargas explosivas

Las cargas explosivas son de pentolita 50/50 y en todos los casos se consideró una geometría cónica como se muestra en la Figura 27, con diferentes medidas detalladas en la Tabla 3; esta geometría fue considerada por ser uno de los tipos de carga disponible en el Ejército Ecuatoriano, además de brindar los mejores efectos al contacto con las estructuras por producto de la onda explosiva. (Mejia & Vazconez, 2017).



**Figura 27.** Geometría descriptiva de conos de explosivo

**Tabla 3**

*Detalle de medidas de conos explosivos*

Carga conformada	Peso (gr)	R1 (m)	R2 (m)	h (m)
TIPO I	450	0.0600	0.002	0.0750
TIPO II	1140	0.0800	0.002	0.1000

### 3.3.2 Modelos constitutivos y ecuaciones de estado

#### 3.3.2.1 Hormigón

En la Tabla 4 se muestran las resistencias a la compresión diseñadas para las columnas, los valores obtenidos En los ensayos realizados por Peralta & Sarango (2019), una mayoración que se consideró debido a que la destrucción de las columnas se realizó en un tiempo superior a los 28 días en donde el hormigón debe alcanzar la resistencia para la cual fue diseñada y finalmente el valor adoptado para el modelamiento computacional.

**Tabla 4**

*Resistencia a la compresión del hormigón  $f'_c$*

Diseño (Kg/cm <sup>2</sup> )	Cilindros (Kg/cm <sup>2</sup> )	Mayoración 15% (Kg/cm <sup>2</sup> )	Modelamiento (MPa)
210	255.1	293.37	2.87X10 <sup>7</sup>
280	388.4	446.66	4.37X10 <sup>7</sup>

En la caracterización del hormigón se utilizó el modelo de material \*MAT\_RHT el cual ya incluye dentro de sus cálculos la ecuación de estado MIE GRUNEISEN y está diseñado para tratar efectos de daño a grandes velocidades en el hormigón provocadas por ondas de choque o impactos balísticos como se describe en la sección 2.3.11.3. Se realizó varias iteraciones en el modelado variando el valor del factor de erosión para verificar la cantidad de desfragmentación del hormigón como propone Luccioni et al. (2013). Los valores ingresados para el modelamiento están especificados en la Tabla 5

**Tabla 5***Datos de entrada para tarjeta RHT*

Sección	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> ) RO	f'c (MPa) FC	Factor de erosión EPSF
0.3X0.3	2160	28.7	0.1 - 0.01 - 0.007 - 0.004 - 0.001
0.3X0.3	2190	43.7	0.1 - 0.01 - 0.007 - 0.004 - 0.001

### 3.3.2.2 Acero

Las características del acero A60 fueron modeladas utilizando el material \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY y sus valores se detallan en la Tabla 6, además para la ecuación de estado EOS\_GRUNEISEN se utilizaron valores establecidos por (Scapin, 2013).

**Tabla 6***Datos de entrada para caracterización del acero de refuerzo*

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad (RO)	7850	Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young (E)	2.1e11	Pa
Módulo de Poisson (PR)	0.3	
Esfuerzo de fluencia fy (SIGY)	4.2e8	Pa
Módulo tangente	2.373e9	Pa
C	4570	m/seg
S1	1.49	-
GAMAO	2.17	-
A	0.46	-

### 3.3.2.3 Explosivo

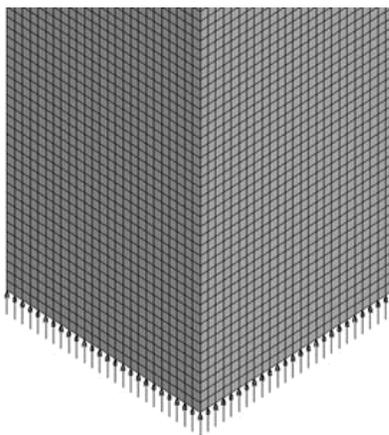
Al ser el explosivo una carga de forma cónica en contacto con la estructura utilizamos el material \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN para simular el proceso de combustión del explosivo, además \*EOS\_JWL para relacionar la presión con el volumen en el fenómeno y describir la expansión de la detonación. Los valores definidos en la Tabla 7 fueron caracterizados por (Dobratz & Crawford, 1985).

**Tabla 7***Caracterización de la Pentolita 50/50*

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad (RO)	1700	Kg/m <sup>3</sup>
Velocidad de detonación (D)	7530	m/seg
Presión Chapman-Jouget (PCJ)	2.55e10	Pa
A	5.409e11	Pa
B	9.373e11	Pa
R1	4.5	-
R2	1.1	-
OMEGA	0.35	-
Energía inicial (E0)	8.1e9	Pa

### 3.3.3 Carga axial

Las columnas fueron también sometidas a una carga axial inicial en el eje Z mediante DEFINE\_CURVE, donde se especifica una curva de carga apropiada para el diseño de cada una de las columnas descritas en la Tabla 8. Esta carga fue distribuida en cada uno de los nodos de la base de la columna tal como muestra la Figura 28.



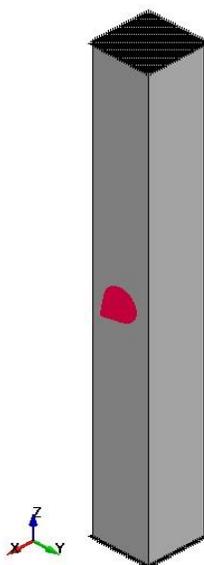
**Figura 28.** Distribución de carga axial en los nodos

**Tabla 8***Carga axial para sección de columna*

Sección (m)	f'c (Mpa)	Tipo de carga explosiva	Carga axial (Ton)	Carga axial (Newtons)
0.3 x 0.3	28.7	01 TIPO II	40	392000
0.3 x 0.3	43.7	01 TIPO I 01 TIPO II	40	392000

**3.3.4 Condiciones de borde**

En el sistema de coordenadas planteado en la Figura 29, las columnas de hormigón armado fueron simuladas colocando un empotramiento perfecto en la parte superior y con tres grados de libertad en la parte inferior, momentos en X y Y, además permitiendo el desplazamiento en Z como se detalla en la Tabla 9:

**Figura 29.** Orientación del sistema de coordenadas para columnas.

**Tabla 9***Grados de libertad de la cabeza y pie de columna.*

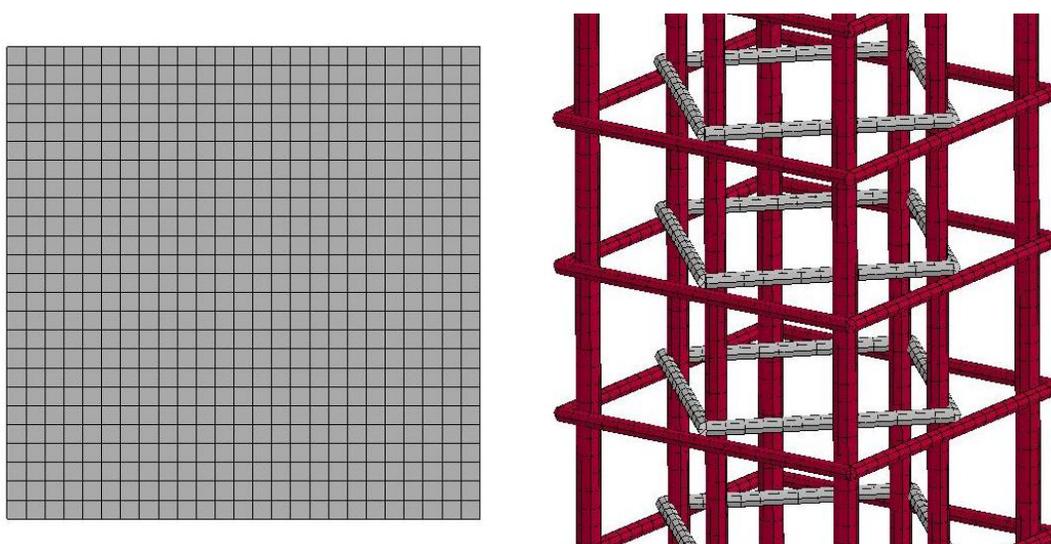
	<b>DX</b>	<b>DY</b>	<b>DZ</b>	<b>MX</b>	<b>MY</b>	<b>MZ</b>
NUDO SUPERIOR	1	1	1	1	1	1
NUDO INFERIOR	1	1	0	0	0	1

### **3.4 Solución mediante elementos finitos**

#### **3.4.1 Mallado**

##### **3.4.1.1 Columnas de hormigón armado**

Para el estudio del problema se generó un modelo de FEM en el cual se utilizaron elementos sólidos (HEX-8) de ocho nodos para el hormigón y elementos tipo viga para los refuerzos de acero longitudinales como transversales. En ambos casos el mallado fue modelado con una dimensión de 12 mm. (Castanera, 2015) como se muestra en la Figura 30 por tanto el número de elementos se detalla en la Tabla 10. La formulación de sólidos de esfuerzo constante fue utilizada para el hormigón, la integración de sección transversal de Hughes – Liu para elementos tipo viga.



**Figura 30.** Mallado de 12 mm para elementos sólidos y tipo viga

**Tabla 10**

*Número de elementos de columnas de hormigón armado*

Sección (m)	f'c (Mpa)	Número de elementos sólidos	Número de elementos tipo viga	Total de elementos
0.3 x 0.3	28.7	130000	4864	134864
0.3 x 0.3	43.7	130000	5114	135114

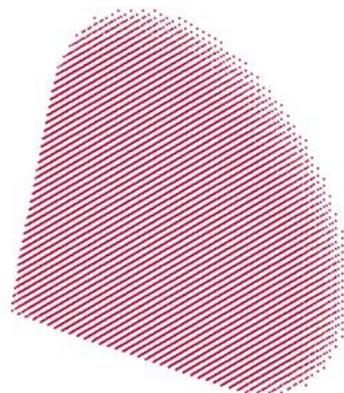
Para evitar la deformación excesiva de los elementos finitos se emplea el control de HOURGLASS utilizando la forma viscosa con integración exacta para elementos sólidos de Flanagan-Belytschko, ya que esta presenta una mejor integración para volúmenes con deformación en altas velocidades como se hace referencia en el apartado 2.3.7.

Además, para asegurar la correcta unión de los elementos tipo viga que forman los refuerzos transversales de acero se realiza una fusión de los nudos duplicados (Merge Dup Nodes), constituyéndose de esta manera en elementos completos.

#### **3.4.1.2 Cargas explosivas**

La simulación del explosivo fue tratada con partículas SPH debido a que el fenómeno envuelve grandes deformaciones, falla de los materiales y fragmentación (Xu, 2013), además que la onda de choque es un fluido que interactúa con una estructura por tanto se deben buscar las características óptimas para su modelización. Los valores por defecto fueron utilizados para la tarjeta de sección SPH.

Las partículas SPH de las cargas explosivas en forma cónica se observan en la Figura 31, estas fueron definidas con una densidad de  $1700 \text{ kg/m}^3$  y un número de partículas como se detalla en la Tabla 11.



**Figura 31.** Cono formado con partícula SPH

**Tabla 11***Número de nodos por tipo de cono*

Carga conformada	Densidad	PitX	PitY	PitZ	Número de nodos
TIPO I	1700	50	50	50	33828
TIPO II	1700	50	50	50	33604

### 3.4.2 Método para incluir las varillas de acero en el hormigón armado

En vista de que el mallado del refuerzo es independiente del mallado del hormigón, es necesario la utilización de un método de restricción para permitir que estos dos materiales trabajen monolíticamente. El keyword `*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID` (CLIS) nos brinda la capacidad de acoplar la transferencia de velocidades y aceleraciones en los nodos colocando el tipo de acoplamiento `CTYPE=2` y predefiniendo `SET PART ID's` para el refuerzo y para el hormigón. El reforzamiento de acero debe ser considerado como esclavo (SLAVE) y el hormigón como maestro (MASTER) (Schwer L. , 2014).

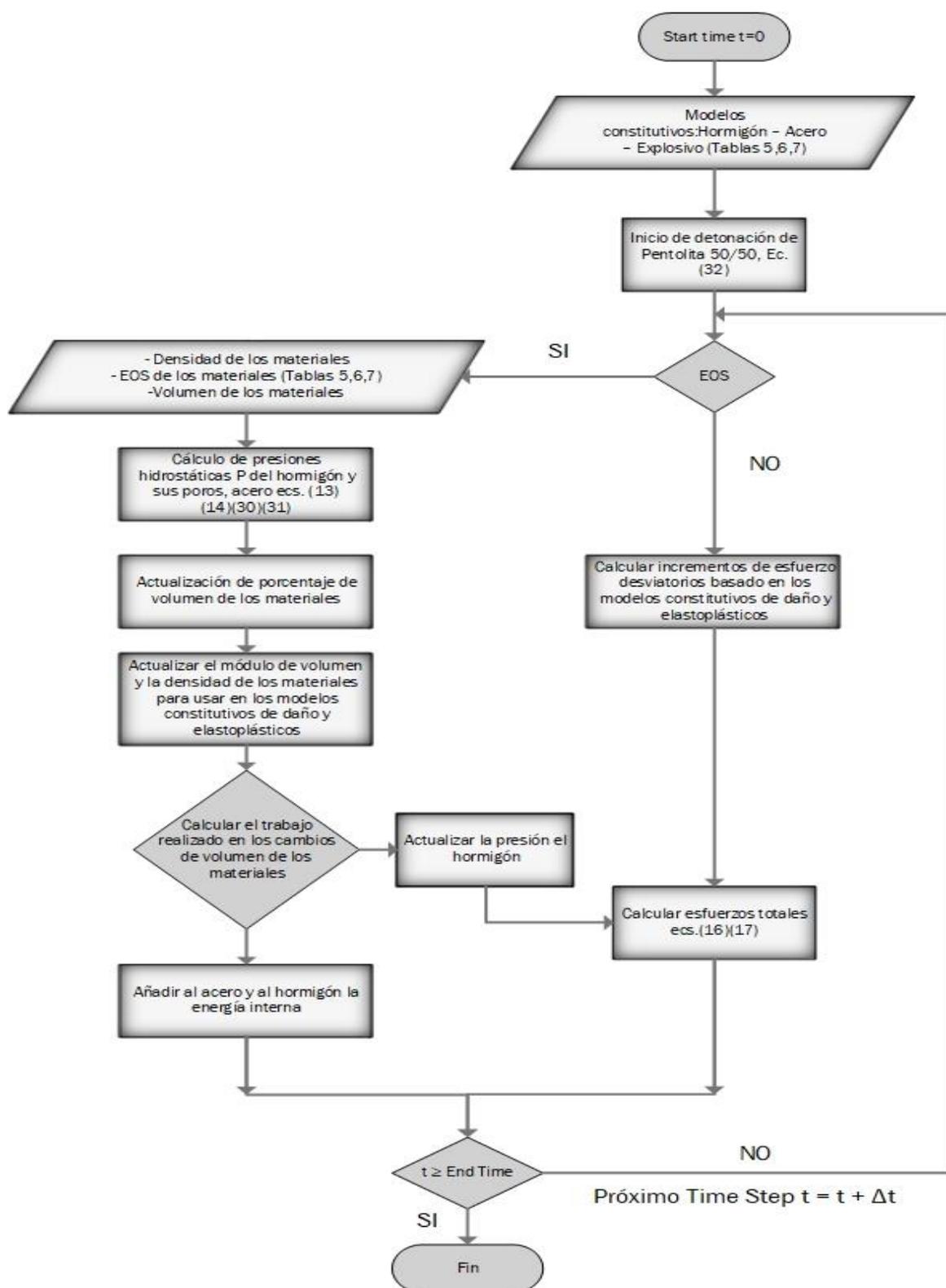
### 3.4.3 Contactos entre partículas SPH y solidos

El contacto entre las partículas SPH y la estructura se construyeron mediante el algoritmo `*CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE` considerando como esclavo (SLAVE) al explosivo y el hormigón como maestro (MASTER). Se utilizó este tipo de contacto ya que los elementos sólidos que participan en la definición están sujetos a erosión (eliminación de elementos) debido a criterios de falla del material. Según (Livermore Software Technology Corporation y Dyna More, 2019) estos contactos de erosión contienen una lógica que permite actualizar la superficie de contacto a medida que se eliminan los elementos exteriores.

#### **3.4.4 Algoritmo de solución. Problema con elementos finitos**

En la Figura 32 se detalla la secuencia en la que desarrolla el algoritmo de solución de los modelos contemplados para este estudio. Este proceso se efectúa en un paso de tiempo para cada ciclo de ejecución, es decir, se genera un bucle con todos sus cálculos en un tiempo determinado para cada uno de ellos. El modelo está inicialmente sometido a una carga axial que simula el peso que resiste un elemento estructural tipo columna, secuencialmente se realiza la caracterización de los materiales de los modelos constitutivos en base a las Tablas (5) - (7); y el cambio de volumen en un paso de tiempo se calcula para cada elemento de los materiales que intervienen en el modelo después de detonar la pentolita utilizando la ecuación (32).

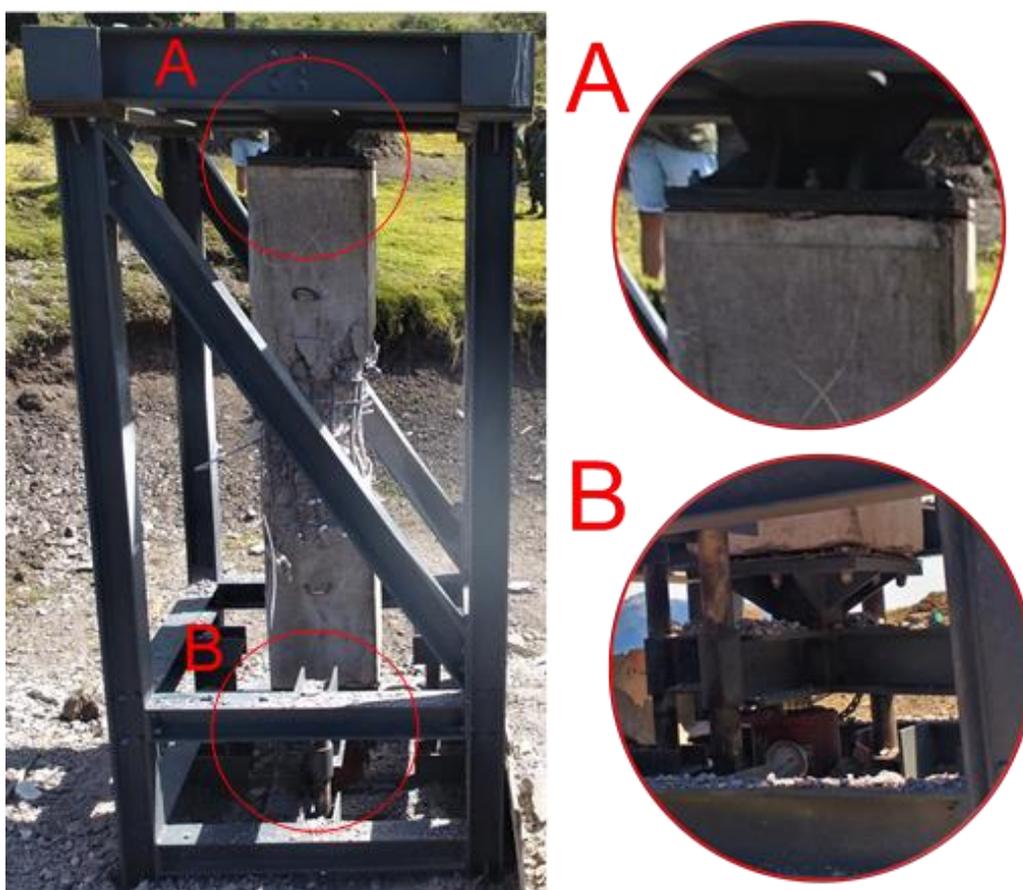
El módulo de volumen de los materiales se actualiza para ser utilizado en los cálculos subsiguientes de tensión y deformación. Durante cada paso de tiempo, la energía de deformación desviadora actualiza el trabajo mecánico realizado por la presión hidrostática. De cada ciclo se agrega la energía interna generada al hormigón y al acero, para ser considerada en el siguiente bucle. Si se ha alcanzado el tiempo de terminación del proceso se da por terminado el cálculo, de no ser así, se aumenta al tiempo de corrida existente un paso de tiempo.



**Figura 32.** Flujograma del algoritmo de solución del problema

### 3.5 Escaneo en tres dimensiones

Los ensayos experimentales fueron realizados en columnas de hormigón armado a escala real utilizando la maquina diseñada especialmente para este tipo de ensayos mostrada en la Figura 33 (Mejia & Vazconez, 2017). La máquina intenta recrear el empotramiento superior de la columna mediante una placa de acero empernada a la estructura y a su vez soldada a ganchos embebidos en el hormigón como se muestra en la Figura 34. En la parte inferior de la columna la placa de acero es empujada por un sistema hidráulico de 100 Ton para simular la carga axial producida por el peso de una estructura.



**Figura 33.** Condiciones de borde en la máquina.



**Figura 34.** Empotramiento de placa en columnas de hormigón  
Fuente: (Peralta & Sarango, 2019)

Posterior a la demolición de las columnas se realizó el escaneo digital en tres dimensiones de las columnas de hormigón armado mediante Go!Scan 3D G1 de Creaform cuyas características se precisan en la Tabla 12 y se muestra en la Figura 35 y Figura 36. Este nos brinda dentro de sus capacidades la posibilidad de realizar ingeniería inversa una vez realizado el escaneo. El escáner tiene una precisión de hasta 0.1 mm y una resolución de 0.5 mm, lo cual nos da una importante precisión en la toma de datos.

## Tabla 12

### *Especificaciones técnicas de Escáner Go!Scan 3D G1*

Característica	Valor	Unidades
Peso	1.1	Kg
Dimensiones	127 x 156 x 262	mm
Velocidad de medición	550000	mediciones/s
Tipo de laser	Luz blanca (LED)	-
Resolución	0.5	mm
Precisión	Hasta 0.1	mm

Fuente: (CREAFORM, 2019)



**Figura 35.** Escáner Go!Scan 3D G1



**Figura 36.** Placa de modelo escáner Go!Scan 3D G1

Para obtener la mayor precisión posible es necesario la colocación de Check points como se ve en la Figura 37. Se deben formar triángulos imaginarios que no estén sus vértices separados más allá de 10 cm entre ellos.



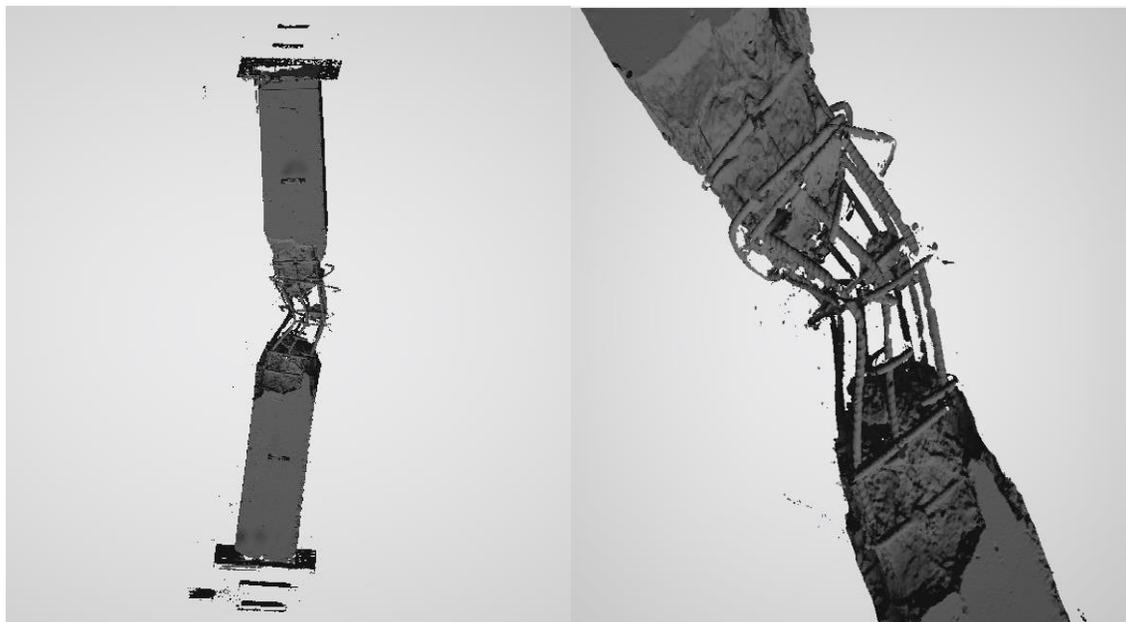
**Figura 37.** Puntos de control para escaneo.

El proceso de escaneado se lo realiza apuntando el láser proyectado hacia la columna y verificando que todos los puntos de control vayan siendo detectados por el escáner. En la Figura 38 se muestra cómo se realizó el proceso de escaneo en 3D de la columna.



**Figura 38.** Proceso de escaneo en 3D

En la Figura 39 se muestra el resultado de realizar el escaneo en 3D, las unidades en las que se obtiene el modelo digital son en milímetros.



**Figura 39.** Imágenes de escaneo digital en 3D

### 3.6 Resumen

En esta sección se describió cada una de las características con que se construyeron los modelos computacionales mediante la utilización del hidrocódigo de LS-DYNA. Cada uno de los tipos de elemento finito, modelos constitutivos, ecuaciones de estado, condiciones de borde y contactos son los encargados de caracterizar los materiales, su interacción, el comportamiento mecánico que describe el elemento estructural y una simulación visual del fenómeno físico.

Cabe también mencionar que el escaneo en tres dimensiones realizado a las columnas de hormigón armado, constituye en un insumo importante para la posterior validación de los modelos computacionales realizados. Esta validación será abordada en el capítulo

siguiente, tomando como medidas de referencia la deformación de las varillas de refuerzo longitudinal y el volumen de fragmentación de las columnas; también se analizará el comportamiento de los diferentes elementos de los modelos computacionales.

## **CAPÍTULO IV**

### **POST – PROCESAMIENTO DE MODELOS**

#### **4.1 Introducción**

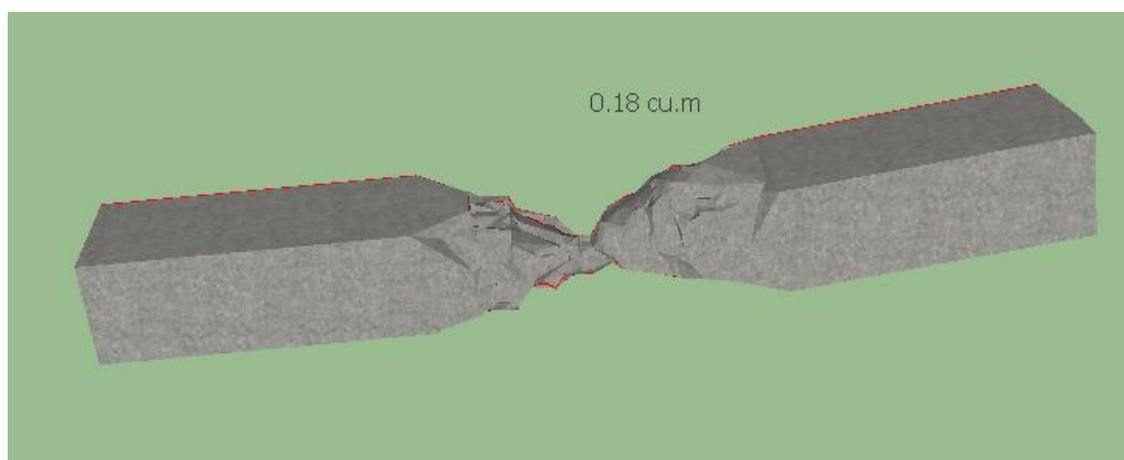
Las simulaciones computacionales entregan información sobre el comportamiento de los materiales que forman parte del elemento estructural, es por esto, que es necesario validar la calibración que se impuso a cada una de las tarjetas necesarias para el modelamiento de las columnas de hormigón armado sometidas a cargas explosivas. En los temas subsiguientes se evidenciará esta validación, la cual se realizó por medio de la comparación entre las simulaciones computacionales realizadas en LS-DYNA y los escaneos en tres dimensiones, utilizando como parámetros de cotejo el volumen de fragmentación y las deformaciones en las varillas de refuerzo longitudinal de las columnas.

En este capítulo se valida los modelos simulados, se analiza el comportamiento ante cargas explosivas del hormigón y del acero, así como los efectos causados por la onda de choque, sus efectos y presiones de incidencia correspondientes a cada tipo de explosivo. Además, se estudia los valores óptimos de erosión para generar una simulación con mejores características.

## 4.2 Procesamiento de archivos escaneados

### 4.2.1 Volumen de fragmentación

Para realizar la medición del volumen de fragmentación de las columnas escaneadas se hizo la reducción del número de vértices que forman los modelos en tres dimensiones a través del software libre Blender (Blender, 2019), posteriormente se cerraron los huecos existentes para constituir un modelo sólido. En la Figura 40 se muestra cómo queda terminado uno de los escaneos del cual se obtiene el volumen empleando un software para CAD en 3D.



**Figura 40.** Sólido en 3D de columna escaneada

El volumen de fragmentación lo constituye la diferencia entre el volumen inicial de cada una de las columnas y el volumen obtenido después del proceso computacional al que se sometieron los escaneos como se muestra en la Tabla 13.

**Tabla 13**  
*Volumen y relación de fragmentación*

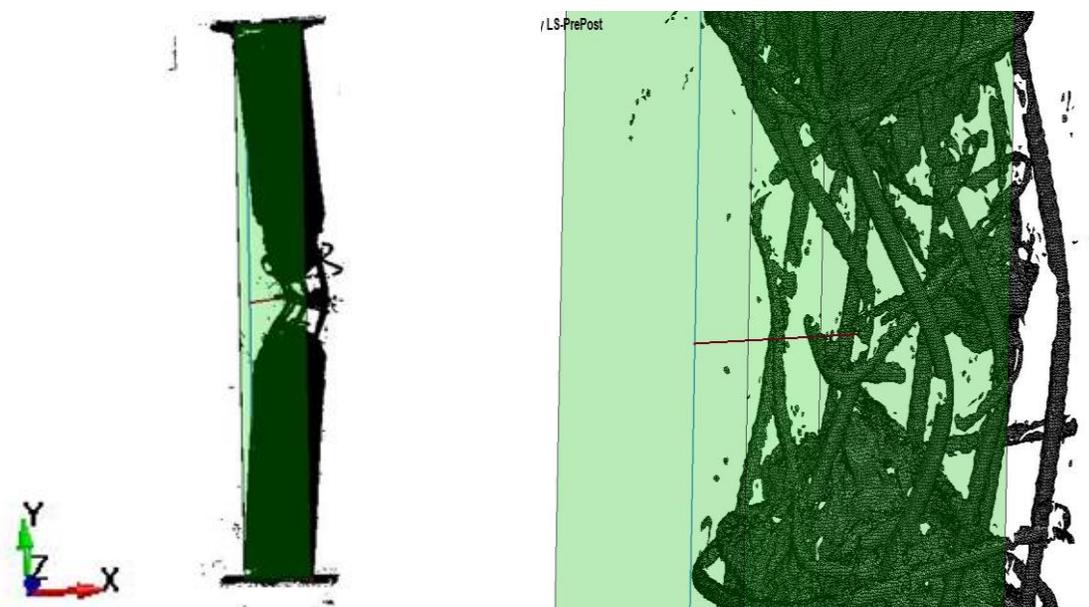
Sección (m)	f'c (Mpa)	Volumen inicial de la columna (m <sup>3</sup> )	Volumen columna detonada (m <sup>3</sup> )	Volumen de fragmentación (m <sup>3</sup> )	Relación de fragmentación
0.3 x 0.3	28.7	0.225	0.177796	0.047204	0.209
0.3 x 0.3	43.7	0.225	0.179867	0.045133	0.201

La relación de fragmentación es el resultado de dividir el volumen fragmentado y el volumen inicial de la columna antes de la detonación. Estos valores serán posteriormente comparados con la fracción de erosión generada del volumen de hormigón que ha fallado en cada uno de los modelos computacionales de LS-DYNA.

#### 4.2.2 Deformaciones

Aprovechando las herramientas geométricas para diseño y medición que dispone el LS-PREPOST y su capacidad de trabajar con archivos de tipo .stl generados en el escaneo en tres dimensiones, este software fue utilizado para el post procesamiento. Se obtuvieron modelos constituidos por elementos finitos tipo Shell y la unidad de medida del escaneo se encuentra en milímetros.

Las deformaciones en todos los casos se midieron en la varilla central del refuerzo longitudinal de la columna expuesta directamente al explosivo. Para obtener estas medidas se trazó ejes referenciales de la posición inicial de la columna y sus respectivas varillas de refuerzo longitudinal para luego obtener los desplazamientos resultantes como se muestra en la Figura 41.



**Figura 41.** Desplazamiento de varilla longitudinal central.

En la Tabla 14 se muestra los desplazamientos en cada uno de los ejes coordenados, además, se calcula la resultante de los mismos para ser tomados como referencia en la validación de los modelos computacionales.

**Tabla 14**

*Desplazamientos de varilla central del refuerzo longitudinal*

Sección (m)	f'c (Mpa)	Desplazamientos (mm)			
		X	Y	Z	Resultante
0.3 x 0.3	28.7	109.68	9.86	41.62	117.73
0.3 x 0.3	43.7	169.78	14.05	16.88	171.19

### 4.3 Validación de simulaciones computacionales

La validación de los modelos computacionales se realizó verificando la fracción de erosión y la deformación del refuerzo longitudinal central de dichos modelos, en comparación con la relación de fragmentación y la deformación del refuerzo longitudinal central de las columnas obtenidas a través del procesamiento de datos de los escaneos en tres dimensiones.

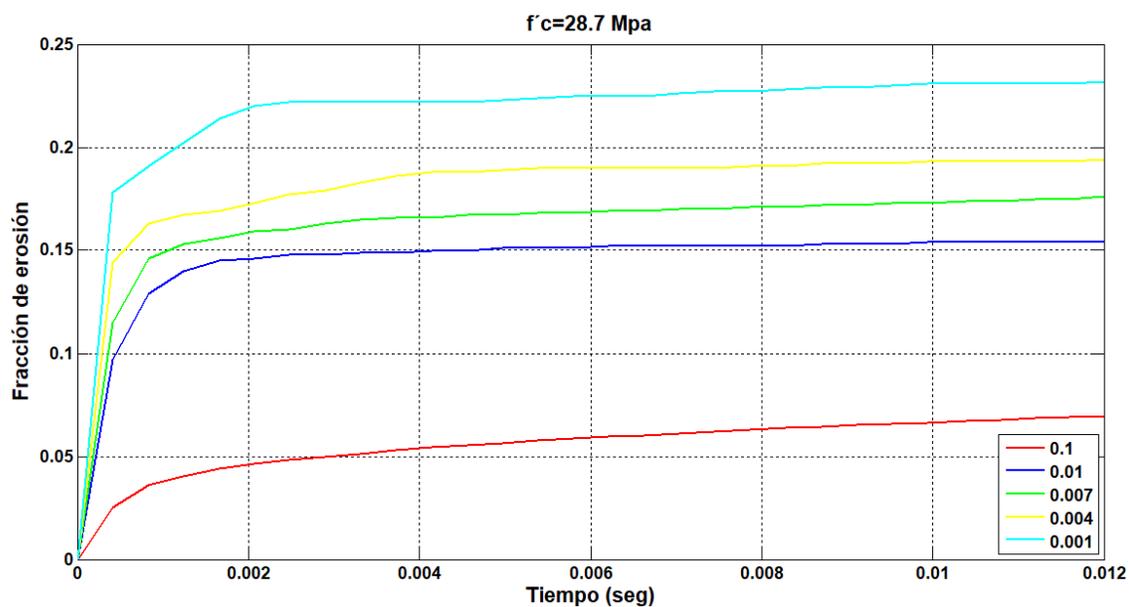
En la Tabla 15 se muestra la distancia de deformación y el tiempo en que las simulaciones computacionales alcanzan los valores obtenidos en el procesamiento de los escaneos ya descritos en la Tabla 14.

**Tabla 15**

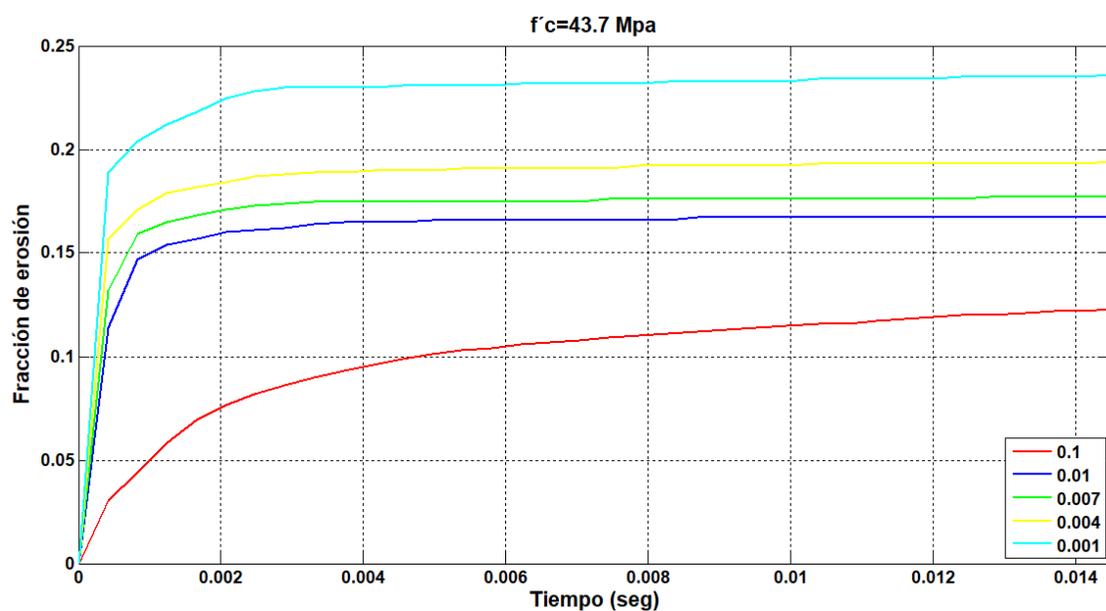
*Simulaciones computacionales (desplazamientos y tiempos)*

Sección (m)	f'c (Mpa)	Deformación (mm)	Tiempo (seg)
0.3 x 0.3	28.7	115.9618	0.01200885
0.3 x 0.3	43.7	170.4092	0.01449348

Para obtener el volumen de fragmentación acorde al generado en los ensayos experimentales, se efectuó simulaciones de modelos en los cuales se modificó el valor del factor de erosión por deformación plástica. En la Figura 42 y Figura 43 se evidencia el desarrollo del valor de la fracción de erosión para  $f'c=28.7$  MPa y  $f'c=43.7$  MPa y un mallado de 12 mm.



**Figura 42.** Volumen de fragmentación para diferentes valores de erosión  
 $f'c=28.7$  MPa



**Figura 43.** Volumen de fragmentación para diferentes valores de erosión  
 $f'c=43.7$  MPa

La erosión por deformación plástica adoptada para ambos modelos computacionales fue de 0.004, debido al bajo error que presentan al ser comparados con la relación de fragmentación descrita anteriormente en la Tabla 13.

A continuación se realiza el cálculo de error entre las mediciones de volumen, tomando como valores de fracción de erosión los obtenidos en la Figura 42 y Figura 43 en sus respectivos tiempos anotados en la Tabla 15. La ec. (43) muestra el método de cálculo del porcentaje de error:

$$E\% = \frac{|Relación\ de\ fragmentación - Fracción\ de\ erosión|}{Relación\ de\ fragmentación} * 100 \quad (43)$$

En la Tabla 16 se muestra de manera comparativa los respectivos valores del volumen de fragmentación y los resultados del error porcentual para cada una de las columnas estudiadas.

**Tabla 16**

*Porcentaje de error en medidas de volumen de fragmentación*

Sección (m)	f'c (Mpa)	Relación de fragmentación	Fracción de erosión	E%
0.3 x 0.3	28.7	0.209	0.1935219	7.406
0.3 x 0.3	43.7	0.201	0.1935150	3.724

En la ec. (44) se muestra el método de cálculo del porcentaje de error de los desplazamientos del refuerzo longitudinal central de las columnas basados en la Tabla 14 y Tabla 15:

$$E\% = \frac{|Def.\ escaneo - Def.\ simulación|}{Def.\ escaneo} * 100 \quad (44)$$

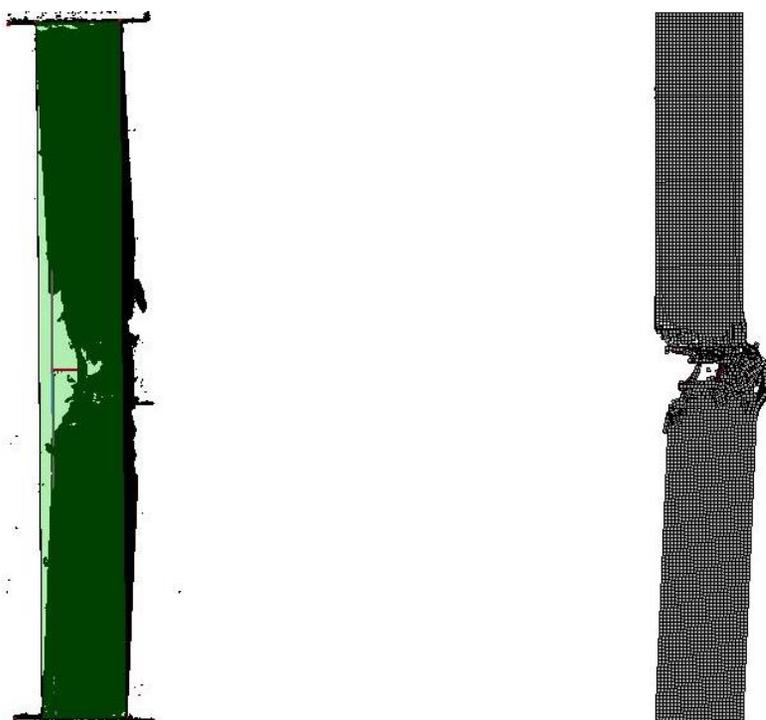
Los resultados del cálculo de error para las deformaciones del refuerzo longitudinal central se muestran en la Tabla 17.

**Tabla 17**

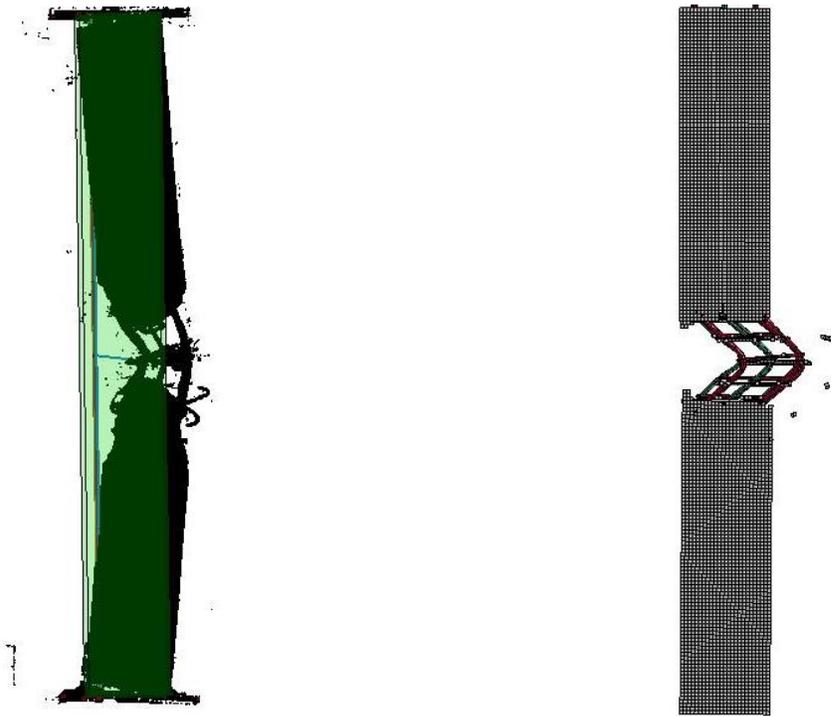
*Porcentaje de error en medidas de deformación*

Sección (m)	f'c (Mpa)	Def. Escaneo (mm)	Def. Simulación (mm)	E%
0.3 x 0.3	28.7	117.73	115.9618	1.502
0.3 x 0.3	43.7	171.19	170.4092	0.456

En la Figura 44 y Figura 45 se muestra la columna escaneada versus la columna modelada con la misma medida de deformación en la varilla longitudinal central y el tiempo que se detalló anteriormente en la Tabla 15.



**Figura 44.** Escaneo – Simulación Col 0.3x0.3 (m), f'c=28.7 MPa



**Figura 45.** Escaneo – Simulación Col 0.3x0.3 (m),  $f'_c=43.7$  MPa

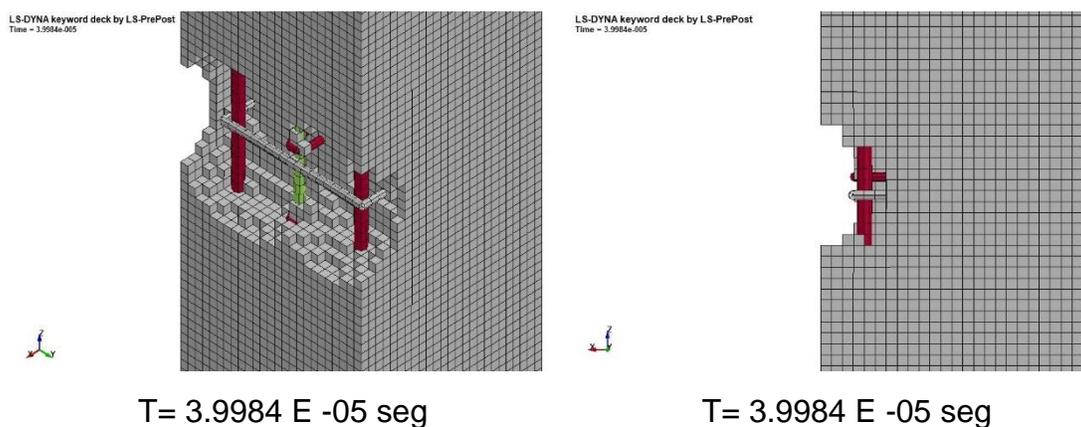
#### 4.4 Comportamiento de materiales

Los materiales que conforman el hormigón armado presentan diferentes formas de comportamiento mecánico al ser expuesto a cargas dinámicas, esto se debe a que la inercia propia de la masa de los materiales crea efectos de aceleración y velocidades de deformación.

Por otra parte, el material explosivo al estar en contacto directo con la estructura complica la medición de presiones por medio de sensores, por lo que las presiones de incidencia de la onda de choque se la analizan de forma numérica mediante los resultados de procesamiento de LS-DYNA, como se explicará posteriormente.

#### 4.4.1 Hormigón bajo cargas dinámicas

Las cargas hidrostáticas de compresión a las que el explosivo somete al hormigón, causan un incremento de su deformación plástica (Aráoz, 2012). La compactación del material en el área en contacto con el explosivo es tal, que el daño no se puede disminuir en un entorno cerrado produciendo una rigidización irreversible e incremento de módulo elástico (Burlion, Gatuingt, Pijaudier - Cabot, & Daudeville, 2000). El módulo de corte a su vez se puede asumir como cero al estar el material sometido a una muy alta presión, además, no existe un desarrollo elastoplástico (Meyers, 1994). El colapso de los micro - vacíos existentes y el avance creciente de microgrietas hace que el hormigón falle en las áreas cercanas a la detonación (JianGuo, HaiFeng, & Lin, 2008). A continuación, en la Figura 46, se observa el daño inmediato en el hormigón provocado en la cara en que se encuentra en contacto con el explosivo simulado mediante LS-DYNA.

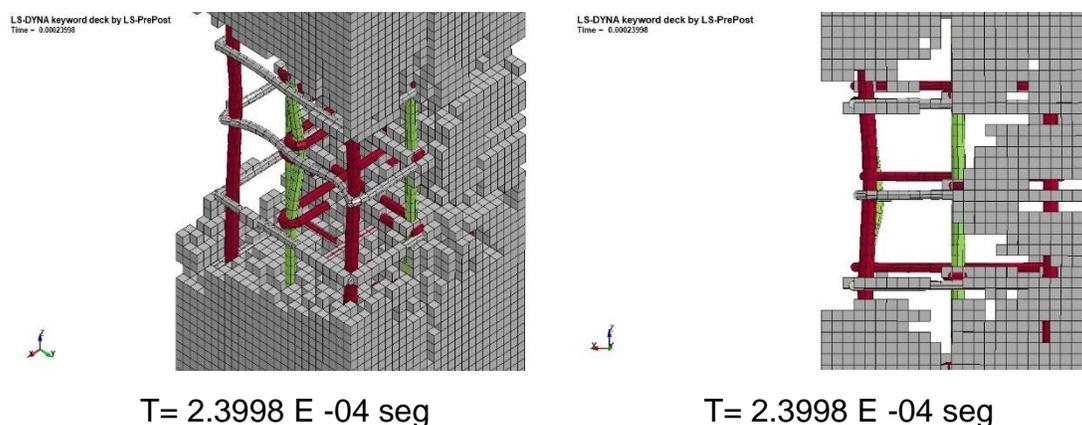


**Figura 46.** Efecto del explosivo en el hormigón en la cara de contacto

Los sectores que se encuentran más alejados del área de contacto experimentan esfuerzos de compresión triaxiales moderados, además de experimentar el efecto de

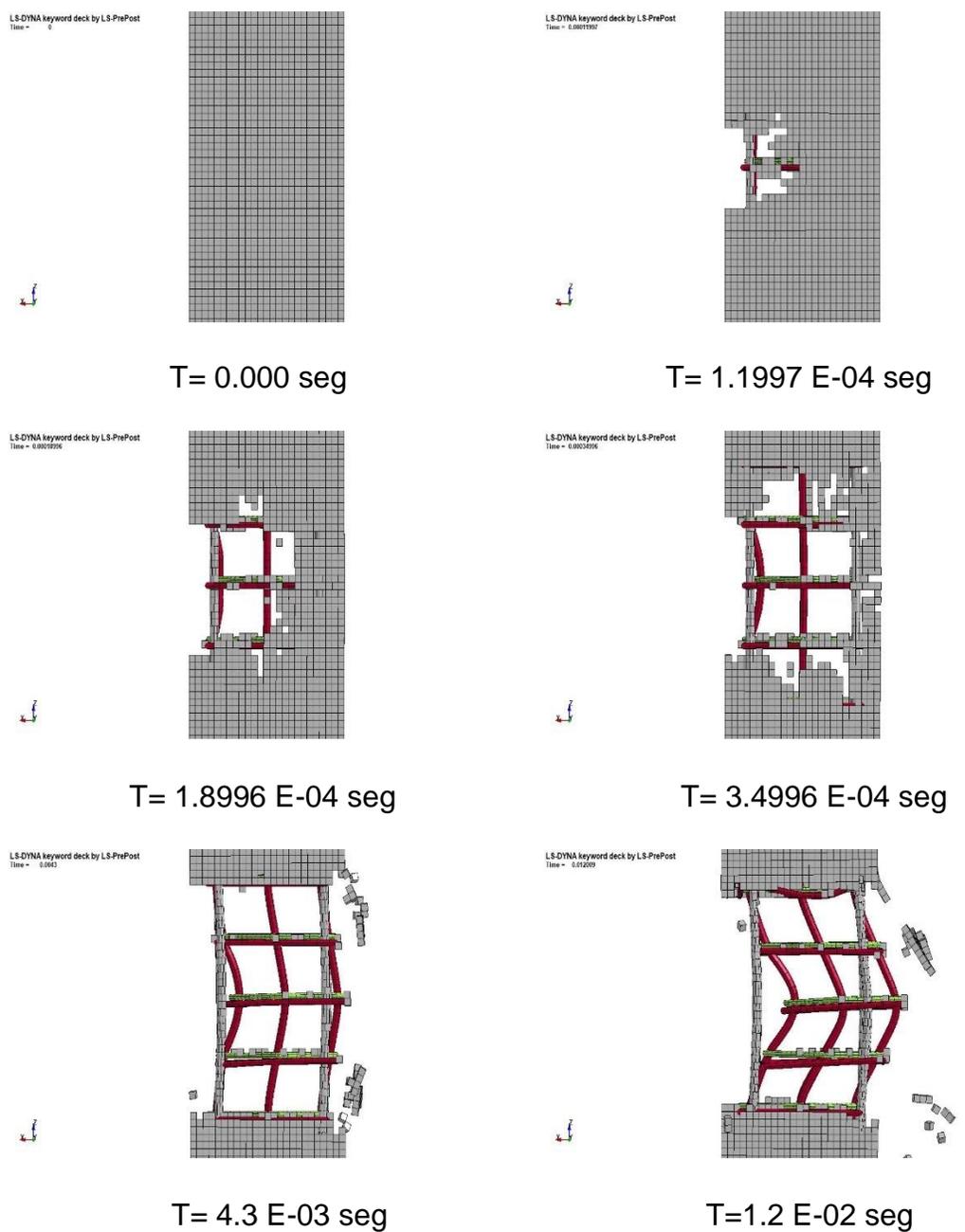
ondas de tracción que en conjunto provocan la fragmentación del material (Burlion, Gatuingt, Pijaudier - Cabot, & Daudeville, 2000).

Bajo cargas de impacto a alta velocidad, debido al efecto de Poisson, el espécimen sufre inevitablemente una deformación lateral. Esta da como resultado una fuerza de inercia hacia atrás como un confinamiento para limitar la deformación en el elemento estructural (Cui, Hao, & Shi, 2017). Esta gran deformación del material en un periodo reducido de tiempo provoca la rigidización del hormigón en las zonas un tanto más alejadas de la detonación como se muestra en la Figura 47 .

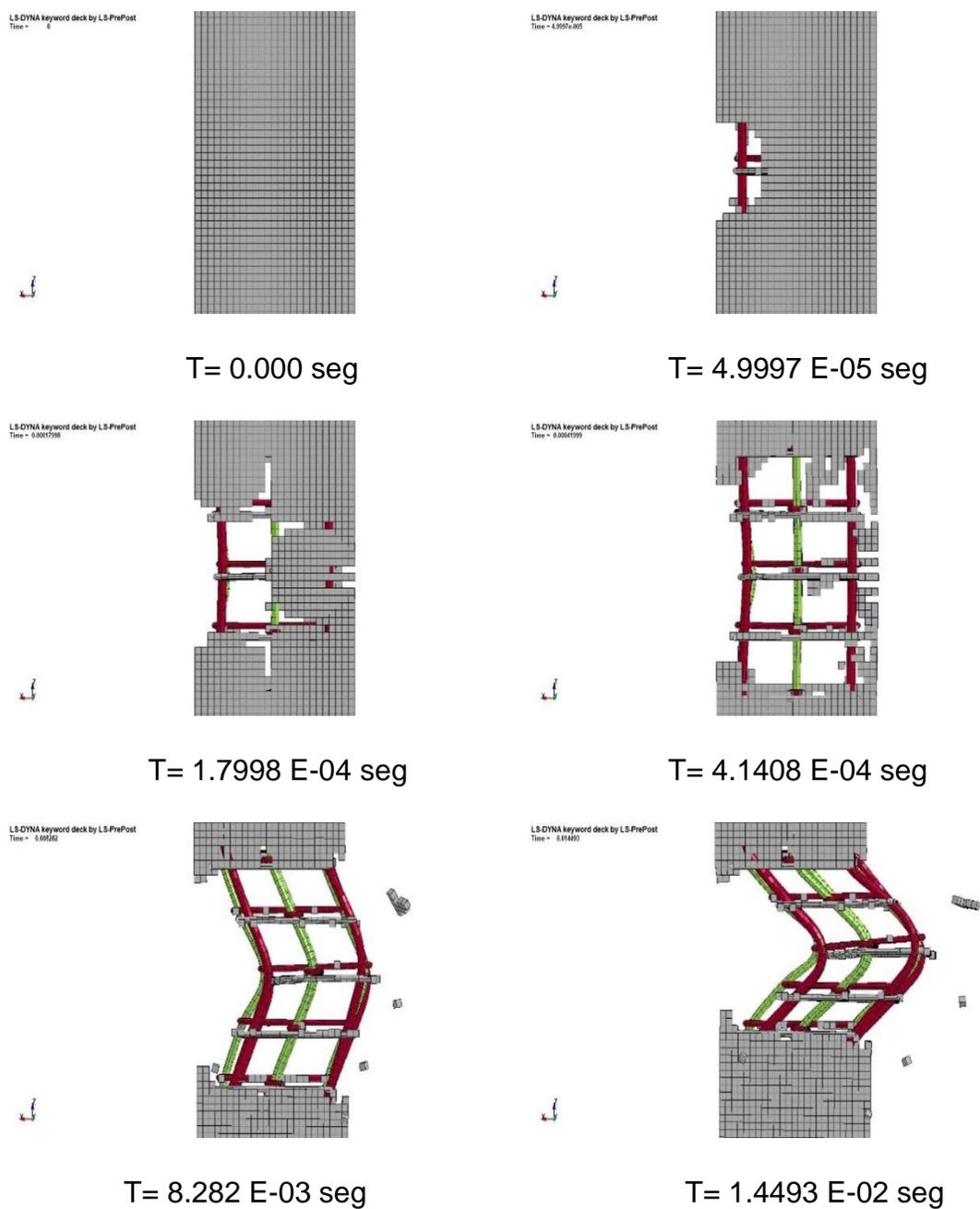


**Figura 47.** Daño en el hormigón en zona más alejada a la detonación.

A continuación, en la Figura 49 y Figura 49 se muestra la secuencia de daño del hormigón por efecto de la onda explosiva generado tras la simulación computacional en LS-DYNA, verificando la falla de la columna inicialmente con el efecto brisance, la reducción de poros, rigidización y fractura en la parte media de la sección producto de la inercia del material y el efecto spalling en la cara posterior, todo esto en un periodo extremadamente corto de tiempo.

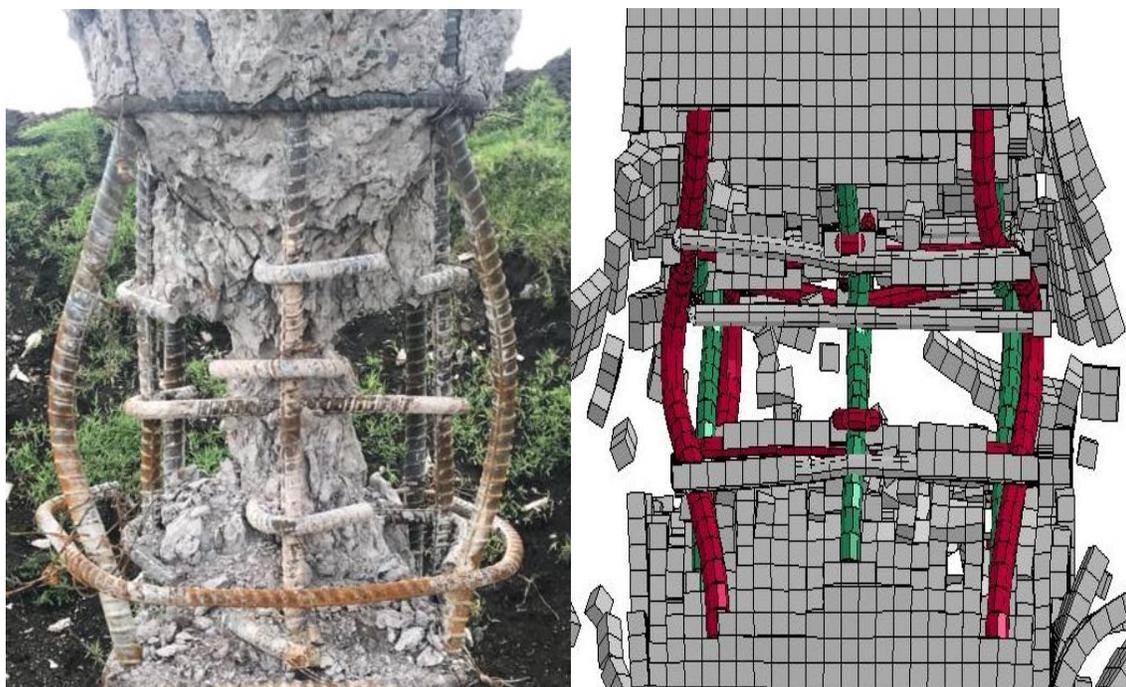


**Figura 48.** Desarrollo del daño de la columna,  $f'_c=28.7$  MPa



**Figura 49.** Desarrollo del daño de la columna,  $f'_c=43.7$  MPa

En la Figura 50 se observa una comparación entre una fotografía de los ensayos experimentales realizados y la simulación computacional en el mismo estado de deformación.



**Figura 50.** Deformación frontal, Col 0.3x0.3 (m),  $f'_c=43.7$  MPa  
Fuente: Foto de columna (Peralta & Sarango, 2019)

Finalmente, en la Tabla 18 se detalla el peso de explosivo necesario para obtener el volumen de fragmentación alcanzado en las simulaciones y el porcentaje de daño que sufrió la columna con respecto a su volumen total de hormigón.

**Tabla 18**  
*Porcentaje de daño de columnas de hormigón*

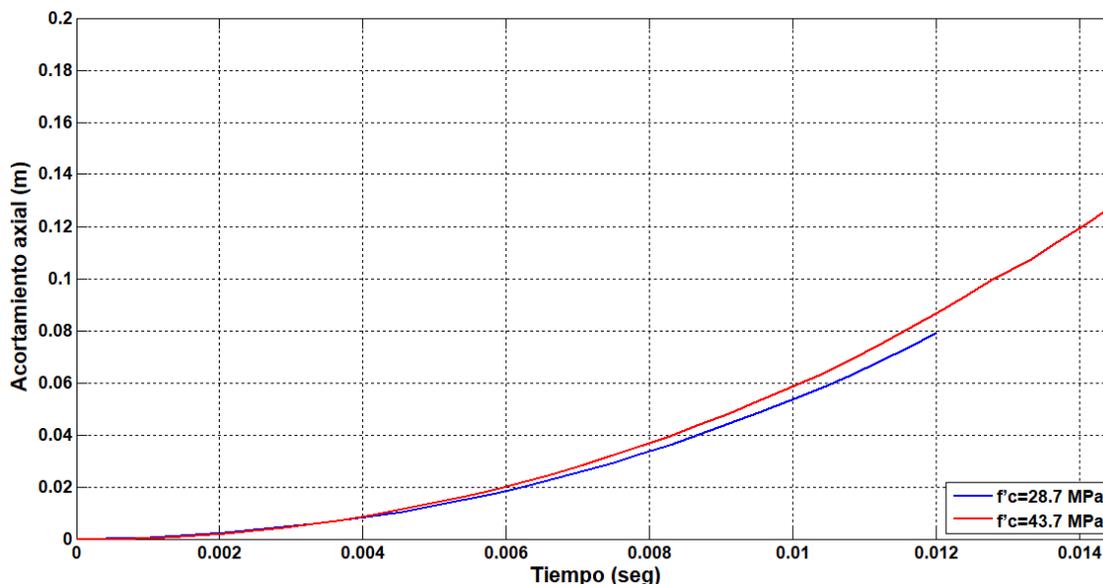
Sección (m)	$f'_c$ (Mpa)	Pentolita (gr)	Volumen de fragmentación ( $m^3$ )	% Daño
0.3 x 0.3	28.7	1140	0.04354243	19.3521
0.3 x 0.3	43.7	1590	0.04354088	19.3515

#### 4.4.2 Acero bajo cargas dinámicas

Tanto en los ensayos de campo como en las simulaciones computacionales el acero no alcanzó su límite de esfuerzo de corte, pero si en ciertos puntos su esfuerzo de fluencia. En los estudios metalográficos realizados por (Peralta & Sarango, 2019), se evidencia que no hubo cambios en la composición química del acero producidos por la variación de presión y temperatura resultantes de la detonación del explosivo.

Producto de la detonación, el hormigón empuja al acero produciéndose una deformación inicial. El hormigón de 28.7 MPa alcanza un 74.48% del total de daño en un tiempo de  $4.140542 \text{ E-}04$  seg, lo mismo ocurre con la resistencia de 43.7 MPa alcanzando un 81.74% en  $4.140815 \text{ E-}04$  seg como se muestra en las figuras Figura 42 y Figura 43 con el valor de erosión por deformación plástica de 0.004, esto deja a los refuerzos longitudinales sin recubrimiento. En este caso, las varillas de acero se vuelven en elementos esbeltos no resistentes a la carga axial que se está aplicando a las probetas, provocándose una segunda etapa de deformación para el acero inducida por el pandeo.

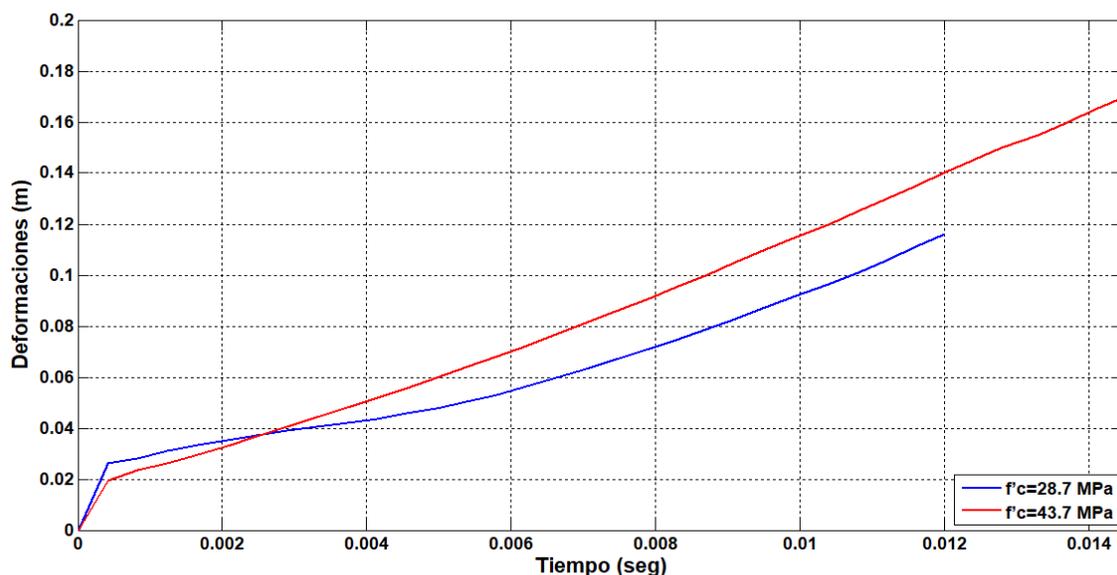
El acortamiento de la columna producido por la carga axial empieza también a producirse en este tiempo como se ve en la Figura 51.



**Figura 51.** Acortamiento axial de las columnas, Col 0.3 x 0.3

Las deformaciones del acero fueron medidas en el centro de la longitud de la varilla de refuerzo central de la cara de la columna en contacto con el explosivo, luego de quedar expuesta por la fragmentación del hormigón.

En la Figura 52 se evidencia los desplazamientos a los que están sometidas las varillas centrales del refuerzo longitudinal recubiertas por las caras de hormigón que están directamente en contacto con el explosivo, nótese que existe un punto de inflexión en el comportamiento de las curvas en el mismo tiempo en que se presenta el mayor porcentaje de daño en el hormigón y así mismo el inicio del acortamiento axial de la columna. A partir de este punto, para ambos casos, se producen las mayores deformaciones del acero producidas por la carga axial.



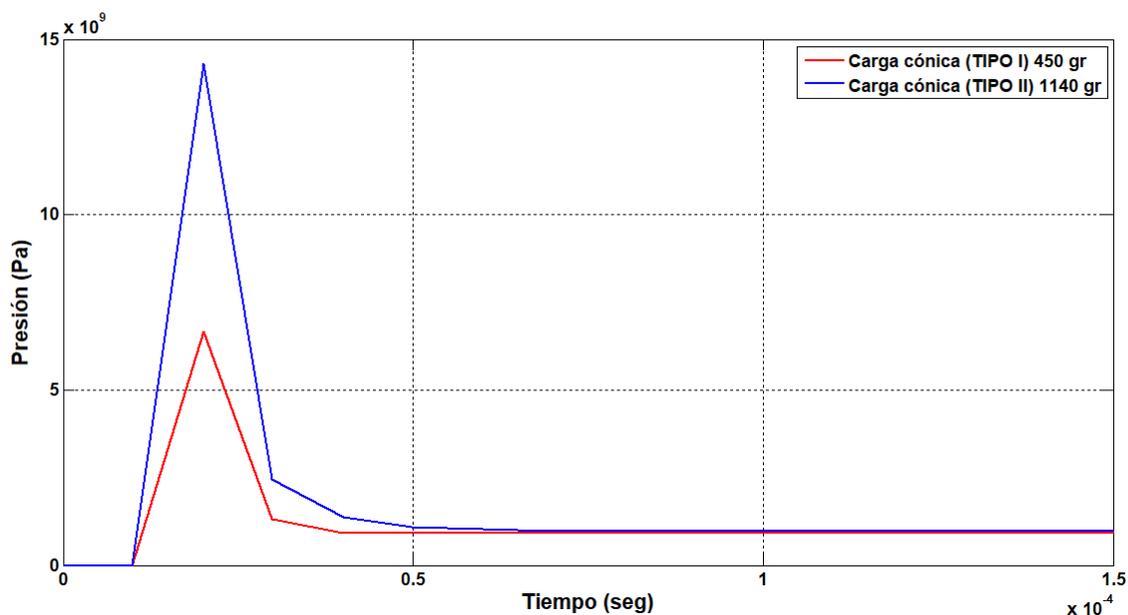
**Figura 52.** Curva Desplazamiento vs Tiempo del acero, Col 0.3 x 0.3

#### 4.4.3 Explosivo y presión de incidencia

Las altas presiones resultantes de ondas de choque ( $P > 10$  GPa) (Meyers, 1994) y la cercanía del explosivo al material, provocan que la mayoría de equipos disponibles sean inadecuados para realizar mediciones precisas de este parámetro (Karlos, Solomos, & Larcher, 2016), por este motivo, en el presente estudio las presiones fueron determinadas únicamente por medio de simulación computacional utilizando las ecuaciones de estado JWL y Mie – Grüneisen. Cabe recalcar que para la predicción de la respuesta al choque de materiales porosos la EOS Mie – Grüneisen es de suma importancia. (Meyers, 1994).

En la Figura 53 se observa una presión de incidencia de 6.67 GPa para una carga cónica de 450 gr (TIPO I) y de 14.3 GPa para una carga cónica de 1140 gr (TIPO II),

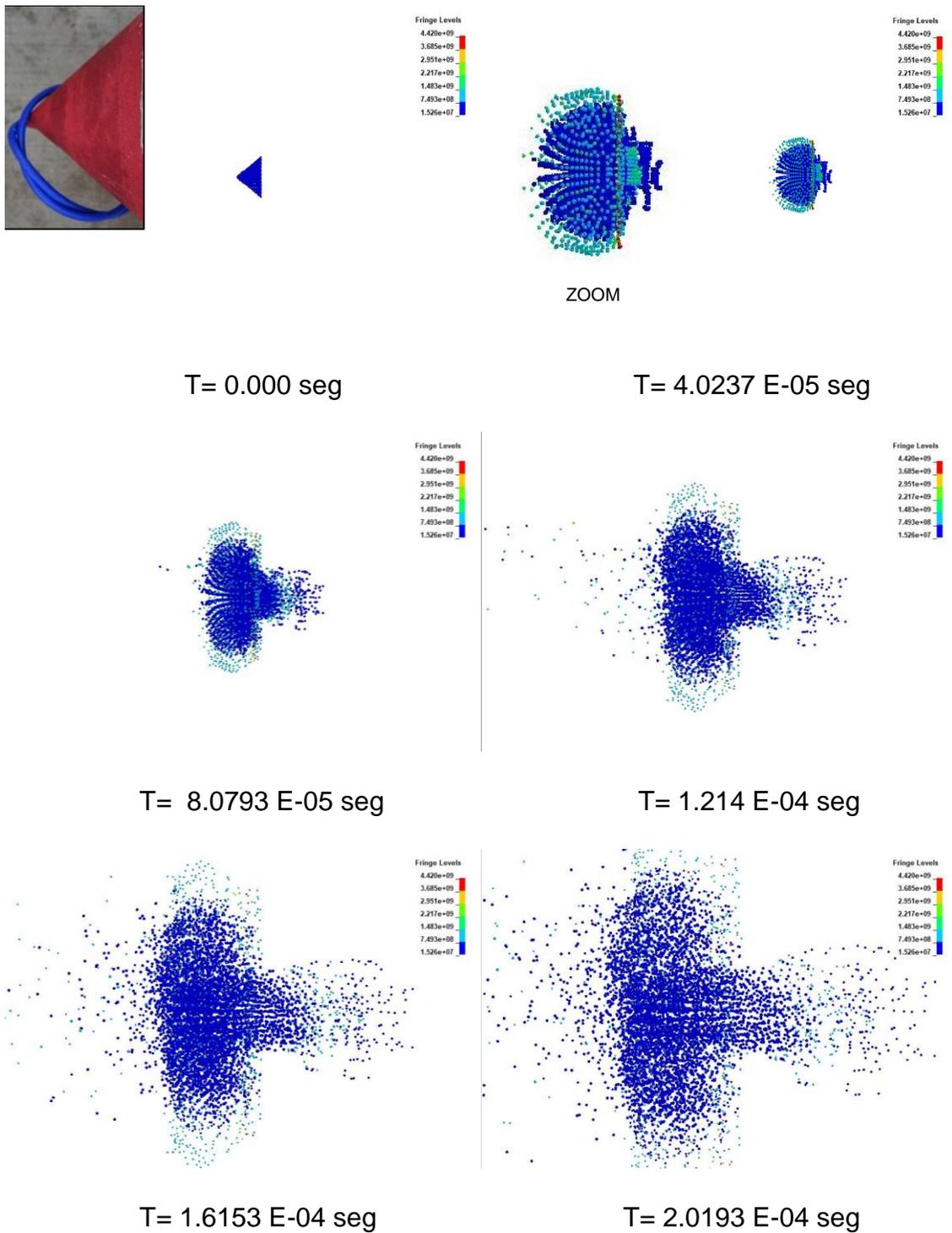
estas cargas están en contacto con la estructura y el tiempo de arribo de la onda de choque para ambos casos es de  $2 \times 10^{-5}$  seg.



**Figura 53.** Curva Presión vs Tiempo del explosivo

#### 4.5 Efecto de la onda de choque

El efecto de la onda de choque juega un papel importante dentro de la demolición de las columnas de hormigón armado. Las cargas cónicas proporcionan una dirección a la onda de choque generando así las mayores presiones en la parte que se encuentra en contacto con las columnas. La expansión y el correspondiente frente de presión de la onda explosiva chocando contra la columna se pueden observar claramente en la Figura 54.



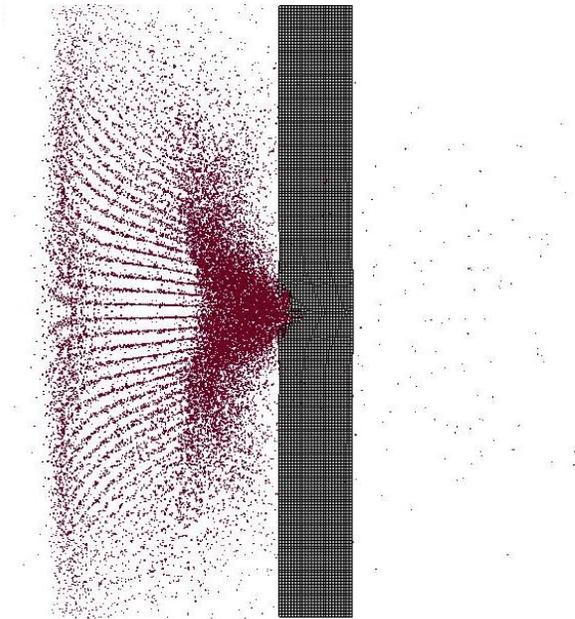
**Figura 54.** Expansión de la onda de presión de la carga cónica

También se puede notar que, en el desarrollo de la detonación, la base del cono provoca un efecto direccional que concentra las mayores presiones que repasamos en la Figura 53, esto provoca un mayor daño en la estructura en la cual se encuentra en contacto.

Con la ayuda de una cámara de alta velocidad Phantom V2512, se obtiene una imagen de la expansión de los gases mediante un filtro Laplacian 5x5 en la Figura 55; a su costado derecho se muestra en la Figura 56 un comportamiento similar del explosivo en la simulación computacional. Ambas imágenes han sido tomadas en aproximadamente el mismo lapso de tiempo para de esta forma validar la modelación y comportamiento del material explosivo.



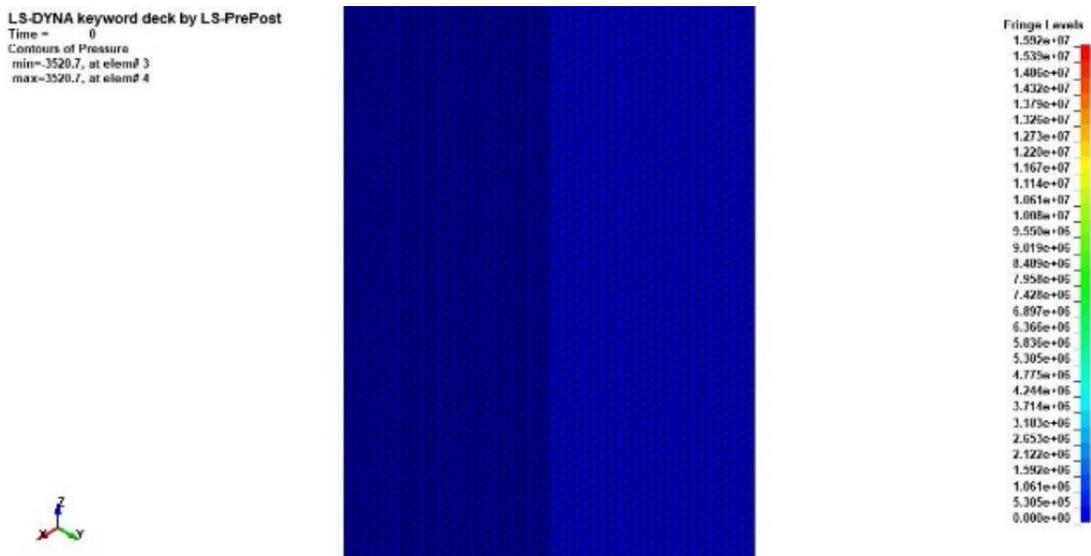
**Figura 55.** Cámara Phantom  
T=4.21e-4(seg)



**Figura 56.** LS-DYNA  
T=4.14e-4 (seg)

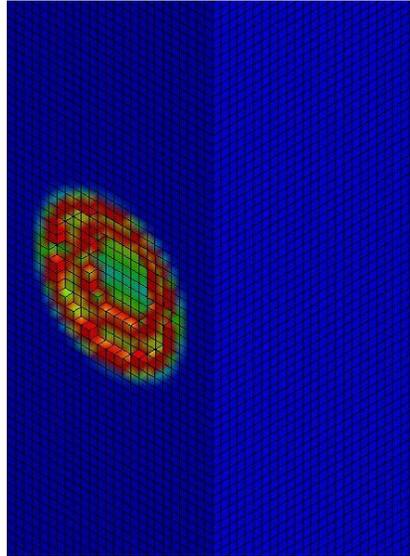
La onda de choque se comporta como un fluido y la interacción que se efectúa al hacer contacto con la estructura materializada por la columna de hormigón armado se puede observar desde la Figura 57 hasta la Figura 64, su avance en el material se visualiza a través de los contornos de presión generados en el hormigón.

Desde la Figura 58 a la Figura 61 encontramos que se generan las mayores presiones sobre el hormigón de la cara de la columna que se encuentra en contacto con el explosivo, las cuales van disminuyendo gradualmente una vez que la onda de choque ya ha sobrepasado la sección de la columna como se evidencia ya en la Figura 63. Finalmente, verificamos en la Figura 64 que a pesar de que la onda de choque ya ha pasado todavía existe erosión en el material producida por la inercia.



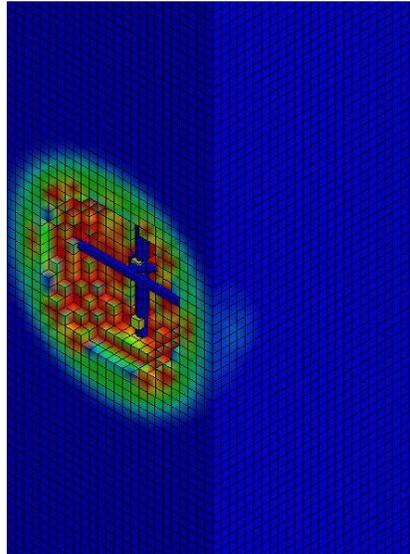
**Figura 57.** Contornos de presión, T= 0.00 seg

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 1.997e-005  
 Contours of Pressure  
 min=-29925.8, at elem# 68923  
 max=9.55034e+07, at elem# 65424



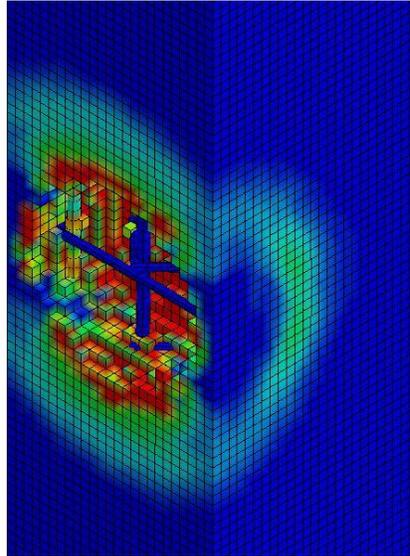
**Figura 58.** Contornos de presión, T= 1.997 E-05 seg

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 2.9955e-005  
 Contours of Pressure  
 min=-2.2153e+06, at elem# 65468  
 max=8.3258e+07, at elem# 65346



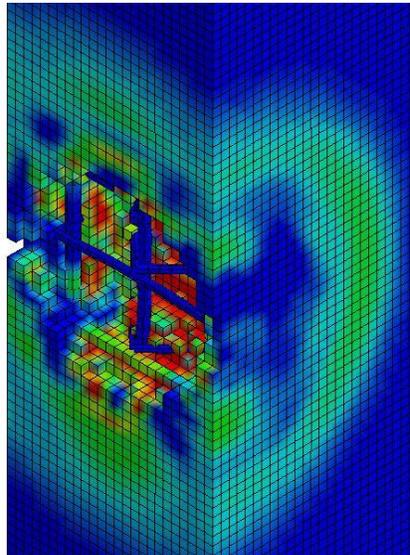
**Figura 59.** Contornos de presión, T= 2.9955 E-05 seg

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 4.9974e-005  
 Contours of Pressure  
 min=-4.93379e+06, at elem# 60525  
 max=9.41108e+07, at elem# 65121



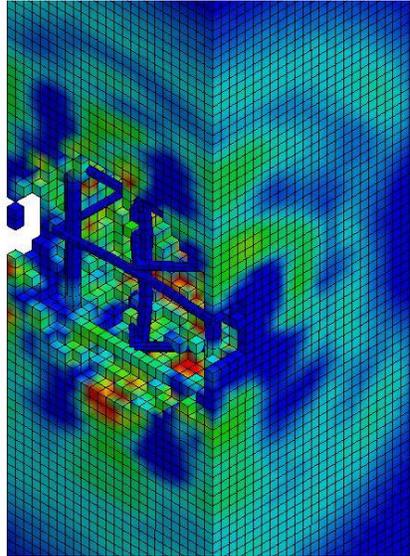
**Figura 60.** Contornos de presión, T= 4.997E-05 seg

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 6.9993e-005  
 Contours of Pressure  
 min=-5.0787e+06, at elem# 64240  
 max=8.06765e+07, at elem# 65219



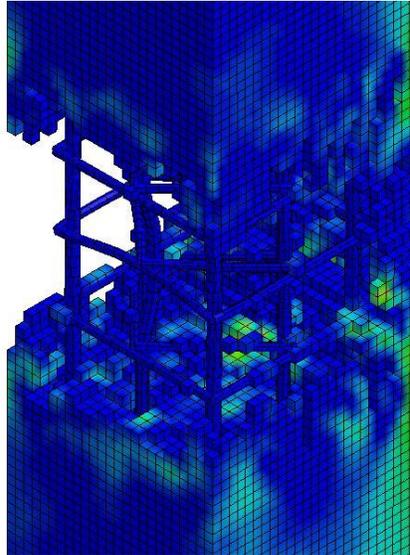
**Figura 61.** Contornos de presión, T= 9.9993 E-05 seg

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 8.9963e-005  
 Contours of Pressure  
 min=-5.12672e+06, at elem# 66462  
 max=7.29038e+07, at elem# 60790

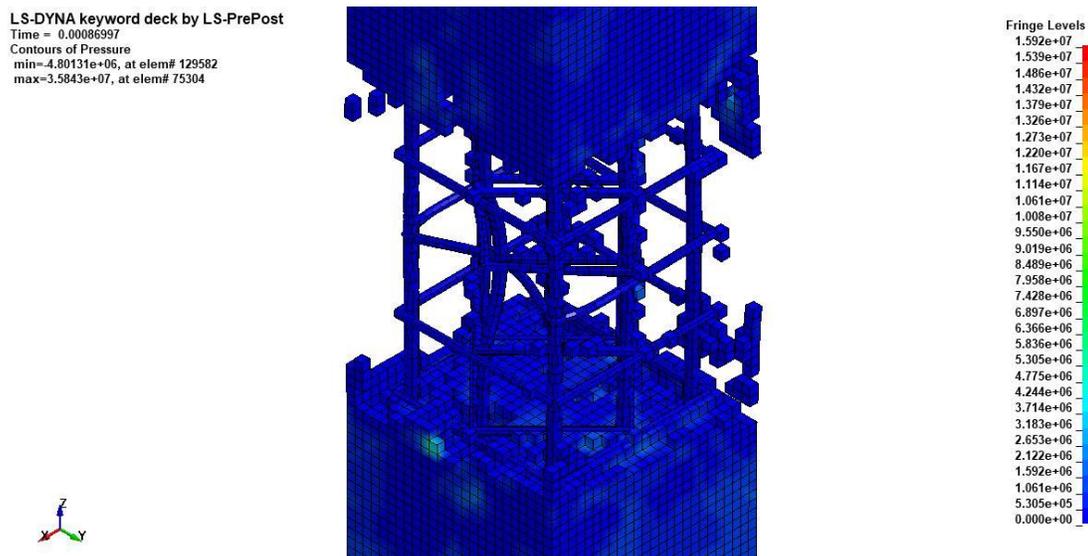


**Figura 62.** Contornos de presión, T= 8.9963 E-05 seg

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 0.00027997  
 Contours of Pressure  
 min=-4.74181e+06, at elem# 75150  
 max=3.16835e+07, at elem# 75508



**Figura 63.** Contornos de presión, T= 2.7997 E-04 seg



**Figura 64.** Contornos de presión,  $T= 8.6997 \text{ E-04}$  seg

#### 4.6 Resumen

En el presente capítulo se analizó el procedimiento de validación del modelo computacional mediante la comparación del volumen de fragmentación y deformaciones en el refuerzo longitudinal central de las columnas, con los obtenidos a través del escaneo en tres dimensiones. Una vez ejecutado este paso, se caracterizó de forma teórica el comportamiento mecánico del hormigón, el acero, la pentolita y la interacción entre ellos apoyados en los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales y de la cámara de alta velocidad Phantom V2512.

Las conclusiones consiguientes del análisis de los resultados de este estudio se tratarán en la siguiente sección. También se abordará las recomendaciones que deberán ser tomadas en cuenta para trabajos futuros de modelamiento con elementos finitos para eventos de alta energía para resolver la interacción entre explosiones y estructuras.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Mediante elementos finitos, modelos constitutivos y ecuaciones de estado adecuadas para cada tipo de material y condiciones de borde ideales, se modelaron dos columnas de hormigón armado de 0.3 x 0.3 m de sección y 2.5 m de altura. La columna elaborada con hormigón de resistencia a la compresión 28.7 MPa, fue sometida a una carga axial de 40 Ton y una carga explosiva cónica de 1140 gr de pentolita, presentando un daño de 19.3521% del volumen total de hormigón. Por su parte, la columna de 43.7MPa con una resistencia del hormigón a la compresión, experimentó cargas de 40 Ton de carga axial y 1590 gr de pentolita cónica, resultando en un daño de 19.3515% del volumen total del hormigón.
- El hormigón sometido a cargas explosivas para todos los casos describe tres estados de tensión en la zona expuesta a la carga explosiva descritos en tres zonas de transición.
  - ZONA 1: La resistencia es prácticamente nula en el área expuesta directamente a la detonación ya que experimenta importantes compresiones hidrostáticas.
  - ZONA 2: En la parte inmediatamente posterior, la onda de choque golpea al material y su inercia contribuye a la compactación de los

poros existentes provocando deformaciones y rigidización excesivas, lo cual genera la falla frágil del hormigón.

- ZONA 3: En la cara de la columna opuesta a la detonación, la onda de choque a su paso genera esfuerzos negativos que fragmentan el concreto.
- Para la simulación, el valor impuesto del factor de erosión debe ser tomado con precaución, ya que no es un dato experimental, para lo cual se realizó una serie de simulaciones variando únicamente el valor de la erosión por deformación plástica. Como resultado se determinó que el valor de 0.004 es el que produce los valores de desfragmentación más similares a los obtenidos en los ensayos de campo. Los resultados numéricos que se obtuvieron dependen en gran cantidad de este parámetro.
- El acero se deforma en dos fases, la primera provocada por la compactación del hormigón producto de la detonación y la segunda provocada por una pérdida rápida del hormigón que recubre al acero, esto convierte a los refuerzos longitudinales en elementos demasiado esbeltos susceptibles de fallar por pandeo, es así que las mayores deformaciones del acero son producidas por la carga axial.
- En conjunto el hormigón armado presenta una mayor resistencia ante la carga explosiva. Los refuerzos de corte (estribos) evitan el colapso de la columna al mantener confinado el hormigón.

- La presión de incidencia de las cargas conformadas de Pentolita 50/50 en contacto con la estructura está en el orden de los 10 GPa, alcanzándola en un tiempo de  $2.0 \times 10^{-5}$  seg. La forma del explosivo direcciona las mayores presiones hacia la base del cono, generando un daño mayor con la onda de choque en las columnas de hormigón armado. Las presiones fueron determinadas únicamente de forma numérica computacional debido a que el rango de presiones y las altas temperaturas producidas por el explosivo, imposibilitan el uso de sensores o aparatos de medición.
- Las presiones de incidencia de las cargas cónicas en contacto con la estructura determinadas por un método numérico, son mayores que las que se presentan en las cargas no confinadas free air burst, air burst y Surface burst determinadas empíricamente en el manual Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC) del Departamento de defensa de los Estados Unidos de America.
- La onda de choque traspasa la sección de la columna más rápido de lo que el hormigón inmediatamente cercano a la detonación empieza a fallar. Este fenómeno es el que genera el efecto spalling, ejerciendo una succión en la cara posterior a la explosión en la columna.
- La simulación computacional de eventos de alta energía provoca deformaciones excesivas al utilizar un mallado numérico, además, la onda de choque se comporta como un fluido, por estos motivos fue necesario

modelar la pentolita con elementos basados en técnicas Lagrangeanas de tipo Smooth Particle Hydrodynamics (SPH).

- El tiempo de daño total de la zona afectada en las columnas de hormigón armado varía de acuerdo al tamaño de la sección; a mayor sección, mayor tiempo para alcanzar la falla.
- No es aplicable realizar un estudio de control de convergencia de mallado para cada uno de los modelos, ya que, el valor del factor de erosión depende directamente del tamaño del mallado que se utilice para el modelamiento. Este condicionamiento evita tener características iguales para todos los modelos del estudio de control de convergencia al momento de cambiar las dimensiones del mallado.
- El escaneo digital en tres dimensiones proporcionó información con un grado alto de exactitud que permite la validación de todas las variables que participan dentro del modelamiento, mediante la comparación de deformaciones y volumen de erosión - fragmentación.
- Los modelos computacionales realizados han alcanzado un nivel de confiabilidad del 96.73% con respecto de la información obtenida de los ensayos experimentales, esto valida los procesos de modelamiento computacional en el software LS – DYNA para ser utilizados en futuros trabajos.
- Luego de visualizar el desempeño de la máquina de ensayos se determinó que los acoples entre columna y máquina no generaron un empotramiento

perfecto, provocando que las condiciones de borde tuvieran fallos que generaron grados de libertad. Estos problemas generaron que un porcentaje de la energía fuera absorbida por el acople de la máquina causando la existencia de diferencias en la forma en la que se deforman las columnas en comparación con las simulaciones computacionales las cuales fueron modeladas con condiciones de borde adecuadas. Esta diferencia nos brinda un margen de seguridad entre la simulación computacional y la realidad, considerando que este fallo se asemeja al estado real que podrían presentar las estructuras ante cargas explosivas debido a que, las estructuras en el Ecuador presentan las siguientes características:

- Diseño estructural con norma DIN desde el año 1980 hasta 2001 en el que se considera para cálculos la carga sísmica cero.
  - Diseño estructural con el Código de Práctica ecuatoriano INEN 5:2001 desde el año 2001 hasta 2011 tomando ciertos parámetros para el diseño ante cargas sísmicas.
  - Hormigón armado con varillas de refuerzo no corrugadas.
  - Utilización de resistencias para el diseño menores a  $f'c=21$  MPa para el hormigón y  $f_y=420$  MPa para el acero, en elementos estructurales.
  - Colocación de refuerzo de corte cada 30 cm.
- En las simulaciones realizadas los elementos estructurales llegaron al punto de colapso, tomando en cuenta que el modelamiento se efectuó con condiciones adecuadas, por lo que, se podría asumir, que las columnas de

una edificación que generalmente no alcanzan condiciones ideales por varios factores, fallarían.

- Los amarres de los refuerzos de acero en la simulación forman un solo cuerpo que trabaja monolíticamente con el hormigón, esta condición provoca también deformaciones diferentes ya que los estribos en los ensayos de campo se abrieron produciendo que las varillas de refuerzo trabajen de forma individual.

## 5.2 Recomendaciones

- Para realizar la inter - relación fluido estructura existen otras alternativas en los tipos de mallado tales como Euler y Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) Multimaterial; sin embargo, estos presentaron problemas de excesivas deformaciones y volúmenes negativos en el mallado. Cabe mencionar también que para este tipo de modelización es necesario crear un medio continuo de transmisión de la onda de choque, que para este caso es el aire. Por esta razón se recomienda realizar el modelamiento y simulación con otros métodos de integración explícita a fin de poder realizar comparaciones con el método SPH utilizado para este estudio.
- Desarrollar simulaciones con otros modelos constitutivos de daño del hormigón como por ejemplo Karagozian and Case Model (K&C), Continuous Surface Cap Model (CSCM), entre otros, que consideren además límites de erosión basados en diferentes criterios de falla.

- Ejecutar un estudio experimental y computacional en una estructura a porticada de hormigón armado para caracterizar de forma computacional el fenómeno y generar posibles efectos de caída de la edificación.
- En base en la información obtenida en el presente estudio realizar una investigación para elaborar diseños estructurales resistentes a cargas explosivas. Estas estructuras podrían ser utilizadas en zonas fronterizas, edificios gubernamentales, cuarteles militares y retenes policiales, además en fortificaciones de uso militar.

## REFERENCIAS

- Alok, D. (Junio de 2016). State of the art in near field and contact explosion. Canadá.
- Aráoz, G. (2012). Modelo para hormigón bajo cargas explosivas. Tucumán, Argentina.
- Astarlioglu. (2013). Behavior of reinforced concrete columns under combined effects of axial and blast-induced transverse loads. *Engineering Structures*, 55.
- Bathe, K.-J. (2006). *Finite Element Procedures*.
- Bermejo, M. (2015). Modelos de elementos finitos explícitos para explosiones en estructuras reticuladas de hormigón armado. Aplicaciones al estudio de colapso de edificios. Madrid, España.
- Bischoff, P., & Perry, S. (1991). Compressive behaviour of concrete at high strain rates . Karlsruhe, Germany.
- Blender. (2019). *Blender*. Obtenido de <https://www.blender.org/about/license/>
- Blind, N., & Richard, O. (2009). Analysis of an Engine Frame Subjected to Large Imbalance Loads. Trollhattan, Suecia.
- Borrvall, T. (Mayo de 2011). The Rht Concrete Model in Ls-Dyna. Freiburg, Germany.
- Burlion, N., Gatuingt, F., Pijaudier - Cabot, G., & Daudeville, L. (2000). Compaction and Tensile Damage in Concrete: Constitutive Modelling and Application to Dynamics. Cachan, Francia.
- Castanera, S. (2015). *Evaluacion del tamaño optimo de mallado para modelización mediante elementos finitos en losas de hormigón frente a cargas explosivas*. Madrid.
- Castedo, R. (2018). Tipos de Modelización con Ls Dyna I. Madrid, España.
- Colorado, J. (Enero de 2008). Análisis de las características de los modelos de material recvomendados para la simulación de procesos de embutición de chapa de acero. Madrid, España .

- 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.
- CREAFORM. (2019). *CREAFORM*. Obtenido de <https://www.creaform3d.com/es/servicio-de-asistencia-al-cliente/productos-previos/escaner-goscan-3d-g1>
- Cui, J., Hao, H., & Shi, Y. (2017). Discussion on the suitability of concrete constitutive models for high-rate response predictions of RC structures. *International Journal of Impact Engineering*.
- Dobratz, B., & Crawford, P. (1985). *LLNL Explosives Handbook Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants*.
- Foglar, M. &. (2013). *Conclusions from experimental testing of blast resistance of Frc and Rc bridge decks*.
- García, F. (Junio de 2014). Análisis numérico de impacto no lineal en sistemas multicomponentes. Málaga, España.
- Gingold, R., & Monaghan, J. (1977). Smooth Particle Hydrodynamics.
- Gustafsson, R. (1977). *Técnica sueca de voladuras*. Nora, Suecia: Nora Boktryckeri.
- Hu, G., Wu, J., & Li, L. (Mayo de 2016). Advanced Concrete Model in Hydrocode to Simulate. Tokio, Japón.
- JianGuo, N., HaiFeng, L., & Lin, S. (2008). Dynamic mechanical behavior and the. Beijing, China.
- Karlos, V., Solomos, G., & Larcher, M. (2016). *Analysis of blast parameters in the near-field for spherical free-air explosions*. European Commission. JRC Technical Reports.

- Livermore Software Technology Corporation y Dyna More. (2019). *LS-DYNA Support*.  
Obtenido de <https://www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/contact-types>
- López, D. L. (2018). *Introducción al Ls Dyna I*. Madrid, España.
- Luccioni, B., Ambrosini, R., & Danesi, R. (2004). Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*.
- Luccioni, B., Aráoz, G., & Labanda, N. (2013). Defining erosion limit for concrete. *International Journal of protective Structures*.
- Medina, E. (2008). *Construcción de estructuras de Hormigón Armado*. Madrid: Delta.
- Mejia, R. J., & Vazconez, E. (2017). Desarrollo de curvas de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de hormigón. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.
- Meyers, M. (1994). *Dynamic Behavior of Material*. California: Wiley - Interscience .
- Morales, E. (2014). "Low-cost Base Isolation for Critical Hospital Facilities", with Andre Filiatrault. Búfalo, EEUU.
- Ohtsu, M., Uddin, F., Tong, W., & Murakami, K. (2007). Dynamics of spall failure in fiber reinforced concrete due to blasting. *Construction and Building Materials*.
- Peralta, R., & Sarango, A. (Mayo de 2019). Evaluación de daño en columnas de hormigón armado a escala real por efecto de cargas explosivas mediante validación experimental. Sangolquí.
- Pushkaraj, S., Whittaker, A., & Aref, A. J. (1 de Diciembre de 2010). *Modeling the Effects of Detonations*. New York, Estados Unidos.
- Santos, A. (2018). *Tipos de Modelización con Ls Dyna II*. Madrid, España.
- Scapin, M. (Febrero de 2013). *Shock-wave and high strain-rate phenomena in matter: modeling and applications*. Torino, Italia.

- Schwer, L. (Junio de 2014). Modeling rebar: the forgotten sister in reinforced concrete modeling.
- Schwer, L. (Junio de 2016). Jones Wilkens Lee JWL equation of state with Afterburning. EEUU.
- Smith, P., & Hetherington, J. (1994). *Blast and ballistic loading of structures*. Nueva York: Roudledge.
- Unidad de Gestión de Riesgos. (S/F). EXPLOSIONES. *EXPLOSIONES FÍSICAS Y QUÍMICAS*. San Luis, San Luis, Argentina: Universidad Nacional de San Luis.
- Villaverde, A. R. (Junio de 2010). Implementación del Método de Partículas SPH para la Simulación de Fluidos sobre Tarjetas Gráficas. Madrid, España.
- Vocadlo, L., Poirer, J., & Price, G. (2000). Gruneisen parameters and isothermal equations of state. París, Francia.
- Wang , Z., Konietsky, H., & Huang, R. (2009). Elastic–plastic-hydrodynamic analysis of crater blasting in steel fiber. *ELSEVIER, Theoretical and Applied Fracture Mechanics*.
- Watanabe, J. (2011). Explosivos tipos y propiedades . Cajamarca, Perú .
- Wu, C., Li, J., & Su, Y. (2018). *Development of Ultra High Performance concrete against blast*. Woodhead.
- Wu, K. S., Li, B., & Tsai, K. C. (2011). The effects of explosive mass ratio on residual compressive capacity of contact. *Journal of Constructional Steel Research*.
- Xu, J. (2013). Interaction Methods for the SPH Parts (Multiphase Flows, Solid Bodies) in LS-DYNA.
- Zagal, J. (Octubre de 2012). *Repositorio Tesis* . Obtenido de [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112294/cf-tay\\_mm.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112294/cf-tay_mm.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- 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
- Zhengu, Tu, & Yong, L. (2010). Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete. *International Journal of Impact Engineering*.
- Zhou, X., & Hao, H. (2009). Mesoscale Modelling and Analysis of Damage and Fragmentation of Concrete Slab. *International Journal of Impact Engineering*.
- Zukas, J., & Walters, W. (1998). Explosive Effects and Applications. Springer , New York.