



**Caracterización del daño de columnas de hormigón armado bajo la acción de cargas explosivas en  
contacto**

Guadalupe Aviles, Carolina Elizabeth; Guerrero Arévalo, Christian Roberto; Mendoza Vilaña, Jefferson  
Leonardo; Ortiz Eras, Julio César; Paredes Cumbal, Gabriel Alejandro y Samueza Samueza, Diego

Alexander

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Mejía Almeida, Néstor David M.Sc.

06 de abril del 2021



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** Proyecto\_de\_Titulacion.docx (D100608131)  
**Submitted:** 4/4/2021 8:53:00 PM  
**Submitted By:** ndmejia1@espe.edu.ec  
**Significance:** 2 %

### Sources included in the report:

TESIS TAPIA^LOMADRID3.docx (D54382160)  
TESIS PERALTA-SARANGO.pdf (D53478946)  
[http://www2.uca.edu.sv/matematica/upload\\_w/file/REGRESION%20SIMPLE%20Y%20MULTIPLE.pdf](http://www2.uca.edu.sv/matematica/upload_w/file/REGRESION%20SIMPLE%20Y%20MULTIPLE.pdf)  
<https://core.ac.uk/download/pdf/158829787.pdf>

### Instances where selected sources appear:

11

Firma:

.....  
**Ing. Mejía Almeida, Néstor David M.Sc.**

**DIRECTOR**



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

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“Caracterización del daño de columnas de hormigón armado bajo la acción de cargas explosivas en contacto ”** fue realizado por los señores **Guadalupe Aviles, Carolina Elizabeth; Guerrero Arévalo, Christian Roberto; Mendoza Vilaña, Jefferson Leonardo; Ortiz Eras, Julio César; Paredes Cumbal, Gabriel Alejandro y Samueza Samueza, Diego Alexander** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 06 de abril de 2021**

Firma

.....  
**Ing. Mejía Almeida, Néstor David M.Sc.**

C.C.: 1714547898



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

Nosotros, **Guadalupe Aviles, Carolina Elizabeth; Guerrero Arévalo, Christian Roberto; Mendoza Vilaña, Jefferson Leonardo; Ortiz Eras, Julio César; Paredes Cumbal, Gabriel Alejandro y Samueza Samueza, Diego Alexander**, con cédulas de ciudadanía n° 0604179531, 1723017370, 1719695361, 1721552998, 1722304274, 1724222011, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Caracterización del daño de columnas de hormigón armado bajo la acción de cargas explosivas en contacto** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 06 de abril de 2021**

Firma

.....  
**Guadalupe Aviles, Carolina Elizabeth**  
 C.C.: 0604179531

Firma

.....  
**Guerrero Arévalo Christian Roberto**  
 C.C.: 1723017370

Firma

.....  
**Mendoza Vilaña, Jefferson Leonardo**  
 C.C.: 1719695361

Firma

.....  
**Ortiz Eras, Julio César**  
 C.C.: 1721552998

Firma

.....  
**Paredes Cumbal, Gabriel Alejandro**  
 C.C.: 1722304274

Firma

.....  
**Samueza Samueza, Diego Alexander**  
 C.C.: 1724222011



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIEARÍA CIVIL**  
**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros **Guadalupe Aviles, Carolina Elizabeth; Guerrero Arévalo, Christian Roberto; Mendoza Vilaña, Jefferson Leonardo; Ortiz Eras, Julio César; Paredes Cumbal, Gabriel Alejandro y Samueza Samueza, Diego Alexander** con cédulas de ciudadanía n° 0604179531, 1723017370, 1719695361, 1721552998, 1722304274, 1724222011, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Caracterización del daño de columnas de hormigón armado bajo la acción de cargas explosivas en contacto** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

**Sangolquí, 06 de abril de 2021**

Firma

**Guadalupe Aviles, Carolina Elizabeth**  
C.C.: 0604179531

Firma

**Guerrero Arévalo Christian Roberto**  
C.C.: 1723017370

Firma

**Mendoza Vilaña, Jefferson Leonardo**  
C.C.: 1719695361

Firma

**Ortiz Eras, Julio César**  
C.C.: 1721552998

Firma

**Paredes Cumbal, Gabriel Alejandro**  
C.C.:1722304274

Firma

**Samueza Samueza, Diego Alexander**  
C.C.: 1724222011

## **Dedicatoria**

A mis padres Urkien y Myriam, quienes siempre me han apoyado en lograr cada uno de mis sueños y me han enseñado sobre perseverancia, constancia, dedicación y amor incondicional. A mis hermanas Catherine y Martina, quienes han sido parte de mis logros con su alegría y apoyo tanto en mi vida personal como estudiantil. A mi familia en general que de una u otra forma han estado impulsándome y animándome para cumplir mis metas.

### **Carolina Elizabeth Guadalupe Aviles**

Dedicado a mi madre Aida, que su esfuerzo y determinación me ha guiado paso a paso a cumplir mis metas y sueños, a mis abuelos Estuardo y Rosa mis segundos padres, que me han educado desde el primer día en que me conocieron y me han hecho la persona que soy, a mis tíos Jorge, Ángel y Edgar por siempre ser el apoyo moral y educativo. A toda mi familia por sus palabras de aliento y nunca dejarme desfallecer.

### **Christian Roberto Guerrero Arévalo**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan anhelado desde mi infancia. A mi madre, por ser la persona mas importante y por demostrarme siempre su amor y apoyo incondicional día tras día. A mi padre, que hizo de mi una persona fuerte y que siempre estuvo a mi lado para apoyarme y no dejarme caer en el camino. A mis hermanas, a quien las aprecio mucho, por aconsejarme, escucharme y ayudarme en todo momento, sin el apoyo de cada una de las personas mencionadas anteriormente no habiéramos logrado esta meta.

### **Jefferson Leonardo Mendoza Vilaña**

A mi abuelita quien hizo de mi la persona que soy ahora inculcándome buenos valores morales, a mi madre por los consejos que me ha dado, mi hermano y mi mascota que han estado conmigo en los buenos y malos momentos, en general a mi familia por estar ahí cuando lo he necesitado. A mis amigos y compañeros que han aportado un valor significativo a mi vida.

**Julio César Ortiz Eras**

Este trabajo está dedicado a quien ha formado y acompañado mi camino, a mi madre por ser mi apoyo incondicional, a mi hermana por ser un ejemplo de perseverancia, a mi padre por brindarme su confianza y a mi sobrino por alegrar mis días. Gracias familia, este logro es más suyo que mío.

**Gabriel Alejandro Paredes Cumbal**

Dedico desde lo más profundo de mi corazón este proyecto a 4 personas que sin ellas no habría logrado este nuevo gran paso que estoy dando. Se lo dedico a mi padre Luis y lo único que le puedo decir es que todo su esfuerzo y sacrificio valió la pena. A mi madre Rosa para que sepa que todas las desveladas que estuvo a mi lado sirvieron de mucho. A mi abuelito Manuel por haberme brindado un techo donde poder realizar mis estudios. Y por último y no menos importante a nuestro tutor David Mejía por todas las horas que nos dedicó, por el conocimiento que nos brindó y por ayudarnos a lograr este objetivo con todo el ánimo del mundo.

**Diego Alexander Samueza Samueza**

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi madre, por impulsarme a ser mi mejor versión mientras me acompañaba en cada día con amor y esmero. A mi padre, por enseñarme que el sentido de la vida es apasionarse por lo que se hace y siempre encontrar felicidad en la adversidad. A mi hermana Catherine, porque cada día me inspira con su ejemplo y me ensaña a soñar en grande. A Martina por recordarme la inocencia de la vida y la alegría que hay en ella hasta en los días que los trabajos parecían inalcanzables. Agradezco Chris, por definir la lealtad e incondicionalidad en mi vida. Agradezco al docente tutor, Ing. Nestor Mejía por ser un excelente guía en el tema desarrollado, mostrando total disponibilidad para ampliar los conocimientos.

### **Carolina Elizabeth Guadalupe Aviles**

Agradecido con mi madre, por sacrificar todo para darme la posibilidad de cumplir esta meta tan importante en mi vida, con mis abuelos que siempre me han motivado a seguir adelante siempre con valores y principios y enseñándome el valor de una promesa y de mi palabra, a mis tíos que siempre han sido como mis hermanos, enseñándome el valor de la familia brindándome siempre el apoyo incondicional y guiándome en cada aspecto de la vida. Agradecer al Ing. David Mejía por tratarnos como iguales en la realización del proyecto, siempre abierto a apoyarnos y guiarnos de la mejor manera. Agradecer a Carolina por siempre apoyarme en malos y buenos momentos y motivarnos a ambos a mejorar cada día. Agradecer a mis amigos y compañeros de proyecto con los cuales hemos compartido desde el inicio de esta etapa universitaria hasta la culminación de la misma, siempre compartiendo con una sonrisa y recuerdos inolvidables.

### **Christian Roberto Guerrero Arévalo**

En primer lugar, doy gracias a Dios, por haberme dado fuerza y valor para avanzar paso a paso en esta etapa universitaria y llegar a la meta, agradezco a mi madre por brindarme el apoyo, que sin lugar a duda me ha servido de mucho el amor que me entrego durante mis días buenos y malos, a mi padre, que siempre ha estado pendiente de mi y se que hoy y siempre esta orgulloso de la persona en la cual me ha convertido, a mis hermanas, que con sus consejos me ayudaron a superar deslices en el camino.

**Jefferson Leonardo Mendoza Vilaña**

Al finalizar una etapa y conseguir un logro más en mi vida, quiero agradecer a mis padres, especialmente a mi madre quien me brindó apoyo absoluto en el transcurso de mi carrera universitaria, de igual manera a mi hermano y familia, que siempre han estado para apoyarme, a mi perrito Panchito 🐶 por acompañarme en las desveladas que conlleva la Universidad. Sin dejar de lado al Ing. David Mejía que siempre estuvo presto para brindar su apoyo en el desarrollo del proyecto, a mis amigos y compañeros que estuvieron a lo largo de este camino con los cuales compartimos momentos extraordinarios.

**Julio César Ortiz Eras**

Gracias a Dios por darme fuerza en los momentos claves. Agradezco a los docentes por formarme para la vida profesional, al Ing. David Mejía por ser guía en el proyecto, a Cinthy por enseñarme a ser constante a lo largo de mi vida universitaria y especialmente a mi familia por ser el pilar fundamental en mi vida.

**Gabriel Alejandro Paredes Cumbal**

Luego de un arduo camino lleno de obstáculos y adversidades, agradezco al concluir esta etapa importante de mi vida primeramente a Dios por haberme regalado la vida y segundo a mi familia que estuvo apoyándome a pesar de todo en este arduo camino. Agradezco a mi padre Luis que fue un ejemplo de superación, de honestidad, de alegría por haberme dado mis estudios y un plato de comida hasta en los momentos más difíciles, por haberme aconsejado en la vida y por nunca apartarse de mi vida a pesar de ya no estar junto a mí físicamente. A mi madre Rosa por haberme dedicado tanto tiempo en cuidarme y velar por mí, no sólo en momentos de enfermedad sino también en los momentos de salud. A mi abuelito Manuel, que me brindó un techo en el cual poder resguardarme, a mis hermanos Mishell y Luis Fernando por siempre estar a mi lado y a mis tíos Marco, Sonia, Blanca, David, Susana, Manuel y Jonathan que siempre estuvieron apoyándonos en los momentos más difíciles de nuestra vida. De igual manera a mis amigos que emprendieron junto a mí este largo viaje lleno de altos y bajos, de alegrías y de tristezas, de éxitos y fracasos, pero sobre todo un viaje lleno de aprendizaje en especial a Gina y Sebastián por haberme apoyado en mis momentos que me encontraba mal de salud. Y por último quiero agradecer a todas aquellas personas que de alguna u otra manera me ayudaron a lograr este éxito.

**Diego Alexander Samueza Samueza**

## Índice de Contenido

Indice de Tablas.....	13
<i>Índice de Figuras</i> .....	14
<i>Resumen</i> .....	17
<i>Abstract</i> .....	18
<i>Capítulo I</i> .....	19
<i>Generalidades</i> .....	19
<i>Introducción</i> .....	19
<i>Antecedentes</i> .....	19
<i>Justificación e importancia</i> .....	23
<i>Objetivos</i> .....	23
<i>Objetivo General</i> .....	23
<i>Objetivos Específicos</i> .....	24
<i>Área de influencia</i> .....	24
<i>Capítulo II</i> .....	25
<i>Marco teórico</i> .....	25
<i>Estado del arte</i> .....	25
<i>Tipos de recolección de datos</i> .....	25
<i>Simulación computacional</i> .....	27
<i>Método euleriano</i> .....	27
<i>Método lagrangiano</i> .....	28
<i>Método SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)</i> .....	37
<i>Análisis de regresión multivariable</i> .....	45
<i>Pasos del análisis de regresión multivariable</i> .....	47
<i>Prueba de hipótesis individual</i> .....	52

<i>Evaluación del modelo final de regresión multivariable.....</i>	<i>54</i>
<i>Capítulo III.....</i>	<i>55</i>
<i>Metodología .....</i>	<i>55</i>
<i>Estado del arte .....</i>	<i>55</i>
<i>Recolección y clasificación de base de datos .....</i>	<i>55</i>
<i>Planteamiento de matriz de estado del arte .....</i>	<i>57</i>
<i>Organización de información en Visio .....</i>	<i>57</i>
<i>Metodología computacional.....</i>	<i>59</i>
<i>Elaboración 3D de la columna, cono para la carga explosiva y reforzamientos. ....</i>	<i>59</i>
<i>Explicit Dynamics Engineering Data.....</i>	<i>63</i>
<i>Explicit Dynamics Geometry.....</i>	<i>64</i>
<i>Explicit Dynamics Model.....</i>	<i>65</i>
<i>Interfaz Explicit Dynamics con Autodyn.....</i>	<i>77</i>
<i>Autodyn.....</i>	<i>77</i>
<i>Metodología de regresión multivariable.....</i>	<i>90</i>
<i>Selección de variables.....</i>	<i>90</i>
<i>Selección de datos .....</i>	<i>90</i>
<i>Combinación de variables.....</i>	<i>92</i>
<i>Datos de la combinación de variables .....</i>	<i>92</i>
<i>Coefficientes de regresión.....</i>	<i>94</i>
<i>Cálculo de y estimada .....</i>	<i>96</i>
<i>Confiabilidad de los coeficientes de regresión <math>\beta</math> .....</i>	<i>97</i>

<i>Capítulo IV</i> .....	98
<i>Resultados</i> .....	98
<i>Estado del arte</i> .....	98
<i>Simulación computacional</i> .....	99
<i>Regresión lineal multivariable</i> .....	102
<i>Capítulo V</i> .....	103
<i>Discusión</i> .....	103
<i>Conclusiones y recomendaciones</i> .....	103
<i>Referencias</i> .....	106
<i>Anexos</i> .....	110

### Indice de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Nivel de significancia y nivel de confianza</i> .....	49
---	----

<b>Tabla 2</b> <i>Tabla ANOVA</i> .....	51
<b>Tabla 3</b> <i>Medidas de probetas y configuración de reforzamientos</i> .....	60
<b>Tabla 4</b> <i>Dimensiones del cono</i> .....	62
<b>Tabla 5</b> <i>Propiedades del concreto</i> .....	79
<b>Tabla 6</b> <i>Propiedades del refuerzo de acero</i> .....	80
<b>Tabla 7</b> <i>Propiedades de la Pentolita</i> .....	81
<b>Tabla 8</b> <i>Datos de ensayos experimentales</i> .....	91
<b>Tabla 9</b> <i>Datos de combinación de variables</i> .....	93
<b>Tabla 10</b> <i>Matriz X</i> .....	94
<b>Tabla 11</b> <i>Matriz Y</i> .....	95
<b>Tabla 12</b> <i>Coefficientes de regresión</i> .....	96
<b>Tabla 13</b> <i>Y estimada</i> .....	96
<b>Tabla 14</b> <i>Tabla ANOVA calculada</i> .....	97

### Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Simulación de demolición del edificio AMIA</i> .....	21
<b>Figura 2</b> <i>Ciclo computacional lagrangiano</i> .....	29

<b>Figura 3</b> <i>Esquema de superficies usadas en el modelo constitutivo de RHT (izquierda) y comportamiento de la superficie de falla para bajas presiones hidrostáticas (derecha).</i>	32
<b>Figura 4</b> <i>Ciclo computacional SPH</i>	38
<b>Figura 5</b> <i>Extracto de matriz de compilación de datos de artículos en Excel</i>	58
<b>Figura 6</b> <i>Clasificación de un artículo y sus componentes en Visio</i>	58
<b>Figura 7</b> <i>Parámetros para clasificación de resultados</i>	59
<b>Figura 8</b> <i>Modelo base generado en SolidWorks</i>	63
<b>Figura 9</b> <i>Ventana de Explicit Dynamics Engineering Data</i>	64
<b>Figura 10</b> <i>Ventana de Explicit Dynamics Geometry</i>	65
<b>Figura 11</b> <i>Asignación Cono_Pentolite</i>	66
<b>Figura 12</b> <i>Verificación de materiales PENTOLITE, CONG-35MPA y STELL 4340</i>	67
<b>Figura 13</b> <i>Verificación de dimensiones de elementos beam</i>	68
<b>Figura 14</b> <i>Asignación del sistema de coordenadas globales</i>	69
<b>Figura 15</b> <i>Ventana connections</i>	69
<b>Figura 16</b> <i>Malla 10x10x10mm</i>	70
<b>Figura 17</b> <i>Ventana Analysis settings</i>	71
<b>Figura 18</b> <i>Asignación de valor y dirección de la gravedad</i>	72
<b>Figura 19</b> <i>Asignación del apoyo en la parte inferior de la columna</i>	72
<b>Figura 20</b> <i>Asignación en la parte inferior del reforzamiento longitudinal</i>	73
<b>Figura 21</b> <i>Asignación de restricciones en la parte superior del concreto</i>	74
<b>Figura 22</b> <i>Asignación de restricciones en la parte superior del refuerzo longitudinal</i>	75
<b>Figura 23</b> <i>Aplicación de la presión en la cara superior de la columna</i>	76
<b>Figura 24</b> <i>Ubicación punto de detonación</i>	76
<b>Figura 25</b> <i>Transferencia de datos de Explicit Dynamics con Autodyn</i>	77
<b>Figura 26</b> <i>Ventana Autodyn Materials</i>	78

<b>Figura 27</b>	<i>Ventana Autodyn Int.Cond.</i> .....	82
<b>Figura 28</b>	<i>Opciones de hidrocódigo para la simulación</i> .....	83
<b>Figura 29</b>	<i>Ventana de Autodyn Interactions</i> .....	84
<b>Figura 30</b>	<i>Definición del path direct</i> .....	85
<b>Figura 31</b>	<i>Verificación de desactivación de procesamiento en paralelo</i> .....	85
<b>Figura 32</b>	<i>Ingreso de criterio de erosión global</i> .....	86
<b>Figura 33</b>	<i>Definición del número e incremento de ciclos</i> .....	87
<b>Figura 34</b>	<i>Ventana Autodyn Plots</i> .....	88
<b>Figura 35</b>	<i>Opción de variables a visualizar</i> .....	89
<b>Figura 36</b>	<i>Desplazamiento absoluto del refuerzo longitudinal y transversal</i> .....	89
<b>Figura 37</b>	<i>Extracto de clasificación de resultados en Visio</i> .....	98
<b>Figura 38</b>	<i>Inicio de la simulación – 0 milisegundos</i> .....	99
<b>Figura 39</b>	<i>Detonación del explosivo</i> .....	100
<b>Figura 40</b>	<i>Simulación finalizada a 1 milisegundo</i> .....	100
<b>Figura 41</b>	<i>Fragmentación del hormigón después de la detonación</i> .....	101
<b>Figura 42</b>	<i>Deformación absoluta - reforzamiento longitudinal y transversal</i> .....	101

## Resumen

El presente estudio es la cuarta etapa del proyecto de investigación “Desarrollo de curvas de daño por impacto con cargas explosivas en columnas de hormigón armado a través de simulación computacional y pruebas experimentales”. El objetivo de este estudio fue realizar la simulación computacional en el software ANSYS 2019R3 Workbench, mediante el uso de los paquetes Explicit Dynamics y Autodyn, de las 33 probetas ensayadas en la etapa experimental para analizar la respuesta dinámica de las columnas de hormigón armado (H.A.) bajo la acción de cargas explosivas en contacto. Para su desarrollo se partió de una investigación bibliográfica de estudios realizados previamente para entender el fenómeno físico de la onda de choque y los efectos que esta ocasiona en la columna. Por otra parte, se hizo el análisis de la parte matemática del funcionamiento de los hidrocódigos usados en la simulación, como el método lagrangiano, euleriano, SPH, entre otros; para sustentar el desarrollo de la misma. Posteriormente, se procedió a realizar las simulaciones de las probetas con sus condiciones y parámetros correspondientes. Adicionalmente, se realizó un análisis multivariable con los resultados obtenidos en los ensayos experimentales en Peralta, (2019), con la finalidad de plantear una ecuación que determine el índice de daño de las columnas, la cual quedará planteada y analizada pero no en su estado final.

### **Palabras clave:**

- **CARGA EXPLOSIVA**
- **COLUMNA DE HORMIGÓN ARMADO**
- **ÍNDICE DE DAÑO**
- **HIDROCÓDIGO**
- **ONDA DE CHOQUE**

### **Abstract**

This study is the fourth stage of the research project "Development of impact damage curves with blast loads in reinforced concrete columns through computer simulation and experimental tests". The aim of this study was to perform the computational simulation of the 33 test tubes tested in the experimental stage, in the ANSYS 2019R3 Workbench software through the use of the Explicit Dynamics and Autodyn packages to analyze the dynamic response of the reinforced concrete columns (RC) under the action of blast loads without stand-off distance. The development of this study was based on a bibliographic investigation of studies previously carried out to understand the physical phenomenon of the shock wave and the effects it causes on the column. On the other hand, an analysis of the mathematical part of the hydrocodes used in the simulation was made such as the Lagrangian, Eulerian, SPH method, among others; as well as the simulations of the test tubes with their corresponding conditions and parameters. In addition, a multivariate analysis was carried out with the results obtained in the experimental trials in Peralta, (2019), in order to propose an equation that determines the damage index of the columns, which will be studied further in the next stage of the research project.

#### **Keywords:**

- **BLAST LOAD**
- **REINFORCED CONCRETE COLUMNS**
- **DAMAGE INDEX**
- **HYDROCODE**
- **SHOCK WAVE**

## Capítulo I

### Generalidades

#### Introducción

Una onda expansiva producida por una detonación a una distancia mayor de 20 m puede causar daños a la fachada de edificaciones y generar un mínimo daño en los elementos estructurales. Sin embargo, para una onda a un rango de corto alcance los elementos estructurales pueden sufrir daños importantes. Por lo que es indispensable evaluar el estado final de daño y su capacidad residual (Kwaffo, 2017).

Este trabajo presenta el estudio del arte y ensayos computacionales sobre los efectos que produce la detonación de cargas explosivas en contacto sobre columnas de hormigón armado (columnas H.A.), las que serán validadas en función de los ensayos experimentales realizados en Peralta, (2019).

#### Antecedentes

La comprensión de la interacción de una onda de choque con una estructura y su correspondiente afectación es fundamental para llevar acciones de demoliciones controladas. A la fecha, investigadores han estudiado el desempeño dinámico de columnas HA bajo la acción de ondas de choque para diferentes condiciones como diferente tipo-geometría-masa-ubicación del explosivo y parámetros de diseño de la columna.

Astarlioglu et al. (2013) llevaron a cabo estudios analíticos y computacionales sobre la respuesta dinámica de columnas HA. El estudio analítico utilizó un modelo de un grado de libertad y el estudio computacional fue desarrollado en el software ABAQUS. Los resultados denotan que cargas axiales moderadas o bajas incide directamente a una falla por flexión-corte. Mientras tanto que, una cantidad de explosivo considerable incide en una falla por corte directo. El incremento del porcentaje de refuerzo longitudinal infiere

en la capacidad residual de la columna. Además, cuando la relación de refuerzo longitudinal fue mayor en una columna, se resistió más carga de explosión. Los efectos secundarios debidos al gran desplazamiento harán que dicha columna sea incapaz de soportar la carga diseñada.

Baylot y Bevins (2007) estudiaron, numérica y experimentalmente, la respuesta dinámica de muros no estructurales de una edificación. Los resultados infieren que los muros carecen de capacidad estructural, por lo que columnas y vigas son afectadas directamente ya que soportan todas las cargas inducidas.

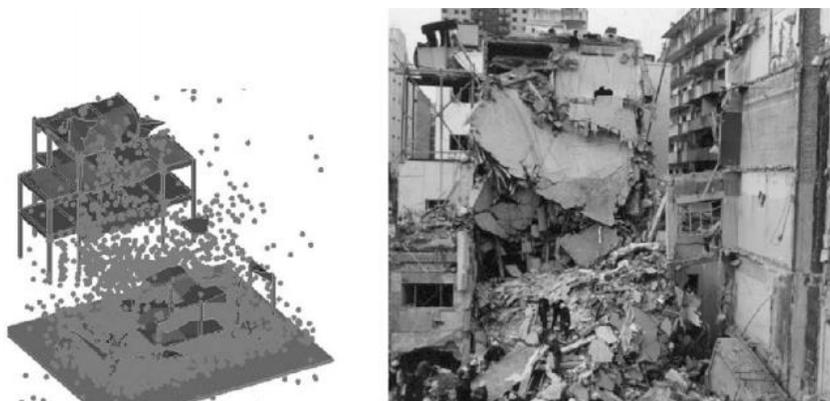
Elsanadedy et al. (2011) estudiaron la respuesta dinámica de columnas HA circulares reforzadas para campo lejano y cercano. Los resultados muestran que el reforzamiento reduce considerablemente el desplazamiento lateral máximo, así como el daño al hormigón y el acero de refuerzo.

Bao y Li (2010) estudiaron la respuesta dinámica de columnas HA para determinar niveles de daño a diferentes cantidades de explosivo y diferentes armados de columnas. Los resultados denotan que un mayor porcentaje de acero reduce significativamente el grado de daño inducido por la explosión y el posterior colapso de las columnas HA.

Luccioni et al. (2004) analizaron el comportamiento de un edificio de (Mutualidad Argentina de Israel) sometido a cargas explosivas. Los resultados muestran que las columnas más cercanas al centro de la explosión fallaron por el efecto directo de la presión reflejada de la explosión. Las columnas en el extremo más alejado del edificio perdieron la conexión con las vigas superior e inferior. Esto podría deberse al efecto de tensión impartido por el empuje hacia arriba en la losa del primer piso en esa región.

## Figura 1

*Simulación de demolición del edificio AMIA*



NOTA: Tomado de *Analysis of building collapse under blast loads* (p. 7), por (Luccioni & Aráoz, 2011)

Li et al. (2012) llevaron a cabo estudios acerca de la capacidad axial residual de columnas de hormigón armado dañadas por efecto de cargas explosivas. Los resultados que obtuvieron de sus ensayos experimentales llevaron a la conclusión de que las columnas con un mayor reforzamiento presentan desplazamientos laterales más pequeños y por tanto su nivel de daño es menos severo y esto contribuye a tener una mayor capacidad residual.

Jayasooriya et al. (2011) realizaron estudios computacionales sobre la estabilidad global de un edificio con estructuras de hormigón armado como columnas y vigas, frente a cargas explosivas de campo lejano. Los resultados llevaron a los autores a concluir que la capacidad residual depende de la parte no dañada de las columnas de hormigón armado en la sección crítica y se evalúan asumiendo que el hormigón no dañado está en estado no confinado, esto debido a la pérdida de confinamiento después de la desintegración del hormigón.

Wu et al. (2011) utilizó una muestra de dos columnas H.A. bajo cargas explosivas de campo cercano, que además de evaluar el daño en el instante de explosión se evaluó la capacidad axial residual de las mismas. Los resultados experimentales obtenidos sirven de validación para el modelo realizado en LS-DYNA, el cual consta de tres etapas: 1) aplicación de una carga axial inicial que se va aumentando hasta alcanzar la carga axial de servicio, 2) aplicación de cargas explosivas en la columna y 3) aumento de la carga axial después de la detonación. Esta simulación muestra que la capacidad residual de la columna en la segunda etapa es mucho menor que en la tercera etapa, además que el aumento en el refuerzo transversal aumenta la capacidad a corte.

Cui et al. (2015) desarrollaron un análisis numérico y computacional para evaluar la respuesta de columnas H.A. bajo cargas explosivas de campo cercano; utilizaron un criterio de daño, definido como la relación entre la profundidad de la columna y la deflexión residual relativa. Los resultados muestran que cuando se tiene una sección transversal más grande, una relación de refuerzo transversal más alta y un recubrimiento más delgado, mejora la respuesta de explosión de las columnas debido a que se reduce la profundidad de desconchado del concreto.

Roller et al. (2013) compararon el aumento de capacidad de carga residual entre columnas convencionales y columnas con hormigón compuesto por materiales como: polímeros, fibras de acero, incrustado con micro refuerzo y concreto de ultra alto desempeño. Estas 4 opciones de reforzamiento para la columna tuvieron un gran impacto en la capacidad de carga residual aumentándola del 5,5% en una columna convencional a un 65% con los materiales nombrados anteriormente.

## **Justificación e importancia**

En el presente trabajo se busca abarcar tres componentes, las cuales son: el desarrollo de la investigación técnica en donde se recopila información de estudios existentes del estado final del daño de elementos estructurales para de esta forma sustentar y corroborar la veracidad de los resultados obtenidos en el presente estudio; la realización de la simulación computacional en función de los parámetros expresados a lo largo del desarrollo de esta investigación para realizar modelos constitutivos que significan una definición matemática al comportamiento del material, dicho comportamiento se obtiene en ensayos de laboratorio o de campo, tomando en cuenta componentes que afectan al comportamiento final de materiales; y finalmente, la elaboración de un análisis comparativo entre los valores numéricos de los modelos que se han desarrollado previamente y el propuesto.

Esta investigación es importante debido a que permite complementar el trabajo que se ha realizado previamente respecto a cargas explosivas y elementos estructurales, aportando así en el ámbito tanto militar como constructivo, ya que mediante las simulaciones de estos elementos bajo cargas de contacto aplicadas, facilitaran datos detallados para la realización de una demolición controlada que se aplicaría a las estructuras cuyo riesgo de colapso sea alto, permitiendo que este procedimiento pueda realizarse por personal especialista.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Desarrollar un modelo analítico del daño final de un elemento estructural bajo la acción de cargas explosivas en contacto.

**Objetivos Específicos**

- Realizar una investigación técnica con una revisión rigurosa de los estudios existentes del estado final del daño de elementos estructurales para la fusión, comparación y validación del modelo a desarrollar.
- Simular computacionalmente el fenómeno de estudio siguiendo el plan de simulación establecida.
- Realizar un análisis numérico comparativo entre los valores numéricos de los modelos desarrollados previamente y el propuesto.

**Área de influencia**

El área de influencia del presente estudio es a nivel nacional. Esto en donde existan estudios de demoliciones controladas que permitan desarrollar líneas de investigación de seguridad y defensa relacionadas a operaciones militares de ingeniería, así como construcciones en donde se requiera demoliciones por presencia de estructuras en estado riesgo o por alguna necesidad estratégica militar.

## Capítulo II

### Marco teórico

#### **Estado del arte**

El estado del arte recolecta información para poder avalar y comparar con los resultados obtenidos de otros autores. Como indica Montoya (2005):

Es una modalidad de la investigación documental que permite el estudio del conocimiento acumulado (escrito en textos) dentro de un área específica. Se considera que su realización implica el desarrollo de una metodología resumida en tres grandes pasos: contextualización, clasificación y categorización; los cuales son complementados por una fase adicional que permita asociar al estado del arte de manera estructural, es decir, hacer el análisis. (p. 2)

Guevara (2016) afirma: "...apoya la concreción de los objetos de estudio, la organización de estrategias puntuales para hacer una sistematización rigurosa que permita aclarar el rumbo en medio de la desbordada cantidad de información que provee la literatura en cada tema". Teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente, la matriz del estado del arte es un apoyo para la formación del ingeniero debido a que la investigación de los temas que se han tratado con anterioridad aporta un conocimiento extra para alcanzar los objetivos planteados.

#### ***Tipos de recolección de datos***

Existen dos tipos de datos; aquellos obtenidos directamente de la realidad investigada son denominados datos primarios, mientras que los obtenidos mediante documentos escritos, normalmente elaborados y procesados, son llamados datos secundarios, entre los cuales corresponden: libros, revistas, artículos, etc. (Hernández Sampieri et al., 2010)

La base de la investigación bibliográfica se sustenta en los datos secundarios, cuyo fin es encontrar soluciones a diferentes problemáticas por medio de dos metodologías:

- Vinculando datos obtenidos de distintas procedencias.
- Dar una visión general y sistemática a un tema desarrollado en fuentes dispersas.

Una ventaja principal al realizar este tipo de investigación es la factibilidad de abarcar un extenso campo de fenómenos. (Hernández et al., 2010) Sin embargo, existe un inconveniente el cual consiste en la veracidad de las fuentes bibliográficas que se han extraído, por tal motivo se debe asegurar:

- La información recopilada debe carecer de incoherencias y contradicciones.
- Explorar una amplia fuente bibliográfica, relacionando y clasificando minuciosamente.

En resumen, la investigación bibliográfica está definida por las siguientes tareas básicas:

- Investigar las fuentes que puedan ser de utilidad.
- Leer las fuentes recolectadas y clasificar aquellas que contengan aspectos esenciales del tema abordado.
- Recopilar información relevante de la base de datos.
- Realizar una comparación entre los datos obtenidos bajo un criterio coherente, para así, evaluar su credibilidad.
- Realizar las conclusiones finales.

Los datos secundarios se encuentran generalmente dispersos en distintos archivos para lo cual los catálogos on-line de bibliotecas y buscadores de internet facilitan

la búsqueda de dichos archivos. Posteriormente a esto, se realiza una lectura rápida para hacer una primera selección que luego se definirá de mejor manera en una siguiente lectura-estudio. (Hernández Sampieri et al., 2010)

Una vez realizadas las tareas básicas mencionadas, se puede establecer el trabajo general, partiendo de la información parcial obtenida.

### **Simulación computacional**

Una herramienta para modelar el comportamiento de medios continuos es un código computacional llamado hidrocódigo. Este permite modelar el flujo de un fluido a través las leyes newtonianas, ecuación de conservación de masa, energía, momento, constitutivas y de estado. Para resolver grandes deformaciones, problemas transitorios de deformación finita que ocurren en una escala de tiempo corta (Collins, 2002). Estos pueden ser Lagrangiano, Euleriano y ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian).

#### ***Método euleriano***

La descripción euleriana consiste en medir lo que pasa en puntos fijos del espacio. Se usa cuando el observador se coloca en una localización fija y estudia a las partículas que pasan por esa localización en su movimiento; y se usa en el estudio de movimientos de fluidos. En este enfoque se interesa por lo que está ocurriendo en un cierto punto del espacio y en un cierto instante de tiempo, en lugar de preocuparse por lo que le ocurra a una determinada partícula fluida. (Jiménez, 2015)

La descripción euleriana se basa en el material que fluye mediante la malla. En este caso, la malla define todo el espacio de interés. A medida que avanza el tiempo, las variables de interés se calculan en los puntos fijos de la cuadrícula. Por tanto, la masa, el momento y la energía deben fluir a través de los límites de las células. La cantidad de flujo entre celdas se usa para calcular las nuevas variables dentro de cada celda. En esta

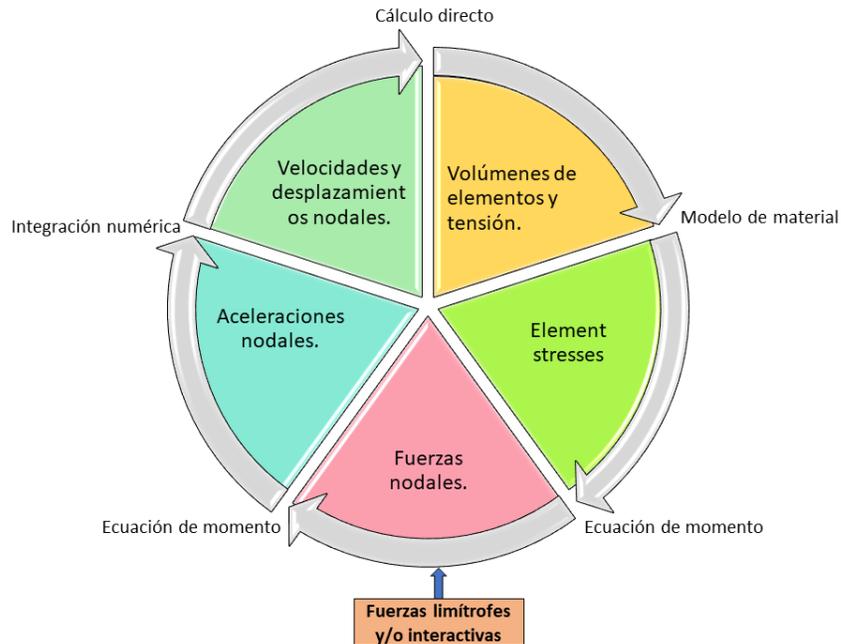
formulación, el volumen de la celda es invariante y los cambios en la densidad se deben a los cambios en la masa de una celda en particular. (Collins, 2002)

En la formulación euleriana, la malla debe definir todo el espacio en el que está contenido el movimiento del objeto. Durante el cálculo, el objeto ocupará ciertas celdas por completo, otras celdas parcialmente y otras celdas no ocupará en absoluto. (Jiménez, 2015)

### ***Método lagrangiano***

El método Lagrangiano sirve para resolver problemas de mecánica de sólidos, debido a las pequeñas deformaciones que van a sufrir los cuerpos. Sin embargo, para fluidos las deformaciones son grandes, por lo que se genera distorsión de la malla; y cuando esto sucede ya no es apropiado usar este método porque el error numérico aumenta y los resultados van a perder coherencia. (Antón, 2012)

Su característica principal es que la malla es fija al material todo el tiempo y “cuando se realiza el mallado del sistema cada nodo queda inmediatamente asignado a un punto material, y dicha asignación no va a cambiar a lo largo de todo el análisis. Esto supone que la malla y el material son solidarios, de forma que cuando las condiciones de contorno actúen y se produzca la deformación del sólido la malla va a hacer lo propio”. (Antón, 2012)

**Figura 2***Ciclo computacional lagrangiano***Condiciones de contorno.**

Se requiere establecer las condiciones de contorno, los cuales son los soportes de la columna y condiciones de carga; que serán fundamentales para la simulación ya que estas influyen en la respuesta del elemento. Las condiciones de contorno que se implementan varían entre códigos específicos. Las condiciones de contorno más comunes se clasifican en:

- **Sin deslizamiento:** Para esta condición de contorno, ambos componentes de la velocidad se establecen en cero, independientemente de la geometría de la malla.
- **Superficie libre:** Este es el tipo más simple de condición de contorno, que no aplica restricciones al movimiento del vértice.
- **Deslizamiento libre:** Para una pared de deslizamiento libre, las velocidades normales de la pared deben mantenerse en cero durante todo el cálculo.

- **Flujo de salida o de entrada específico:** Para este tipo de condición de frontera, las velocidades en la frontera se especifican externamente. Sin embargo, esta condición se complica por la necesidad de establecer no solo las velocidades, sino otras cantidades centradas en la celda, como la densidad y la energía interna.

- **Flujo o flujo de entrada continuo:** Similar a la condición de límite de flujo especificada, el tratamiento típico de tales condiciones es establecer las velocidades de flujo de entrada o salida, densidades, energías, etc. iguales a la celda adyacente dentro de la malla. (Collins, 2002)

### **Aceleraciones nodales.**

Las aceleraciones nodales se obtienen mediante la ecuación del momento en el instante  $t_i$

### **Velocidades y desplazamientos.**

A partir de la integración temporal explícita de la aceleración nodal se obtiene la velocidad; y siguiendo el mismo proceso se halla los desplazamientos nodales los cuales se obtienen a partir de la velocidad. (Nystrom, 2008)

La integración temporal explícita “...consiste en resolver cada paso del tiempo en forma local, sin necesidad de resolver un sistema de ecuaciones donde se involucran la totalidad de los grados de libertad.” (Becker et al., 2012)

### **Volúmenes y Deformaciones.**

Para determinar volúmenes y deformaciones de cada elemento se hace uso de la integración directa. “...La integración directa es aplicable cuando identificamos la función primitiva de forma inmediata; esto es, cuando conocemos la regla de derivación que al aplicarla nos permite hallar el integrando a partir de la función primitiva” (Beltrán, 2021) sin la necesidad de un método de integración.

### Tensión.

Mediante las leyes constitutivas las cuales describen matemáticamente el comportamiento dinámico del hormigón se obtiene la tensión de los elementos, las cuales se definen a continuación:

### Ecuación $P - \alpha$ .

La ecuación  $P - \alpha$  es la ecuación de estado del concreto la cual describe su comportamiento, combinando una descripción polinomial la cual relaciona los diversos parámetros que se definen a continuación (Nystrom, 2008):

$$p = \frac{1}{\alpha} f(\alpha * \rho, e) \quad (1)$$

$$f(\rho, e) = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \quad (2)$$

$$\text{Donde } \mu = \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)$$

$$\alpha = 1 + (\alpha_{porous} - 1) \left[ \frac{p_{solid} - p}{p_{solid} - p_{compaction}} \right]^n \quad (3)$$

Donde:

$\alpha$  = porosidad actual.

$\alpha_{porous}$  = porosidad del hormigón en buen estado.

$n$  = factor de forma.

$e$  = energía interna.

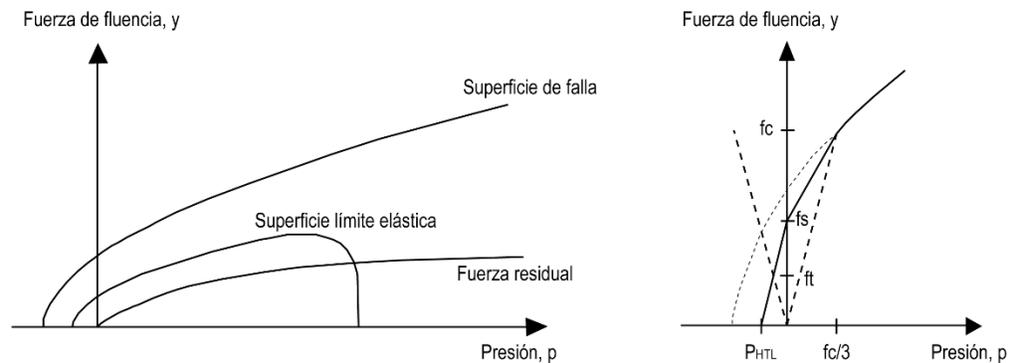
$K_1, K_2, K_3, B_0, B_1$  = parámetros de material.

### Modelo RHT.

Fue desarrollado por Riedel (2000) y está representado por tres superficies: límite elástico  $Y_{el}$ , superficie de falla  $Y_{fail}$ , superficie de resistencia residual  $Y_{fric}$  como se muestra en la figura 3.

### Figura 3

Esquema de superficies usadas en el modelo constitutivo de RHT (izquierda) y comportamiento de la superficie de falla para bajas presiones hidrostáticas (derecha).



Nota: Tomado de *Concrete Structures Subjected to Blast and Fragment Impacts* (p.40), por (Nystrom, 2008).

Debido a que el esfuerzo de fluencia aumenta con el incremento de la presión hidrostática, es necesario determinar dicha función mediante el uso de la ecuación 4.

$$Y_{TXC}(p) = f'_c \left( A * \left( \frac{p}{f'_c} - \frac{p_{HTL}}{f'_c} * F_{rate} \right)^N \right) \text{ for } p \geq \frac{f'_c}{3} \quad (4)$$

Donde:

$Y_{TXC}(p)$  = dependencia de la presión hidrostática  $P$  de la resistencia a la compresión del hormigón ( $f'_c$ ).

$P_{HTL}$  = límite de tracción hidrodinámico.

$F_{rate}$  = factor que toma la dependencia de la velocidad de deformación.

$N$  = forma de la curva.

Por otro lado, la superficie de falla  $Y_{fail}$  toma en cuenta el incremento de la fragilidad en el corte y la tensión, es decir no trabaja únicamente con la presión hidrostática y la velocidad de deformación, para esto es necesario agregar una función  $R_3(\theta)$ . (Nystrom, 2008)

$$Y_{fail} = Y_{TXC}(p)R_3(\theta)F_{rate}(\dot{\epsilon}) \quad (5)$$

Donde:

$Y_{fail}$  = superficie de falla.

$R_3(\theta)$  = describe la tercera dependencia invariante en la sección desviadora.

$(\dot{\epsilon})$  = tasa de deformación.

La superficie de resistencia residual no toma en cuenta la dependencia de la tercera invariante  $R_3(\theta)$  o la tasa de deformación. (Nystrom, 2008)

$$Y_{fric} = f_c * B * \left(\frac{p}{f_c}\right)^{M_1} \quad (6)$$

$$D = \sum \frac{\epsilon_{pl}}{\epsilon_{pl*failure}} \quad (7)$$

$$\epsilon_{pl*failure}(p) = D_1 \left(\frac{p}{f_c} - \frac{p_{HTL}}{f_c}\right)^{D_2} \quad (8)$$

Donde:

$Y_{fric}$  = superficie de resistencia residual.

$D$  = factor de daño.

$D_1$  y  $D_2$  = parámetros del material para la deformación por falla plástica.

$B$  y  $M_1$  =factores de forma para la superficie de resistencia residual.

### **Ecuación de estado del acero de tipo lineal.**

Define la relación entre presión y densidad. Se puede aplicar la ecuación 9 ya que esta sirve para la descripción de materiales que trabajan tanto a compresión como a tensión, siempre y cuando exista una pequeña variación de densidad. (Nystrom, 2008)

$$P(p) = K \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \quad (9)$$

Donde:

$K$  = denota el módulo volumétrico del acero.

### **Modelo de plasticidad de Johnson-Cook.**

Define el comportamiento de tensión de flujo del acero, trata variables como los efectos de la tensión y la temperatura.

El modelo J-C es el modelo más simple capaz de predecir el comportamiento mecánico de los materiales bajo diferentes condiciones de carga. Además, como se mencionó anteriormente, es uno de los modelos de materiales más utilizados, por lo que está implementado en muchos códigos FEM y es bastante fácil encontrar en la literatura los valores de los parámetros J-C para diferentes materiales. (Scapin, 2013, p. 64)

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*)(1 - T^{*m}) \quad (10)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (11)$$

Donde:

$\sigma_y$  = esfuerzo de flujo de Von Mises.

$\varepsilon_p^n$  = deformación plástica equivalente.

$n$  = exponente de endurecimiento por deformación.

$\dot{\epsilon}_p^*$  = velocidad de deformación plástica equivalente.

$T^*$  = la temperatura homóloga y A, B, C y m son constantes.

### **Criterio de Erosión**

El método de Lagrange utiliza un parámetro conocido como criterio de erosión. El cual sirve para determinar si los elementos de la malla exceden la deformación efectiva predefinida, ya que si esto sucede dichos elementos son eliminados, si se trata por ejemplo de deformación geométrica instantánea. (Luccioni & Aráoz, 2011)

Los criterios de erosión más conocidos son:

**La deformación geométrica incremental.** El criterio no parece ser físicamente consistente con la erosión del concreto resultante de cargas de impacto o explosiones. En general, los criterios de falla, daño y fluencia del concreto no pueden ser representados por deformaciones o tensiones incrementales. (Luccioni & Aráoz, 2011)

La erosión inicia cuando se alcanza el límite de deformación geométrica incremental:

$$\bar{\epsilon}_{eff} \geq (\bar{\epsilon}_{eff})_{lim} \quad (12)$$

$$\bar{\epsilon}_{eff} = \frac{2}{3} \sqrt{\dot{\epsilon}_{xx}^2 + \dot{\epsilon}_{yy}^2 + \dot{\epsilon}_{zz}^2 + \dot{\epsilon}_{xy}^2 + \dot{\epsilon}_{xz}^2 + \dot{\epsilon}_{yz}^2} \quad (13)$$

Donde:

$\epsilon_{ij}$  = tensor de deformación.

**La deformación plástica.** Este es un criterio de base de plasticidad con la ventaja de que las deformaciones plásticas son irreversibles y pueden interpretarse físicamente como deformaciones irrecuperables, no se han encontrado referencias que utilicen este

tipo de criterio de erosión para el hormigón sometido a impactos o cargas explosivas. (Luccioni & Aráoz, 2011)

La erosión se inicia cuando se alcanza un límite efectivo de deformación plástica.

$$\varepsilon_{eff}^P \geq (\varepsilon_{eff}^P)_{lim} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{eff}^P = \int \dot{\varepsilon}_{eff}^P; \quad \dot{\varepsilon}_{eff}^P = \frac{\sqrt{3J_2} - \sigma_y}{3G} \quad (15)$$

Donde:

$J_2$  = second invariant of the stress deviator

$\sigma$  = : uniaxial yield stress

$G$  =shear modulus

**El paso de tiempo.** Este tipo de criterio no tiene un significado físico y parece arbitrario en el caso de elementos de hormigón sometidos a explosiones o impactos.

**La falla.** Este criterio de erosión inicia después que el elemento falla.

**La deformación geométrica instantánea.** Puede incrementar o decrecer con la carga, pero una vez que el elemento ha erosionado este ya no puede recuperarse. Este criterio ha sido utilizado con éxito por algunos autores para modelar hormigón y hormigón reforzado con fibra bajo cargas de explosión y carga de impacto. Algunos de estos autores distinguen entre límites de compresión y tensión, pero no está claro cómo se definen la deformación por compresión efectiva y la deformación por tensión efectiva. Los valores límite utilizados para la compresión son siempre superiores a los valores límite para la tensión. En algunos casos, solo la deformación efectiva en compresión es limitada y, en muchos casos, los límites de erosión utilizados para la compresión son varios órdenes más altos que la deformación por compresión del hormigón en la falla bajo cargas

dinámicas elevadas. Como consecuencia, los elementos de hormigón se erosionan mucho después de fallar. (Luccioni & Aráoz, 2011)

La erosión se inicia cuando se alcanza un límite de deformación geométrica instantánea.

$$\varepsilon_{eff} \geq (\varepsilon_{eff})_{lim} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) + 5(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_1\varepsilon_3 + \varepsilon_2\varepsilon_3) - 3(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{13}^2)} \quad (17)$$

Donde:

$\varepsilon_{ij}$  = tensor de deformación.

$\varepsilon_{inst}$  = deformación geométrica instantánea.

Siendo este último criterio de erosión, el que se utiliza en el presente estudio para la simulación computacional.

### **Fuerzas nodales.**

Son el resultado de la combinación de las fuerzas internas y de borde, se evalúan mediante la ecuación del momento en el instante  $t_{(i+1)}$ . A partir del cálculo de las fuerzas el ciclo es iterativo hallando aceleración, velocidad y desplazamientos nodales para un instante  $t_{(i+1)}$ . (Nystrom, 2008)

### **Método SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)**

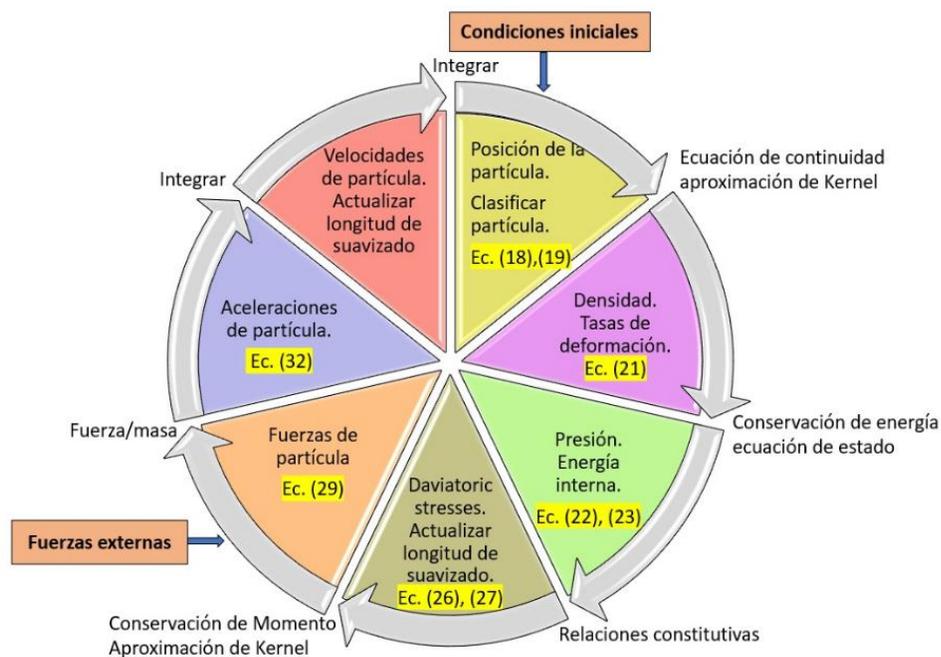
La hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH) es creada para simular problemas en astrofísica que involucran masas de fluidos que se mueven arbitrariamente en tres dimensiones sin límites (Monaghan, 1998). Un ejemplo típico es la simulación numérica de la fisión de una estrella que gira rápidamente.

El SPH es un método conformado por partículas que no utiliza malla, esto le permite un manejo sencillo de deformaciones muy grande, ya que la conectividad entre partículas se genera como parte del cálculo y puede cambiar con el tiempo. Como ejemplos de aplicaciones del SPH están los fenómenos de alta energía como explosiones, impacto de alta velocidad y penetraciones. (Barreiro et al., 2012)

Las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan la ley de conservación están dadas por el conjunto de partículas las cuales forman el dominio computacional. El ciclo computacional del método de simulación SPH está definido por una serie de pasos, los cuales se describen a continuación, siendo esta, una formulación básica.

#### Figura 4

##### *Ciclo computacional SPH*



#### **Condiciones Iniciales.**

Las partículas generadas por el método SPH para la simulación de la detonación de la carga explosiva poseen propiedades físicas como masa, velocidad, aceleración,

posición entre otras. La configuración computacional de la carga explosiva está conformada por la posición específica que ocupan las partículas para un tiempo  $t_i$ . (Liu & Lui, 2010)

SPH se basa en la teoría de los interpolandos integrales. El principio fundamental es aproximar cualquier función  $f(r)$ . La aproximación en notación discreta lleva la siguiente aproximación de la función en la posición de la partícula  $i$  (Barreiro et al., 2012):

$$f(r_i) = \sum_j^N \left( \frac{m_j}{\rho_j} \right) f(r_j) W_{ij} \quad (18)$$

Para partículas distribuidas de forma irregular, como en SPH, las derivadas de estos interpolandos se calculan por diferenciación ordinaria:

$$\nabla f(r_i) = \sum_j^N \left( \frac{m_j}{\rho_j} \right) f(r_j) \nabla_i W_{ij} \quad (19)$$

Donde:

$f(r_i)$  = es una función.

$W_{ij}$  = función de Kernel entre la partícula  $i$  y  $j$ .

$h$  = longitud suavizada.

$r$  = vector posición.

$m$  = masa de la partícula.

$\rho$  = densidad.

$N$  = número total de partículas.

$\nabla$  = vector gradiente.

### **Función de Kernel.**

Se emplea la función Kernel para realizar la transformación de un medio continuo a un medio discreto. El rendimiento del modelo SPH depende de la función Kernel que se seleccione; esta debe cumplir ciertas condiciones, como:

- Debe ser definida positiva:
  - $W(r - r', h) \geq 0$ , dentro del dominio.
- Soporte compacto:
  - $W(r - r', h) = 0$ , fuera del dominio.
- Normalizada:
  - $\int W(r - r', h) dr' = 1$
- Comportamiento delta:
  - $\lim_{h \rightarrow 0} \int W(r - r', h) dr' = \delta(r - r')$
- Comportamiento monótono decreciente.
- Debe ser una función par.

Se puede utilizar varios tipos de funciones de Kernel, en donde se debe tener en cuenta que el orden de los polinomios aumenta la precisión de interpolación SPH, no obstante, esto también aumenta el tiempo computacional (Barreiro et al., 2012). Entre los tipos se encuentran la función gaussiana, cuadrática, spline cúbico, quintica.

La más conocida y usada es la función spline cúbico, esto debido a que la precisión de la interpolación es la más eficaz entre las mencionadas, y viene denotada de la siguiente manera:

$$W(q, h) = \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (20)$$

En Donde

$q = r/h, \alpha_D$  es  $10/(7\pi h^2)$  en 2D.

$q = 1/(\pi h^3)$  en 3D.

### Densidad y tasa de deformación.

Aplicando la ecuación de continuidad, la cual está fundamentada en la aproximación de Kernel, se obtiene la densidad y tasa de deformación. La ecuación se describe como:

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_j^N m_j (v_i - v_j) \nabla_i W_{ij} \quad (21)$$

Donde:

$v_i - v_j$  = diferencia de la velocidad entre las partículas cercanas.

### Presión y Energía Interna.

Mediante la ecuación de estado de Jones Wilkins Lee (JWL) y la ecuación de la conservación de energía, se halla la presión y energía interna. (Pierazzo & Collins, 2004)

Los componentes de la ecuación de la conservación de energía vienen dados por:

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_j^N m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) v_{ij} \nabla_i W_{ij} \quad (22)$$

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ij} \mu_{ij} + \beta \mu_{ij}^2}{\bar{\rho}_{ij}} & r_{ij} v_{ij} < 0 \\ 0 & r_{ij} v_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

En donde  $\mu_{ij}$  esta definido de la siguiente forma:

$$\mu_{ij} = \frac{r_{ij}v_{ij}}{|r_{ij}|^2 + \varepsilon}, \quad \bar{c}_{ij} = \frac{c_i + c_j}{2}, \quad \bar{\rho}_{ij} = \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \quad (24)$$

$P$  = presión.

$e$  = unidad de masa.

$P_i$  = viscosidad artificial.

$c$  = velocidad del sonido.

$\rho, \beta, \varepsilon$  = parámetros escalares.

### **Ecuación de estado**

La ecuación de estado relaciona la presión, el volumen específico y la energía interna del medio. Los estados finales de los materiales chocados se representan generalmente gráficamente en gráficos de presión-volumen o en gráficos de velocidad de choque-velocidad de partículas. (Pierazzo & Collins, 2004)

La ecuación de estado es única para cada material; incluyendo todas las complejidades de su estructura atómica, molecular y cristalina. Así mismo, describe su estado termodinámico en una amplia gama de presiones, temperaturas y volúmenes o densidades específicos. (Pierazzo & Collins, 2004) La ecuación de estado más simple conocida es la de un gas perfecto:

$$P = \rho RT \quad (25)$$

Donde:

$P$  = presión.

$T$  = temperatura.

$R$  = constante del gas por unidad de masa.

$\rho$  = densidad del gas.

Sin embargo, el comportamiento de sólidos y líquidos comprimidos por ondas de choque es mucho más complejo debido a la fuerte interacción entre los del medio. En consecuencia, se requiere una ecuación de estado mucho más compleja. (Pierazzo & Collins, 2004)

La ecuación de estado Jones-Wilkins-Lee (JWL) está determinada por la ecuación 26 y esta define el comportamiento tanto de la explosión y la expansión del explosivo en relación con su presión-volumen-energía. (Yenes et al., 2016)

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e^{(-R_1 v)} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) e^{(-R_2 v)} + \frac{\omega E}{v} \quad (26)$$

Donde:

$dF$  = relación de volumen.

$A, B, R_1, R_2$  y  $W$  = constantes del material.

### **Deviatoric Stresses y longitud de suavizado.**

Es obtenida mediante la relación constitutiva de los fluidos y está limitada por la superficie de falla generalizada, definida como:

$$(\sqrt{3J_2})_{fail} = Y_{fail}(p^*, \theta, \dot{\epsilon}) = Y_c(p^*) r_3(\theta) F_{rate}(\dot{\epsilon}) \quad (27)$$

$$Y_c(p^*) = f_c \left[ A \left( p^* - p_{spall}^* F_{rate}(\dot{\epsilon}) \right)^N \right] \quad (28)$$

Donde:

$f_c$  = resistencia a la compresión uniaxial.

$A$  y  $N$  = constantes de los materiales.

$p_h$  = presión hidrostática.

$p^* = p_h / f_c$ , presión normalizada.

$p_{spall}^* = f_t/f_c$  donde  $f_t$  es la resistencia uniaxial a la tracción.

$F_{rate}(\dot{\epsilon})$  representa el factor de amplificación dinámica (DIF) en función de la tasa de deformación  $\dot{\epsilon}$ .

$J_2$  representa la segunda invariante del deviatoric stress tensor.

La longitud de suavizado en cada iteración y paso del ciclo computacional debe ser actualizada, acorde a la ecuación 29.

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{1}{d} \frac{h}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (29)$$

### Fuerzas de las Partículas.

Se obtiene mediante la conservación de momento la cual es aproximada con la función de Kernel.

$$\frac{Dv_i}{Dt} = -\sum_j^N m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (30)$$

De la ecuación mostrada se derivan las respectivas fuerzas de las partículas.

$$F_i^{pressure} = -\sum_j m_j \frac{\rho_i + \rho_j}{2\rho_j} \nabla W(r_{ij}, h) \quad (31)$$

$$F_i^{viscosity} = \mu \sum_j m_j \frac{v_i - v_j}{2\rho_j} \nabla^2 W(r_{ij}, h) \quad (32)$$

Donde:

$F$  = fuerza

### Aceleración de las partículas.

Es obtenida mediante las fuerzas halladas y la masa de cada partícula con la siguiente ecuación.

$$a_i = 1 / \rho_i (F_i^{pressure} + F_i^{viscosity} + F_i^{external}) \quad (33)$$

Donde:

$a$  = aceleración.

$F_{external}$  = fuerzas debidas a contacto.

### **Velocidad de las Partículas.**

Se obtiene al integrar la ecuación de la aceleración explícitamente en el tiempo.

### **Posición de las Partículas.**

Se requiere de una nueva integración, en base a la velocidad de la partícula respecto al tiempo, para su obtención. En este caso se obtendrá la nueva posición de la partícula para un tiempo  $t_{i+1}$ , cerrando el ciclo y empezando nuevamente para un tiempo  $t_{i+1}$ . (Stanislaw & Leszek, 2015)

El método SPH es usado en este trabajo para la modelación de la carga explosiva (pentolita) mientras que, el método de Lagrange es utilizado para la modelación del elemento estructural (columna).

### **Análisis de regresión multivariable**

El análisis de regresión multivariable o también conocida como el análisis de regresión lineal múltiple es una técnica que investiga la relación de dos tipos de variables entre sí, que se las conoce como variables dependientes e independientes, o también toman el nombre de variables explicadas y variables explicativas. La primera describe el estado verdadero fundamentada en una base de datos mientras que la segunda explica estos datos por medio de relaciones de dependencia entre las dos variables. (RYTEWIKI, s.f.)

La regresión multivariable está definida por la siguiente ecuación:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_a + \beta_2 X_b + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (34)$$

Donde:

$Y$  = variable dependiente.

$\alpha$  = intersección de  $Y$ .

$\beta_1, \beta_2, \beta_k$  = coeficientes de regresión.

$X_1, X_2, X_k$  = variables independientes.

$\epsilon$  = error.

Se conoce como lineal debido a que la ecuación (34) es una función lineal de parámetros desconocidos  $\beta_1, \beta_2, \beta_k$ . Estos parámetros se comprenden como  $\beta_j$  que mide el cambio que se espera en  $Y$  causado por cambio unitario en  $X_j$  cuando las demás variables de la regresión siguen fijas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que muchas veces en la práctica hay análisis que requieren de modelos de mayor orden, por ejemplo cuadráticas, para que se explique el comportamiento de  $Y$  en función de variables regresoras. (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

El propósito del análisis de regresión multivariable (MVRA) es aprender más sobre la relación entre varias variables independientes o predictoras y una variable dependiente o de criterio. El objetivo del análisis de regresión es determinar los valores de los parámetros, los cuales permiten que la función se ajuste de una mejor manera a un conjunto de observaciones de datos proporcionados. Cuando hay más de una variable independiente, se utiliza MVRA para obtener la ecuación de mejor ajuste. MVRA resuelve conjuntos de datos realizando un método de ajuste por mínimos cuadrados. Construye y

resuelve ecuaciones simultáneas formando la matriz de regresión y resolviendo el coeficiente usando el operador de barra invertida. (Singh et al., 2008)

El objetivo de cualquier análisis es extraer la mayor información posible para tener una estimación precisa, existen varios tipos de análisis de regresión que pueden ser utilizados y estos dependen del tipo de distribución de la variable de respuesta (Y): modelo de regresión lineal, regresión logística, análisis log-lineal, regresión de Cox. Por medio de cualquiera de estos modelos se busca predecir el resultado (Y) en función de las variables de incidencia (Xi), también nos permiten conocer el impacto de múltiples variables en un mismo escenario. En este caso nos enfocamos en la regresión lineal la cual estima los coeficientes de la ecuación lineal, involucrando una o más variables de incidencia (Xi) que predicen de mejor manera la variable de respuesta (Yi) que debe ser cuantitativa. (Alexopoulos, 2010)

### ***Pasos del análisis de regresión multivariable***

Los pasos necesarios para realizar el análisis de la regresión lineal multivariable son los siguientes:

#### **Característica de selección:**

Como primer procedimiento se selecciona las características y variables, dicha selección se la conoce comúnmente como selección de funciones, en este paso se escogen las variables que más impacto causan en el modelo para su mejor construcción.

#### **Encontrar los coeficientes de regresión $\beta$ :**

Para hallar los coeficientes de regresión se utiliza la siguiente ecuación:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (35)$$

$$X = 1 + X_1 + X_2 + \dots + X_i \quad (36)$$

Donde:

$\hat{\beta}$  = matriz de coeficientes de regresión

$X$  = matriz compuesta por las variables independientes

$y$  = matriz compuesta por las variables dependientes

Cabe aclarar que en la matriz  $X$  el número de filas es el número de mediciones y el número de columnas es el número de variables independientes más uno.

### **Establecer la hipótesis:**

Con dicha función se pronostica un error. Es decir, en caso de que la hipótesis se aleje de valores reales. La hipótesis que se nombra anteriormente es el valor anticipado de la variable/característica. (Korwar, 2020)

En este tipo de regresiones, se puede empezar por plantear la hipótesis nula que indica que las variables explicativas no influyen sobre la variable dependiente y se fórmula así:

$$H_0; \beta_2 = \beta_3 = 0 \quad (37)$$

Esta indica que los verdaderos valores de  $\beta_2, \beta_3$  son iguales a nulo. Esto sugeriría que, los valores de  $X_1, X_2$  de la ecuación (34) no influyen en la variable  $y$ .

La hipótesis alternativa indica lo contrario de la hipótesis nula, donde las variables explicativas influyen directamente sobre la variable dependiente y se formula así:

$$H_1; \text{al menos uno entre } \beta_2, \beta_3 \neq 0 \quad (38)$$

Para esta hipótesis mencionada los verdaderos valores de  $\beta_2, \beta_3$  al menos uno es diferente de cero. Esto sugeriría que, los valores de  $X_1, X_2$  de la ecuación (34) influyen directamente en la variable  $y$ . (Minitab, 2019)

### **Análisis de varianza o prueba F**

La prueba F es fundamentado en los resultados de cuadrados medios que nos da una estimación de la varianza de los datos que muestra los grados de libertad que se utiliza para calcular.

#### **F-test**

Para hacer uso de la prueba F se requiere añadir las varianzas correctas en la relación para determinar si las medias de los grupos son iguales, la fórmula de F es una proporción (Minitab, 2019):

$$F = \frac{\text{Variación entre las medidas de las muestras}}{\text{variación dentro de las muestras}} \quad (39)$$

**Tabla 1**

*Nivel de significancia y nivel de confianza*

<b>Notación</b>	<b>Nivel de significancia estadística</b>	<b>Nivel de confianza</b>
***	1%	99%
**	5%	95%
*	10%	90%

*Nota:* Usado para las pruebas de hipótesis e intervalos de confianza.

#### **Regla de decisión**

Mediante un análisis basado en la tabla 1, si tenemos un valor crítico de F menor al 1% se rechaza la  $H_0$ , ya que el verdadero valor de  $B_2$  y  $B_3$  son iguales a 0, por lo tanto si existe una explicatividad de  $X_2$  y  $X_3$  en base a  $Y$ , se descarta al nivel de significancia del 1% explicándonos que la probabilidad es menor al 1%.

#### **Confiabilidad de los factores $\beta$ :**

Para que la función hallada sea confiable es necesario analizar el parámetro beta mediante fórmulas que determinan el error de dichos parámetros.

- a) Como primer paso se procede a evaluar la función con los factores beta obtenidos.
- b) A continuación, se proceden a hallar la suma de totales cuadrados mediante la suma de cuadrados de regresión y la suma de cuadrados de error.

$$S_{yy} = SC_R + SC_e \quad (40)$$

Donde:

$S_{yy}$  = suma total de cuadrados.

$SC_R$  = suma de cuadrados de regresión.

$SC_e$  = suma de cuadrados de error.

La suma de cuadrados de regresión se halla mediante la ecuación:

$$SC_R = \hat{\beta}'X'y - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \quad (41)$$

Donde:

$\sum_{i=1}^n y_i$  =sumatoria de función evaluada con los factores de regresión hallados  $\beta$ .

$n$  = número de mediciones.

La suma de cuadrados de error se calcula de la siguiente forma:

$$SC_E = y'y - \hat{\beta}'X'y \quad (42)$$

Donde:

$\hat{y}$  =matriz de resultados de la función de regresión evaluada.

- c) Posteriormente se procede a realizar la tabla ANOVA para hallar la significancia del modelo

**Tabla 2***Tabla ANOVA*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$	Valor-p
Regresión	$SC_R$	$k$	$CM_R = \frac{SC_R}{k}$	$CM_R/CM_E$	$Pr(F > F_0)$
Error o residuo	$SC_E$	$n - k - 1$	$CM_E = \frac{SC_E}{n - k - 1}$		
Total	$S_{yy}$	$n - 1$	$CM_{total} = \frac{S_{yy}}{n - 1}$		

*Nota:* Tomado de *Análisis y Diseño de Experimentos* (p. 385), por (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

Donde:

$k$  = número de variables independientes.

$n$  = número de mediciones.

$Pr(F > F_0)$  = inverso de la distribución de la probabilidad.

- d) Por último, se procede a evaluar la función mediante los coeficientes de determinación mediante las siguientes fórmulas:

Coefficiente de determinación:

$$R^2 = \frac{SC_R}{SC_{yy}} = 1 - \frac{SC_E}{S_{yy}} \quad (43)$$

Donde para que la función de regresión multivariable sea de confianza este valor debe ser aproximado a 1.

Coefficiente de determinación ajustada:

$$R^2_{aj} = \frac{CM_{total} - CM_E}{CM_{total}} = 1 - \frac{CM_E}{CM_{total}} \quad (44)$$

Donde para que la función de regresión multivariable sea de confianza este valor debe ser mayor a 0.7.

Coefficiente de correlación:

$$R = \sqrt{R^2} \quad (45)$$

Donde para que la función de regresión multivariable sea de confianza este valor debe ser aproximado a 1.

### ***Prueba de hipótesis individual***

#### **Error estándar**

El error estándar es la variabilidad promedio de los coeficientes estimados y se extrae de la matriz de varianzas, covarianza la raíz de la diagonal principal:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1m} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nm}^2 \end{pmatrix} \quad (46)$$

En la diagonal principal se encuentran las varianzas y fuera de la misma se encuentra las covarianzas.

#### **Estadístico t**

A continuación, se halla el estadístico t con la siguiente ecuación que es una razón entre:

$$\text{Estadístico } t = \frac{\beta}{\text{error estándar}} \quad (47)$$

Mientras el valor hallado sea menor es mejor para la ecuación siendo lo óptimo un valor menor al 1%, que significa que el valor va a ser significativo al 5%. Al valor se lo evalúa siempre en su inmediato superior cada 5%.

### Probabilidad

Se lo halla con la función de distribución t relacionando el valor del estadístico t, el número de observaciones y el número de variables independientes.

Posteriormente se evalúa los parámetros  $\beta$  mediante la hipótesis nula igualando a 0 y la hipótesis alternativa con cualquier valor distinto a 0.

$$H_0: \beta_i = 0 \quad (48)$$

$$H_1: \beta_i \neq 0 \quad (49)$$

Donde:

$H_0$  = hipótesis nula.

$H_1$  = hipótesis alternativa.

Donde si la hipótesis nula es verdadera el valor del  $\beta$  evaluado es 0.

### Análisis de significancia estadística

Son intervalos de confianza, siendo uno superior y otro inferior que se hallan de la siguiente manera:

$$\text{intervalo inferior} = \beta_i - \text{error estándar} * t \text{ crítico} \quad (50)$$

$$\text{intervalo superior} = \beta_i + \text{error estándar} * t \text{ crítico} \quad (51)$$

Donde:

$t$  crítico = función de distribución t inversa relacionando la probabilidad, número de observaciones y el número de parámetro del modelo.

Una manera de comprobar que la ecuación tiene una alta probabilidad de confianza es fijándose que los signos de los parámetros  $\beta$ , estadístico t y los intervalos superiores e inferiores sean iguales.

### ***Evaluación del modelo final de regresión multivariable***

Se evalúa un modelo de regresión para verificar su rendimiento. Para dicho proceso se proponen dos categorías principales con diversas medidas: de discriminación y de calibración. Sin tomar en cuenta el objetivo del modelo, las medidas antes mencionadas se derivarán de los datos de origen, y de preferencia se estimarán utilizando técnicas de remuestreos, conocido también como validez interna. Con el remuestreo, se puede cuantificar en los coeficientes de regresión su grado de exceso de optimismo y, en consecuencia, la cantidad de reducción necesaria para corregirlo. No obstante, si lo que se desea es evaluar la validez externa del modelo (que cabe mencionar es un aspecto crucial en modelos de predicción), estas medidas del rendimiento se deberán estimar con poblaciones diferentes. Lamentablemente, esto no sucede en la mayoría de casos debido a la falta de presupuesto. (Nuñez et al., 2011)

## Capítulo III

### Metodología

#### Estado del arte

Lo que se aspira al ocupar el estado del arte es abarcar la mayor cantidad de información relevante de diferentes artículos científicos sobre el efecto de la carga explosiva en columnas H.A. para actualizarse con los nuevas técnicas, metodologías y teorías referentes al tema.

La clasificación y análisis de la bibliografía se lo realiza mediante el uso de herramientas computacionales para construir un orden coherente de la información con la cual se pretende desarrollar la introducción de un artículo científico.

#### ***Recolección y clasificación de base de datos***

Como primer paso para la creación de la matriz de estado del arte se seleccionaron 82 artículos, siendo este un primer filtro. Todos estos artículos son relacionados con explosiones en columnas y que sean parte de una revista con un índice de impacto mínimo de Q3. A continuación, se procedió a aplicar un segundo filtro teniendo en cuenta las características de diseño de las columnas, parámetros de detonación, siendo seleccionados solo aquellos que tengan características semejantes a las que tiene este estudio; con lo cual se obtuvo un total de 42 artículos a analizar.

Para facilitar el manejo de información se utilizó el programa Excel y con la ayuda de este se procedió a organizar la matriz de estado del arte, considerando los siguientes puntos más relevantes:

- Autor: Parte fundamental en la que se da crédito a la persona que escribió el artículo, además de ser la responsable de este.
- Tipo de enfoque: Son tres los enfoques que se consideraron principales para el análisis.

- Experimental: se rige a ensayos en campo.
  - Computacional: uso de herramientas computacionales como el caso de Autodyn, LS- DYNA, etc.
  - Analítico: uso de algoritmos en base a la teoría de Single Degree of Freedom.
- Título
  - Objetivos: metas que proponen alcanzar al final del estudio y que se respalda en los resultados.
  - Características: aspectos relevantes de cada investigación como los parámetros de diseño de las columnas, propiedades físicas y mecánicas del hormigón y acero, tipo de carga explosiva, así como su masa y geometría, distancia del explosivo y carga axial en caso de ser aplicada.
  - Metodología analítica: se mencionan en este apartado los métodos utilizados para analizar el comportamiento dinámico como por ejemplo a través de SDOF, Monte Carlo Simulation (MCS), P residual, etc.
  - Metodología experimental: en este apartado se indica las condiciones de los experimentos realizados para comprobar en la vida real el comportamiento de la columna ante explosivos; entre los cuales se encuentra método de flexión de tres y cuatro puntos para determinar las deformaciones por carga axial y los datos de las cargas utilizadas, simulación de explosiones mediante brazo de martillo o maquinaria de impulso hidrodinámico además de la instrumentación para medir las deformaciones como LVDTs, calibres extensométricos y sensores SAs con discos piezométricos PZT.
  - Metodología computacional: en este apartado se extrae la información de los programas utilizados como LS-Dyna, Abaqus, Autodyn, etc., así como los datos necesarios para el correcto funcionamiento de la simulación como por ejemplo el

método utilizado para modelar el concreto sea mediante SPH, Lagrange, etc. y el tipo de material utilizado. De igual manera el tamaño de la malla, las condiciones iniciales de la columna y condiciones de borde, además del tipo de erosión del concreto.

- Resultados: se recogen los más relevantes para el presente estudio para poder utilizarlos para análisis y comparación.

### ***Planteamiento de matriz de estado del arte***

A continuación, se presenta la primera etapa de elaboración del estado del arte en donde se realiza la recopilación de lo esencial de cada artículo científico en una matriz en Excel, la cual se presenta en el anexo 1.

Como se puede observar en la matriz de Excel, indicada en el anexo 1, se identificó las diferentes metodologías mediante “X” siendo: Experimental (XX), Computacional (X) y Analítico (XXX). El motivo por el cual se lo caracterizó de esa forma fue para que se facilite la clasificación de los resultados mediante Visio, herramienta que se detallará a continuación.

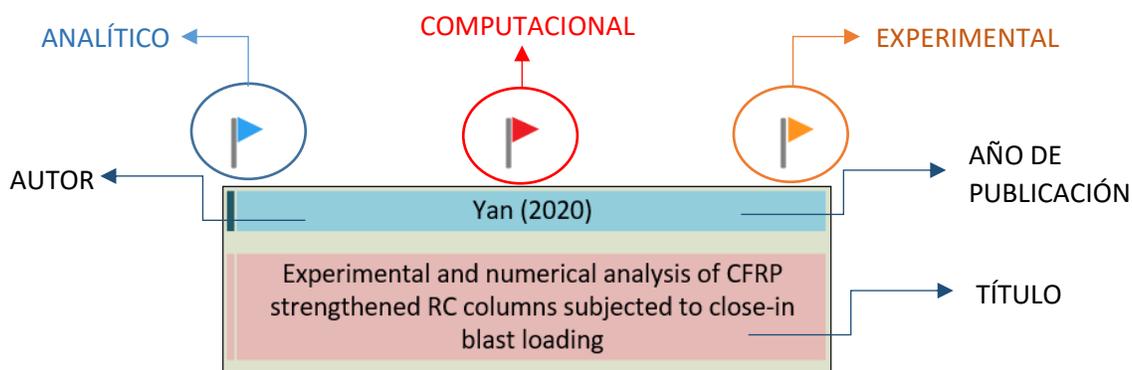
### ***Organización de información en Visio***

Según la Esarte (2020), “*Visio es el software de Microsoft con el que vas a poder crear flujogramas, diagramas, organigramas, planos de planta, diseños de ingeniería y compartirlos con otros usuarios*”. Dicho programa tiene la ventaja de poder sincronizarse con las demás herramientas de la misma compañía como por ejemplo Word, Excel, etc.

Debido a lo mencionado en la sección anterior se realizó la codificación de las metodologías: analítico, computacional y experimental mediante asignaciones de letras “X” y en Visio se pudo asignar estos parámetros de cada artículo científico como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 5**

*Extracto de matriz de compilación de datos de artículos en Excel*



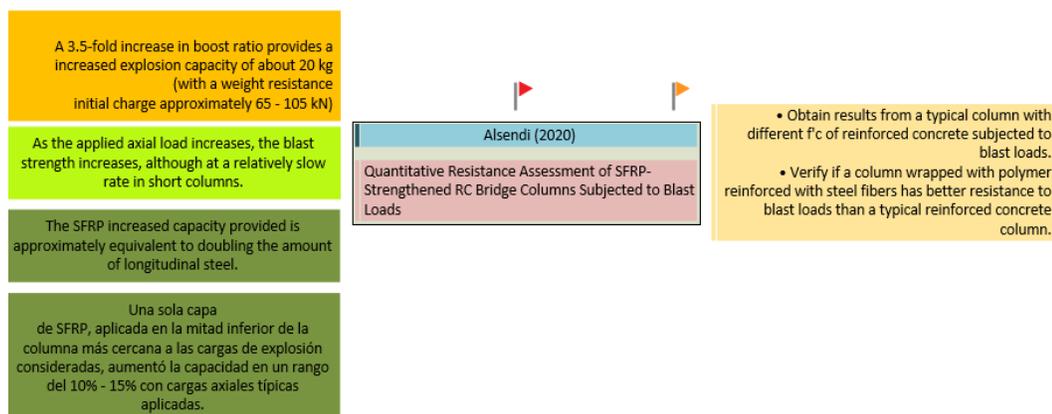
Como se observa en la figura 5 se encuentra el título, autor, año de publicación del artículo y unos banderines de colores, los cuales corresponden a:

- Naranja: experimental
- Rojo: computacional
- Azul: analítico

A continuación, se presenta en la figura 6 el planteamiento preliminar de uno de estos artículos ya integrando los demás parámetros importantes como son los objetivos y los resultados.

**Figura 6**

*Clasificación de un artículo y sus componentes en Visio*



Como se observa en la figura 6, en el lado derecho se encuentran los objetivos y en el lado izquierdo los resultados más relevantes para este estudio. Se evidencia que los resultados están diferenciados por colores. Esto corresponde a una clasificación que está en función de distintos parámetros como puede ser, la carga axial, el daño, el modelo computacional, entre otros. La clasificación completa utilizada se muestra en la figura 7.

## Figura 7

### *Parámetros para clasificación de resultados*



## Metodología computacional

La simulación computacional es un proceso que debe ser seguido con mucha cautela ya que un error podría generar un mal funcionamiento de este generando modelos erróneos, o en el peor de los casos invalidando su funcionalidad. Los pasos a seguir para realizar la simulación computacional son los que se mencionan a continuación.

### ***Elaboración 3D de la columna, cono para la carga explosiva y reforzamientos.***

Mediante el software SolidWorks se genera el archivo base. sat el cual contiene los sólidos que conforman la columna y el cono con sus respectivas medidas, para

posteriormente importarlo mediante el uso del software ANSYS 2019R3. Por otra parte, los reforzamientos son generados mediante el uso del software AutoCAD, con la configuración deseada para el reforzamiento transversal, es decir tipo rombo o vincha, como se muestra en la figura 8. Las medidas de las probetas y configuración de reforzamiento a simular son las siguientes:

**Tabla 3**

*Medidas de probetas y configuración de reforzamientos*

<b>Configuración Probetas Simuladas Computacionalmente</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Longitud</b>	<b>Ancho</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Refuerzo transversal</b>
<b>N°</b>	<b>L (cm)</b>	<b>a (cm)</b>	<b>b(cm)</b>	<b>Tipo</b>
1	250	30	30	Vincha
2	250	30	30	Vincha
3	250	40	40	Rombo
4	250	40	40	Rombo
5	250	40	40	Rombo
6	250	30	30	Vincha
7	250	30	30	Rombo
8	250	50	50	Rombo
9	250	40	40	Rombo
10	250	40	40	Rombo
11	250	50	50	Rombo
12	250	50	50	Rombo
13	250	30	30	Vincha
14	250	40	40	Rombo
15	250	30	30	Vincha
16	250	30	30	Vincha
17	250	50	50	Rombo
18	250	50	50	Rombo
19	250	30	30	Rombo
20	250	40	40	Rombo
21	250	50	50	Rombo
22	250	40	40	Rombo
23	250	50	50	Rombo
24	250	40	40	Rombo
25	250	30	30	Vincha

26	250	50	50	Rombo
27	250	50	50	Rombo
28	250	40	40	Rombo
29	250	50	50	Rombo
30	250	30	30	Vincha
31	250	40	40	Rombo
32	250	30	30	Vincha
33	250	50	50	Rombo

Las dimensiones del cono para la carga explosiva se obtuvieron mediante la relación de la masa del explosivo y la densidad, con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{h}{D} = 0.625 \quad (52)$$

$$\frac{h}{2r} = 0.625 \quad (53)$$

$$h = 2r * 0.625 \quad (54)$$

$$V = \frac{\pi r^2 h}{3} \quad (55)$$

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (56)$$

Las ecuaciones (54) y (56) son reemplazadas en la ecuación (55)

$$\frac{m}{\rho} = \frac{\pi r^2 * 2r * 0.625}{3} \quad (57)$$

Finalmente se despeja  $r$  de la ecuación (57) dejando expresado en función de  $\rho$  y  $m$ .

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 * m}{2 * 0.625 * \rho * \pi}} * 10 \quad (58)$$

Donde:

$h$  = altura del cono

$D$  = diámetro del cono

$r$  = radio del cono

$V$  = volumen del cono

$m$  = masa de la carga explosiva

$\rho$  = densidad de la carga explosiva

Aplicando las ecuaciones indicadas se obtiene el radio y posteriormente la altura del cono con lo cual se definió las dimensiones para las diferentes cargas explosivas como se muestra a continuación:

**Tabla 4**

*Dimensiones del cono*

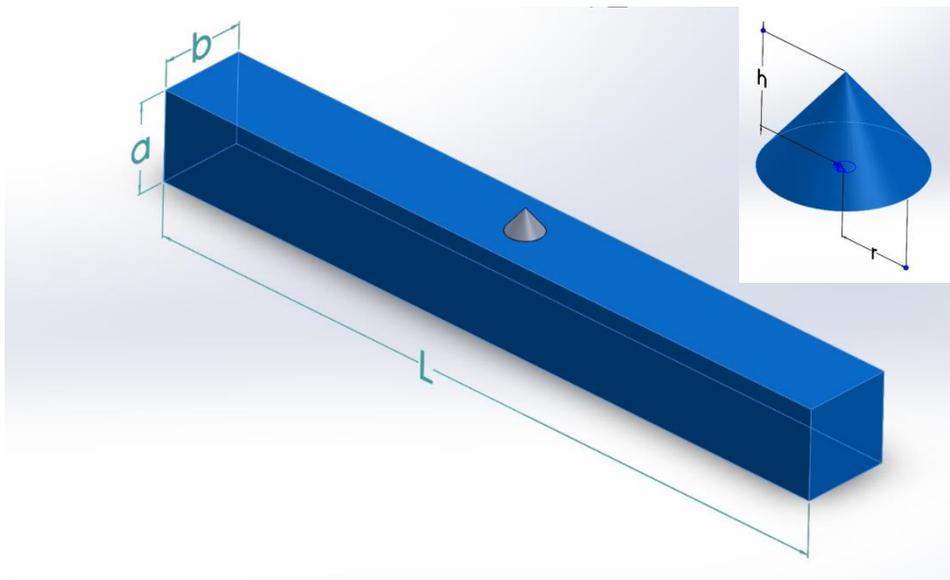
<b>Dimensiones del Cono</b>			
<b>Probeta</b>	<b>Carga Explosiva</b>	<b>Radio</b>	<b>Altura</b>
<b>N°</b>	<b>m (g)</b>	<b>r (mm)</b>	<b>h (mm)</b>
1	1140	81.65	102.06
2	1140	81.65	102.06
3	1140	81.65	102.06
4	2280	102.87	128.59
5	3420	117.76	147.20
6	910	75.74	94.68
7	450	59.89	74.87
8	3420	117.76	147.20
9	2280	102.87	128.59
10	2280	102.87	128.59
11	2280	102.87	128.59
12	3420	117.76	147.20
13	1140	81.65	102.06
14	2280	102.87	128.59
15	680	68.73	85.91
16	1140	81.65	102.06
17	2280	102.87	128.59
18	3420	117.76	147.20
19	1140	81.65	102.06
20	2050	99.29	124.11
21	3420	117.76	147.20
22	2960	112.22	140.28
23	3420	117.76	147.20
24	2960	112.22	140.28
25	1140	81.65	102.06

26	2730	109.24	136.55
27	2960	112.22	140.28
28	2280	102.87	128.59
29	2280	102.87	128.59
30	1140	81.65	102.06
31	1820	95.43	119.28
32	1590	91.22	114.03
33	4560	129.61	162.01

Se presenta en la figura 8, el esquema de la columna con el cono y sus respectivas dimensiones, así también, el reforzamiento transversal adicional tipo rombo y tipo vincha; que fue modelado en SolidWorks basado en los detalles mostrados en la tabla 3.

### Figura 8

*Modelo base generado en SolidWorks*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

### **Explicit Dynamics Engineering Data.**

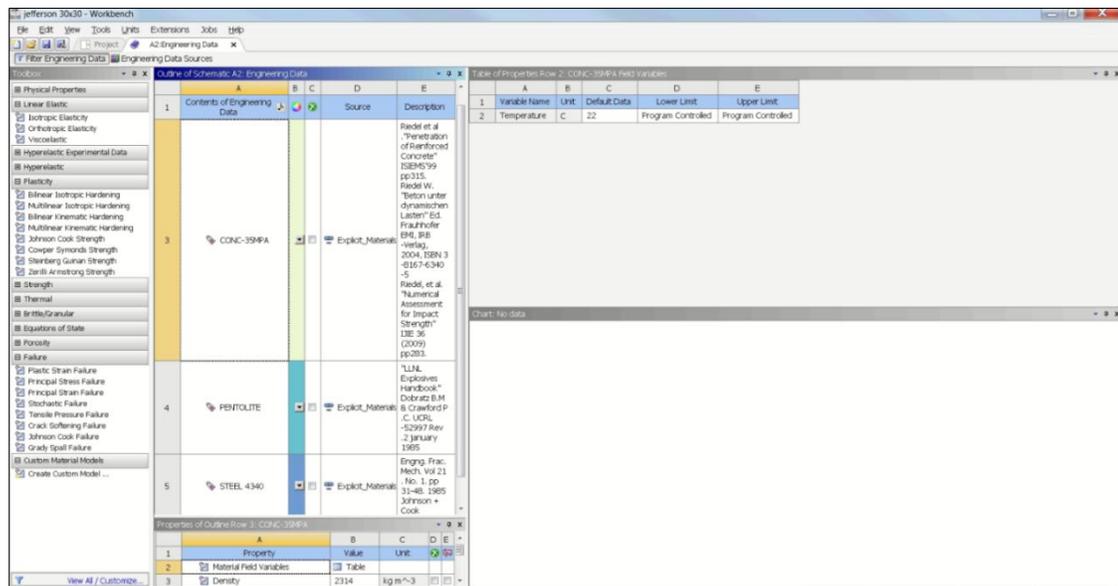
En el programa computacional ANSYS 2019R3 se usa el paquete Explicit Dynamics el cual sirve de interfaz con el paquete Autodyn.

En el Explicit Dynamics sección Engineering Data se define y se carga los materiales a usar en la simulación.

- CONC-35MPA. Contiene las propiedades del hormigón.
- PENTOLITE. Posee las propiedades del material del que se compone la carga explosiva
- STEEL 4340. Posee las propiedades del acero 4340.

## Figura 9

Ventana de Explicit Dynamics Engineering Data



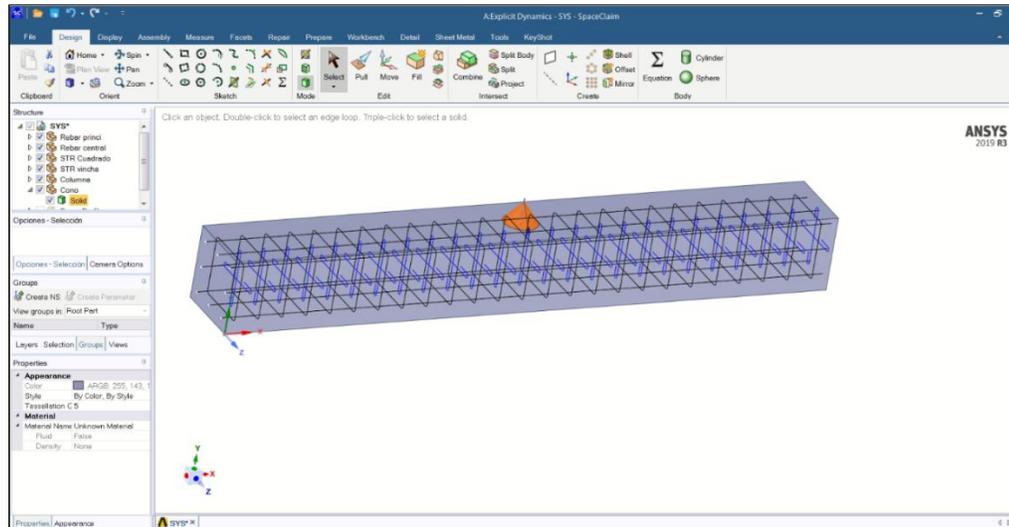
Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench

### Explicit Dynamics Geometry.

Una vez definido los materiales se procede al ensamble de la columna con sus refuerzos respectivamente, así también el cono que contendrá el material explosivo, para ello se hace uso de la opción Explicit Dynamics Geometry.

**Figura 10**

*Ventana de Explicit Dynamics Geometry*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

Como se observa en la imagen 9, en este paso se importan y se crean los siguientes elementos:

- Columna y cono generado en SolidWorks con la extensión. sat.
- El reforzamiento de acero generado en AutoCAD con extensión .dwg.
- Creación de los elementos beam con las secciones correspondientes para cada refuerzo longitudinal y transversal.

***Explicit Dynamics Model.***

Definido los materiales y ensamblado los elementos, se procede a la configuración de los parámetros mediante el Explicit Dynamics Model los cuales se describen a continuación:

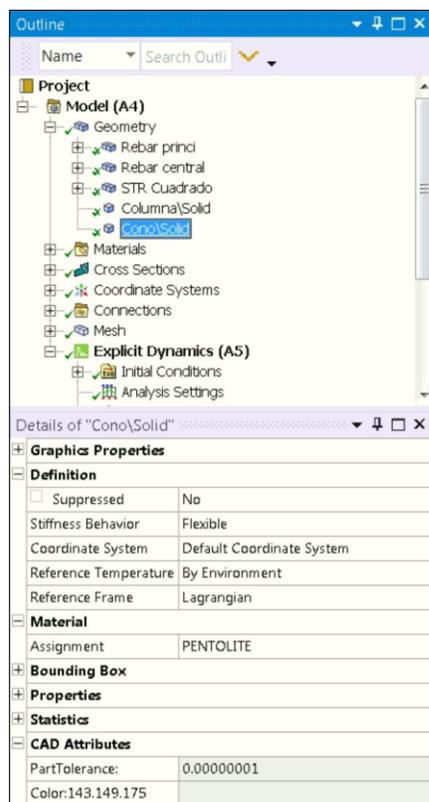
## Geometry

En la opción Geometry se procede con la asignación del material correspondiente a cada elemento, es decir:

- Columna. Asignación CONC-35MPA
- Cono. Asignación PENTOLITE
- Refuerzo longitudinal y transversal. Asignación STELL 4340

### Figura 11

#### *Asignación Cono\_Pentolite*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

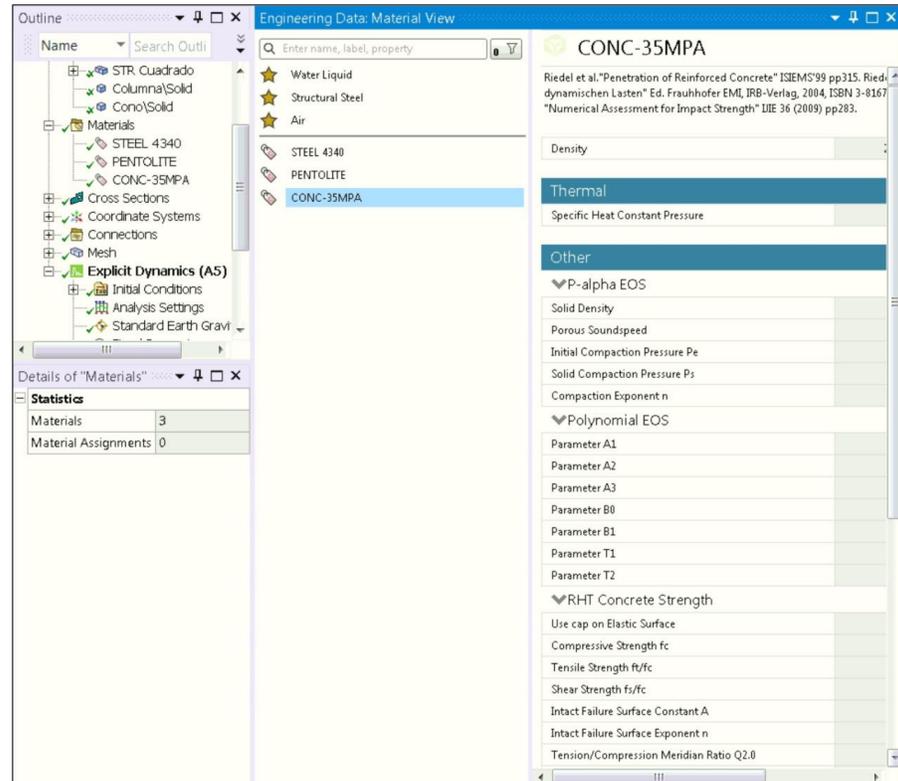
## Materials.

Se verifica que los materiales a usar sean los correspondientes y estén asignados.

En el análisis se verifica que este la PENTOLITE, CONC-35MPA y STELL 4340.

**Figura 12**

*Verificación de materiales PENTOLITE, CONC-35MPA y STEEL 4340*



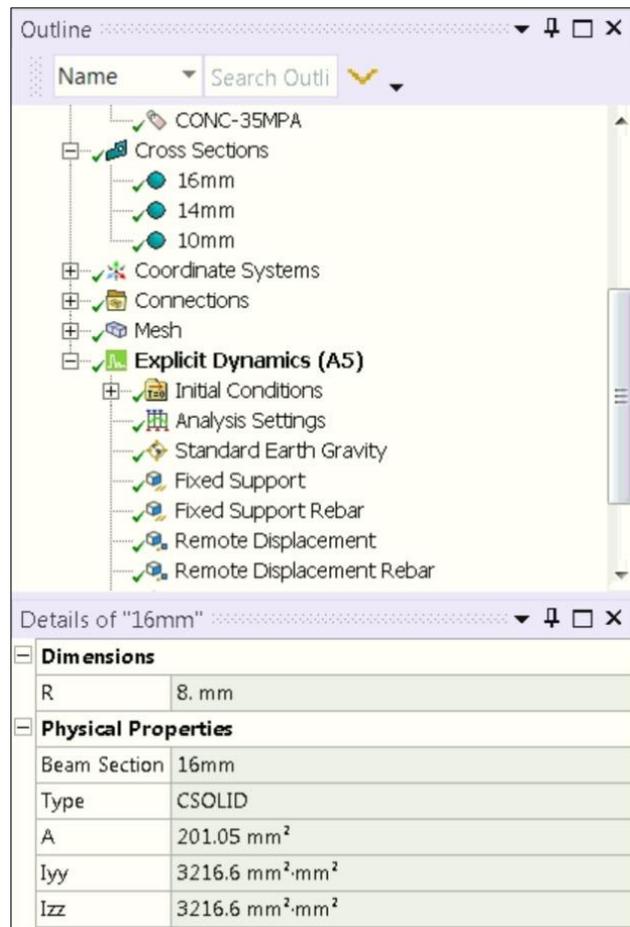
*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

### **Cross sections.**

Se verifica que estén correctamente las dimensiones de los elementos beam, que serán los reforzamientos longitudinales y transversales de la columna.

**Figura 13**

*Verificación de dimensiones de elementos beam*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

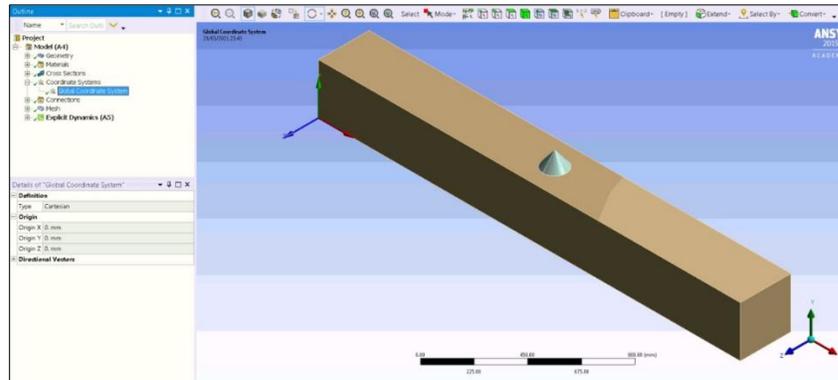
### **Cordinate Systems.**

Se establece los ejes de coordenadas globales, el cual servirán de referencia para definir lo siguiente:

- Dirección de la gravedad.
- Punto de detonación.
- Soportes fijos.
- Presión.

**Figura 14**

*Asignación del sistema de coordenadas globales*



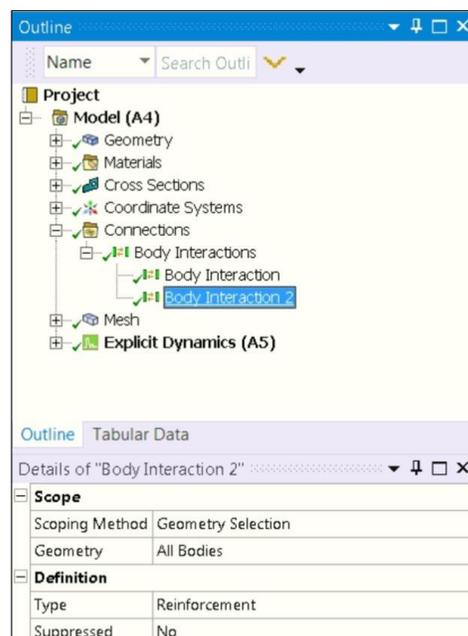
*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

### Connections.

En esta opción se configura la interacción entre los elementos, en este caso entre el concreto y el acero, haciendo que ambos elementos columna – reforzamientos trabajen monolíticamente.

**Figura 15**

*Ventana connections*



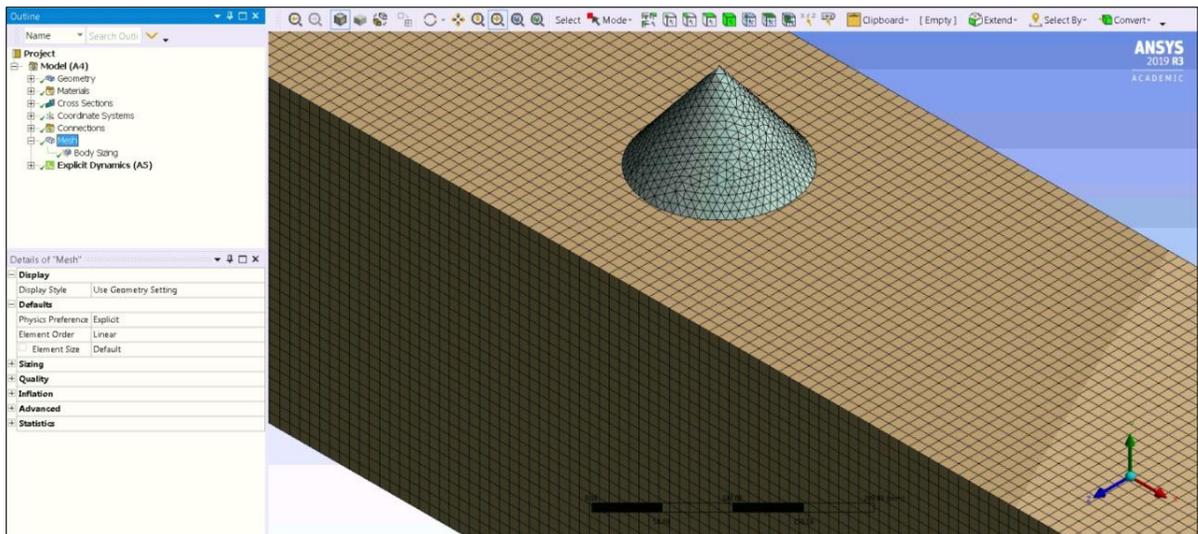
*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

## Mesh.

Para la generación de la malla es importante definir el tamaño de la misma, para las simulaciones realizadas se asumió un mallado de 10 mm, como se indica en la figura 16.

**Figura 16**

*Malla 10x10x10mm*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

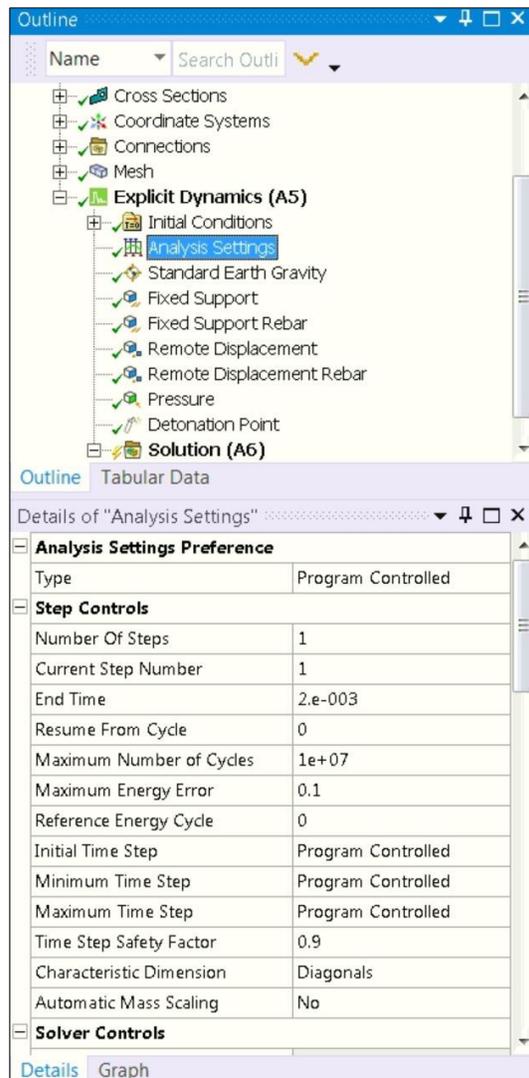
## Explicit Dynamics (A5).

En esta sección vamos a ver desplegadas opciones en las cuales se configura los siguientes parámetros:

**Analysis Settings.** Se introduce el tiempo de simulación que se requiere en milisegundos (ms).

Figura 17

Ventana Analysis settings

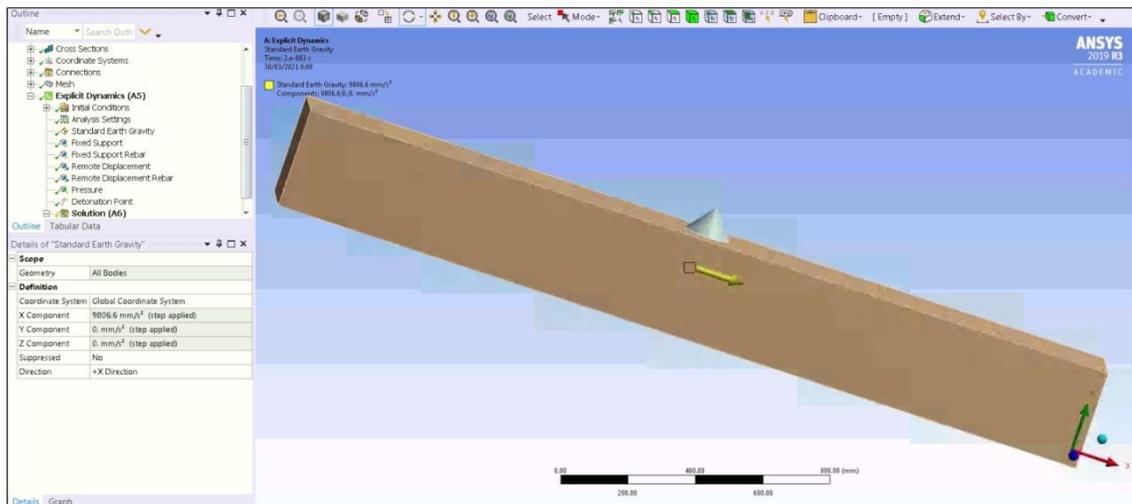


*Nota:* Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench

**Standard Earth Gravity.** Se coloca el valor de la gravedad y la dirección en la que se aplica, en función del sistema de coordenadas globales asignadas previamente.

**Figura 18**

*Asignación de valor y dirección de la gravedad*

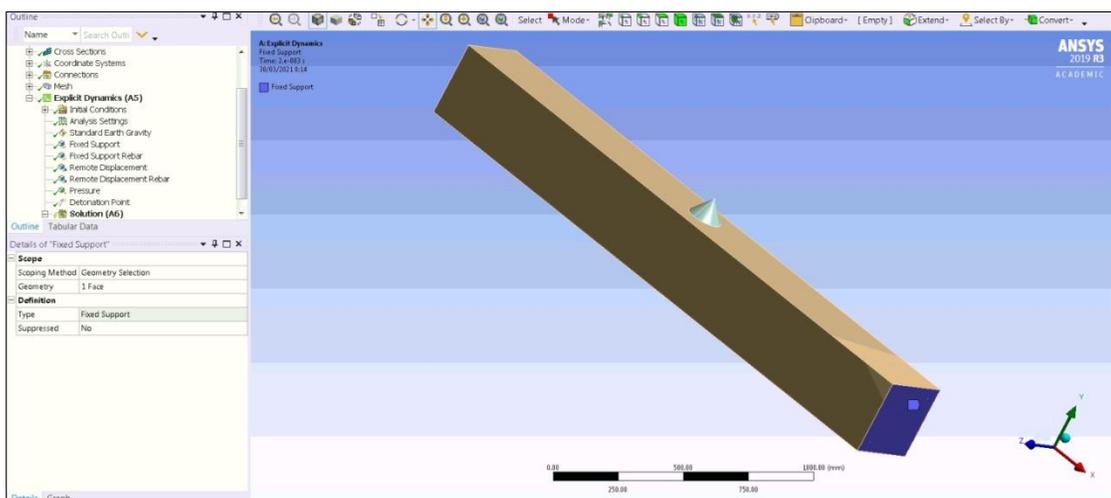


*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

**Fixed Support.** Se configura el apoyo en la parte inferior, el cual simula el empotramiento para el concreto. Esto se observa en la figura 19, en donde dicho empotramiento se presenta de color azul.

**Figura 19**

*Asignación del apoyo en la parte inferior de la columna*

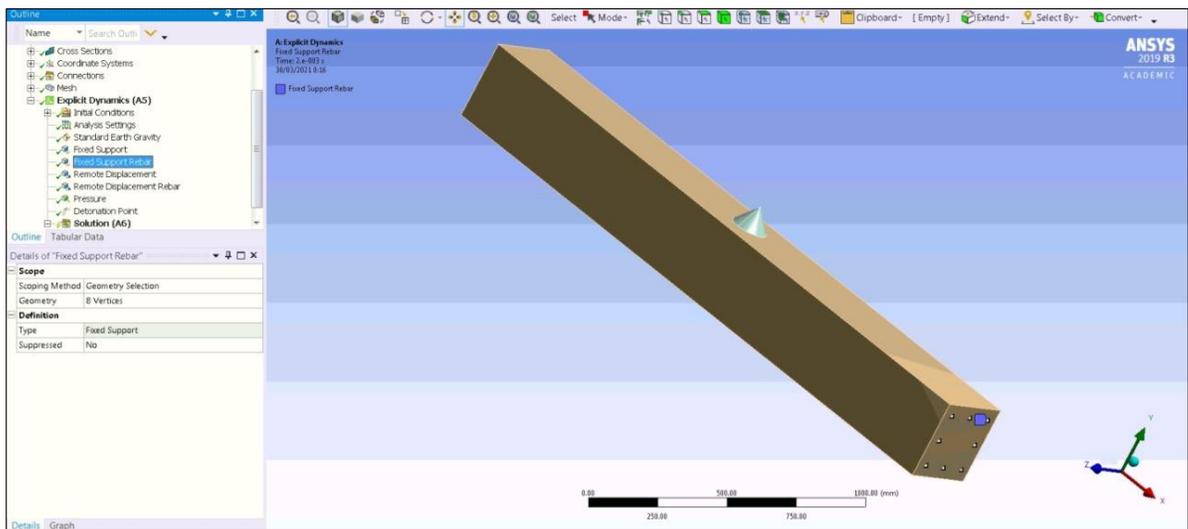


*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

**Fixed Support rebar.** Se configura el apoyo en la parte inferior, el cual simula el empotramiento para el reforzamiento longitudinal. Es decir, esto simula que dicho reforzamiento no llega hasta el empotramiento antes asignado para el concreto, sino que lo sobrepasa.

**Figura 20**

*Asignación en la parte inferior del reforzamiento longitudinal*

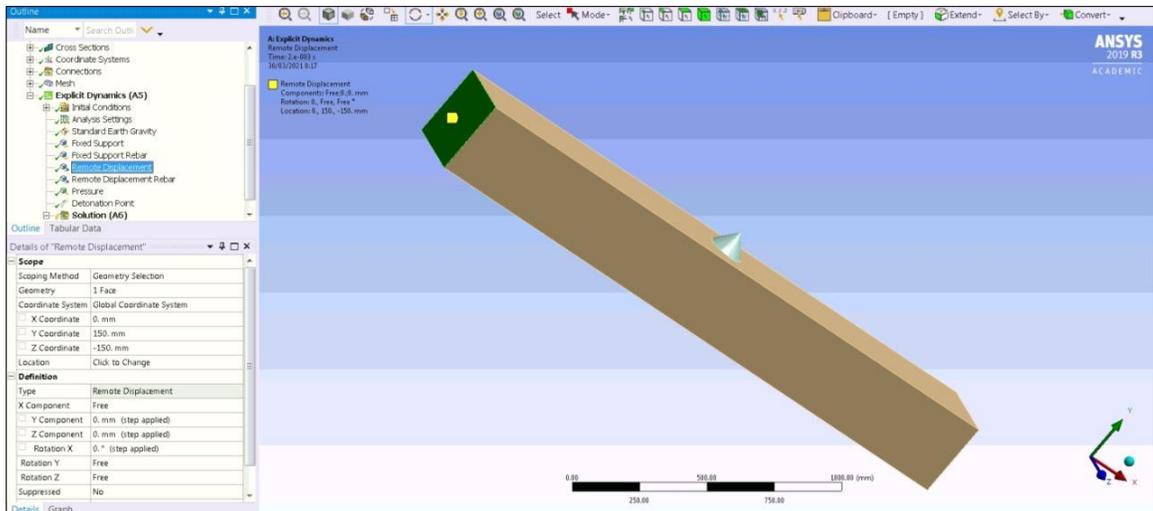


*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

**Remote Displacement.** Se restringe el desplazamiento en la parte superior en los ejes Y e Z, dejando libre movimiento únicamente en el eje X, al contrario, el giro se restringe en el eje X y se deja libre en los ejes Y e Z, este procedimiento restringe el concreto.

Figura 21

## Asignación de restricciones en la parte superior del concreto

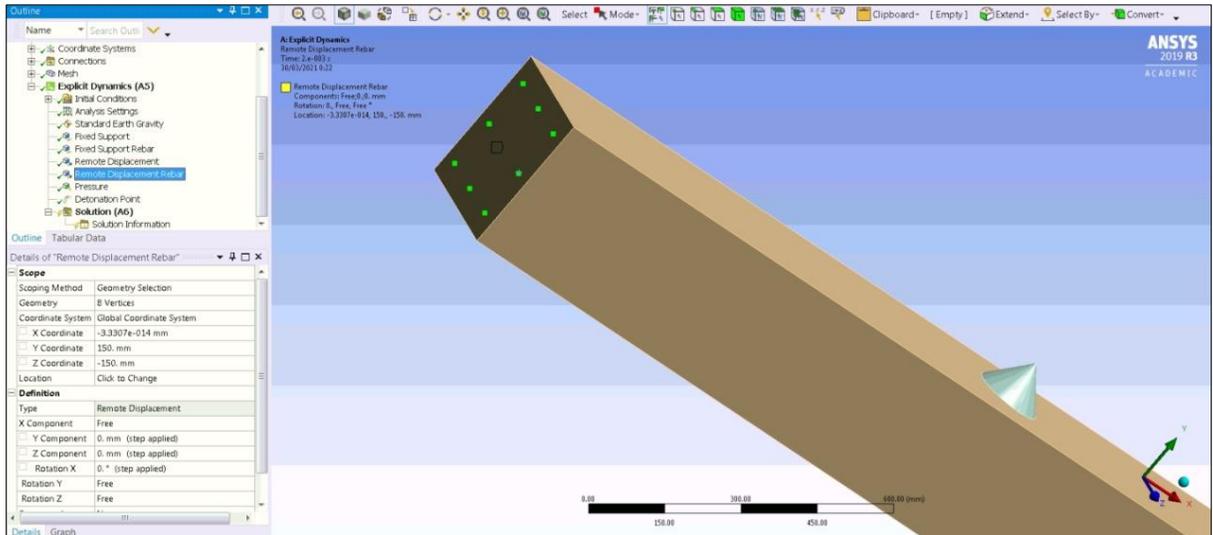


Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench

**Remote Displacement Rebar.** Se restringe el desplazamiento en la parte superior en los ejes Y e Z, dejando libre movimiento únicamente en el eje X, al contrario, el giro se restringe en el eje X y se deja libre los ejes Y e Z, este procedimiento restringe el reforzamiento longitudinal.

## Figura 22

### Asignación de restricciones en la parte superior del refuerzo longitudinal

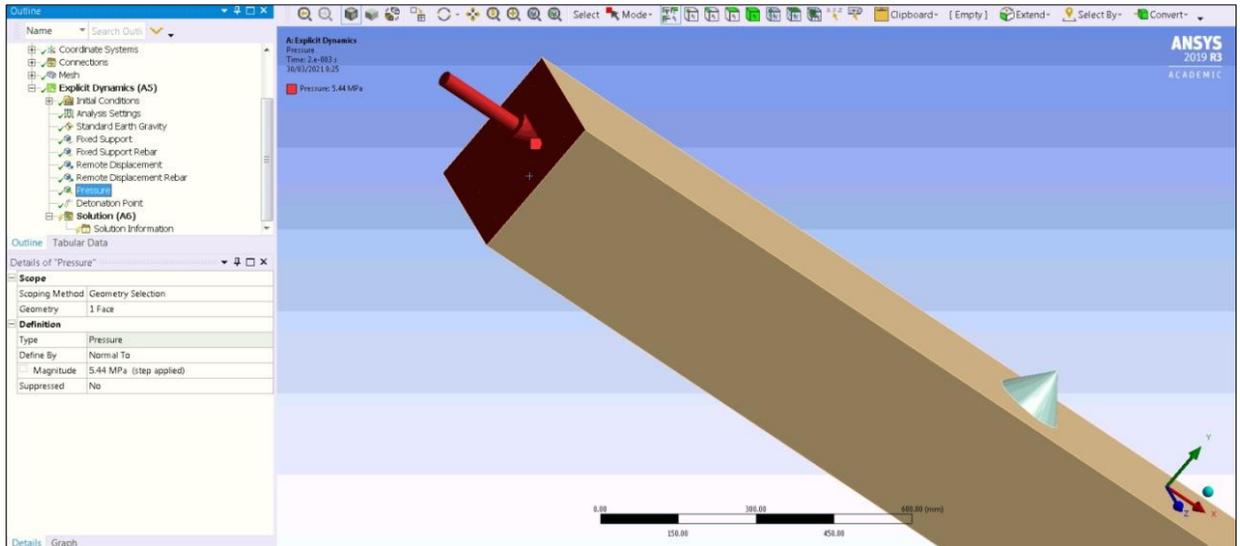


*Nota:* Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench

**Pressure.** Se introduce la presión aplicada en la cara superior de la columna, la cual se obtuvo de la carga axial aplicada en los ensayos experimentales realizados en campo.

Figura 23

*Aplicación de la presión en la cara superior de la columna*

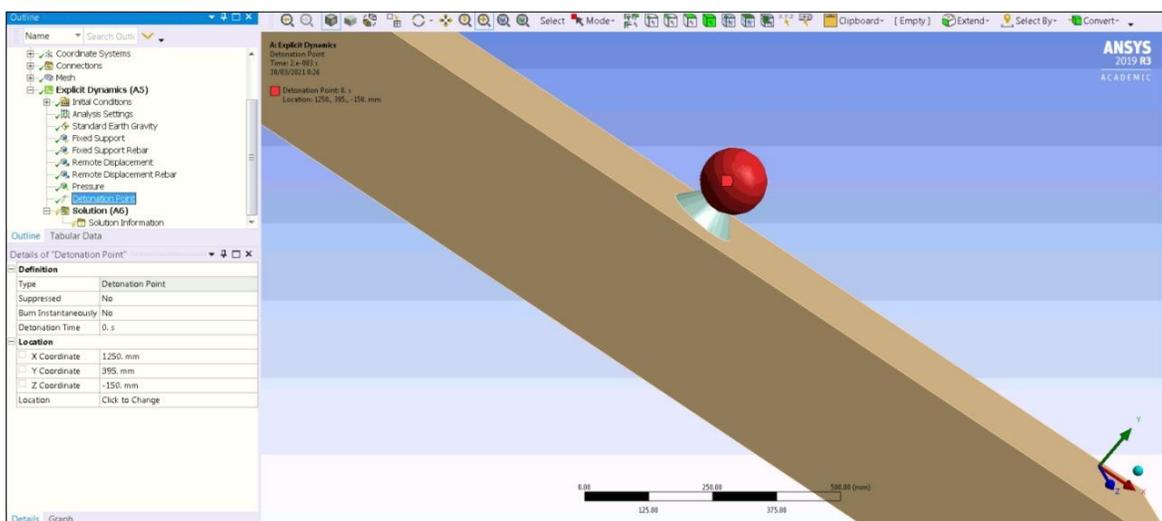


*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

**Detonation Point.** Se ubica el punto de detonación en función de coordenadas, en el lugar donde se encuentra la carga explosiva.

Figura 24

*Ubicación punto de detonación*



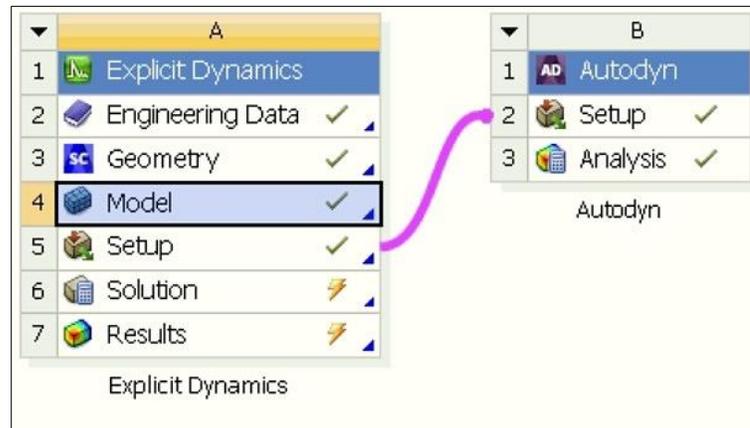
*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

### ***Interfaz Explicit Dynamics con Autodyn.***

Una vez configurados los parámetros mencionados se procede a la utilización del software Autodyn solver, el cual nos permitirá simular la respuesta de los elementos ante la explosión de la carga en contacto. Para ello se procede a vincular el Explicit Dynamics con el Autodyn mediante la opción de Setup, permitiendo así la transferencia de datos entre ambos.

### **Figura 25**

*Transferencia de datos de Explicit Dynamics con Autodyn*



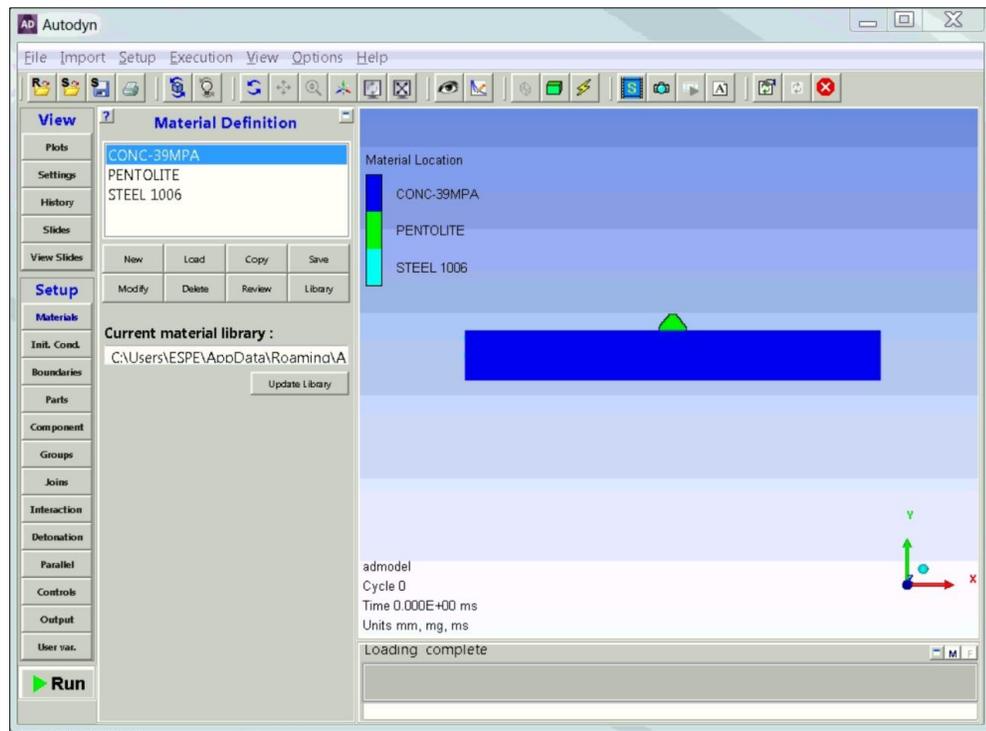
*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench.*

### **Autodyn.**

#### **Materials.**

Se muestra las propiedades de los materiales usados, donde se podrá modificar los mismos, acorde a las características requeridas.

Figura 26

*Ventana Autodyn Materials*

*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

A continuación, se muestran las propiedades de los materiales por default.

**Tabla 5***Propiedades del concreto*

<b>Autodyn_Setup_Parámetros CONC-35MPA</b>	
<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Reference Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.75
<b>EOS</b>	<b>P alpha</b>
Porous density (g/cm <sup>3</sup> )	2.314E+00
Porous soundspeed (m/s)	2.920E+03
Initial compaction pressure (kPa)	2.330E+04
Solid Compaction pressure (kPa)	6.000E+06
Compaction exponent (kPa)	3.000E+00
<b>Solid EOS</b>	<b>Polynomial</b>
Bulk Modulus A1 (kPa)	3.527E+07
Parameter A2 (kPa)	3.958E+07
Parameter A3 (kPa)	9.040E+06
Parameter B0 (none)	1.220E+00
Parameter B1 (none)	1.220E+00
Parameter T1 (kPa)	3.527E+07
Parameter T2 (kPa)	0.000E+00
Reference Temperature (K)	2.951E+02
Specific Heat (J/kgK)	6.540E+02
Thermal Conductivity (J/mKs)	0.000E+00
Compaction Curve	Standard
<b>Strength</b>	<b>RHT Concrete</b>
Shear Modulus (kPa)	1.670E+07
Compressive Strength (fc)	3.500E+04
Tensile Strength (ft/fc) (none)	1.000E-01
Shear Strength (fs/fc) (none)	1.800E-01
Intact Failure surface (none)	1.600E+00
Intact Failure surface (none)	6.100E-01
Tens./Comp. Meridian Ratio (none)	6.805E-01
Brittle do Ductile Transition (none)	1.050E-02
G (elas.)/(elas.-plas-) (none)	2.000E+00
Elastic Strength / ft (none)	7.000E-01
Elastic Strength / fc (none)	5.300E-01
Fractured Strength Constant (none)	1.600E+00
Fractured Strength Exponent (none)	6.100E-01
Compressive Strain rate (none)	3.200E-02
Tensile Strain rate Exp. (none)	3.600E-02

Max. Fracture Strength ratio (none)	1.000E+20
Use CAP on Elastic Surface?	Yes
<b>Failure</b>	<b>RHT Concrete</b>
Damage Constant, D1 (none)	4.000E-02
Damage Constant, D2 (none)	1.000E+00
Minimum Strain to Failure (none)	1.000E-02
Residual Shear Modulus (none)	1.300E-01
Tensile Failure	Hydro (Pmin)
<b>Erosion</b>	<b>Geometric Strain</b>
Erosion Strain (none)	-----
Type of Geometric Strain	Instantaneous
<b>Cutoffs</b>	
Maximum Expansion (none)	1.000E-01
Minimum Density factor (none)	1.000E-04
Minimum Density factor (none)	2.000E-01
Maximum Density factor (none)	3.000E+00
Minimum Soundspeed (m/s)	1.000E+06
Maximum Soundspeed (m/s)	1.010E+20
Maximum Temperature (K)	1.010E+20

*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Autodyn.*

**Tabla 6**

*Propiedades del refuerzo de acero*

<b>Autodyn_Setup_Parámetros STEEL 4340</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Reference Density (g/cm3)	7.896
<b>EOS</b>	<b>Linear</b>
Bulk Modulus (kPa)	1.590E+08
Reference Temperature (K)	2.930E+02
Specific Heat (J/kgK)	0.000E+00
Thermal Conductivity (J/mKs)	0.000E+00
<b>Strength</b>	<b>Johnson Cook</b>
Shear Modulus (kPa)	8.180E+07
Yield Stress (kPa)	3.500E+05
Hardening Constant (kPa)	2.750E+05
Hardening Exponent (none)	3.600E-01
Strain Rate Constant (none)	2.200E-02
Therman Softening Exponent (none)	1.000E+00

Melting Temperature (K)	1.811E+03
Ref. Strain Rate (/s) (none)	1.000E+00
Strain Rate Correction	1st Order
<b>Failure</b>	<b>Plastic Strain</b>
Plastic Strain (none)	-----
Crack Softening	No
Stochastic failure	No
<b>Erosion</b>	<b>Geometric Strain</b>
Erosion Strain (none)	-----
Type og Geometric Strain	Instantaneous
<b>Cutoffs</b>	
Maximum Expansion (none)	1.000E-01
Minimum Density factor (none)	1.000E-04
Minimum Density factor (none)	2.000E-01
Maximum Density factor (none)	3.000E+00
Minimum Soundspeed (m/s)	1.000E-06
Maximum Soundspeed (m/s)	1.010E+20
Maximum Temperature (K)	1.010E+20

*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Autodyn.*

**Tabla 7**

*Propiedades de la Pentolita*

<b>Autodyn_Setup_Parámetros PENTOLITE</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Reference Density (g/cm3)	1.70
<b>EOS</b>	
<b>JWL</b>	
Parameter A (kPa)	5.409E+08
Parameter B (kPa)	9.343E+06
Parameter R1 (none)	4.500E+00
Parameter R2 (none)	1.100E+00
Parameter W (none)	3.500E-01
C-J Detonation Velocity (m/s)	7.530E+03
C-J energy / unit volume (kj/m3)	8.101E+06
C-J Pressure (kPa)	2.550E+07
Burn on compression (none)	0.000E+00
Pre-burn bulk modulus (kPa)	0.000E+00
Adiabatic constant (none)	0.000E+00
Auto-convert to Ideal Gas	Yes
Additional Options (Beta)	None

<b>Cutoffs</b>	
Maximum Expansion (none)	1.000E-01
Minimum Density factor (none)	1.000E-06
Minimum Density factor (none)	2.000E-01
Maximum Density factor (none)	3.000E+00
Minimum Soundspeed (m/s)	1.000E-06
Maximum Soundspeed (m/s)	1.010E+20
Maximum Temperature (K)	1.010E+20

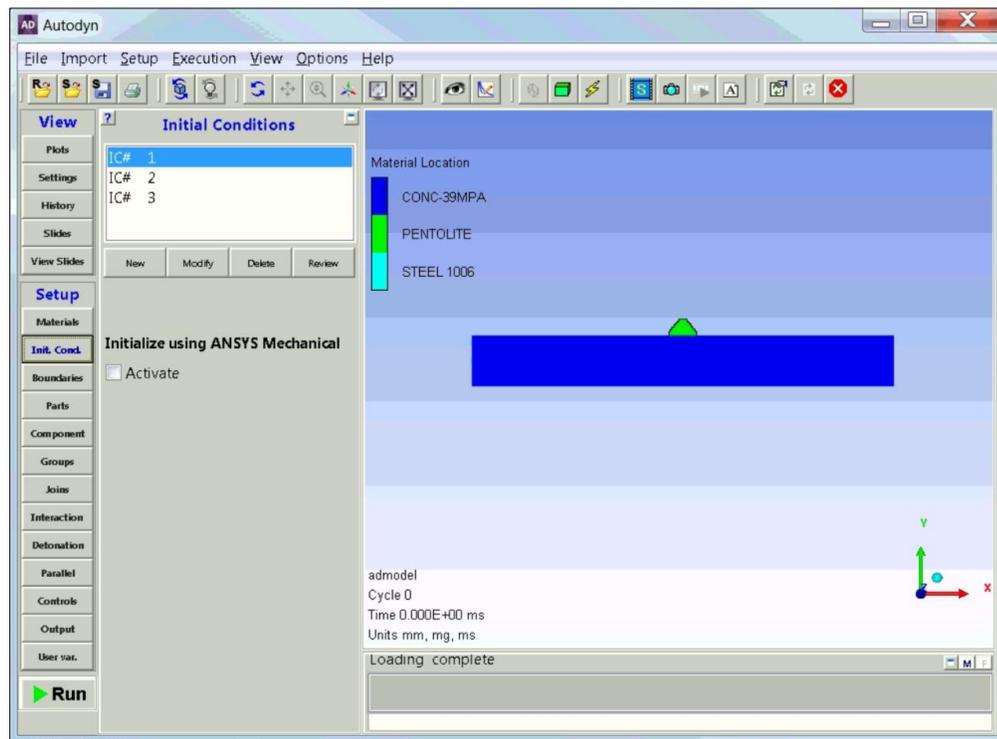
*Nota:* Tomado de ANSYS 2019R3 Autodyn.

### Initial Conditions

Se configura y se verifica que las condiciones iniciales para cada elemento sean las correspondientes.

### Figura 27

*Ventana Autodyn Int.Cond.*



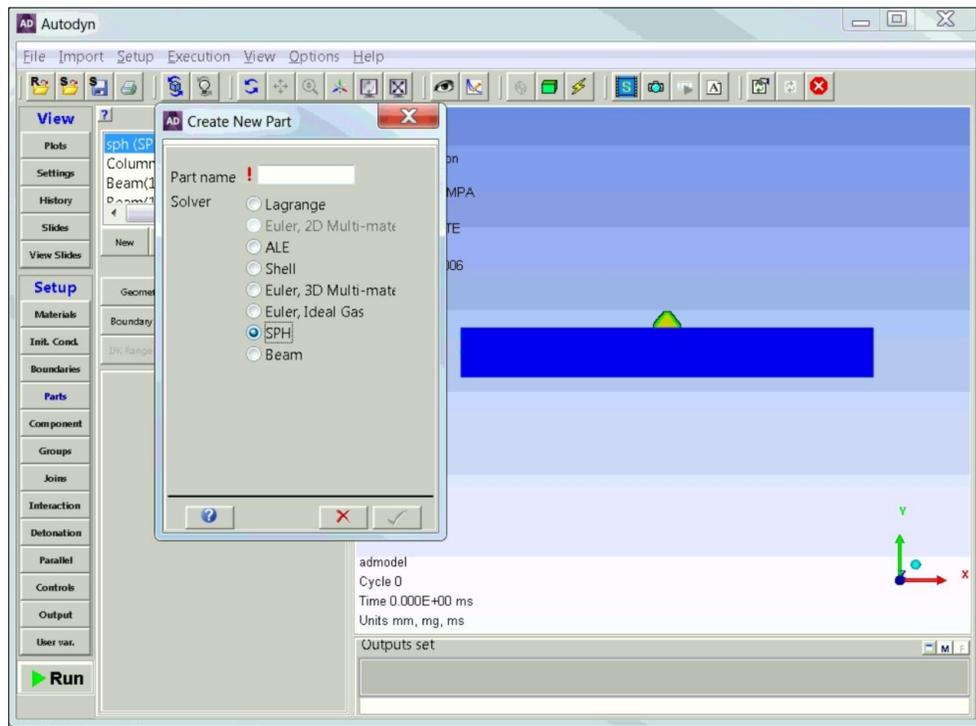
*Nota:* Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench

## Parts.

Este proceso es muy importante, ya que se establece el método SPH para la simulación de la carga explosiva, diferenciando del método lagrangiano por malla.

## Figura 28

*Opciones de hidrocódigo para la simulación*



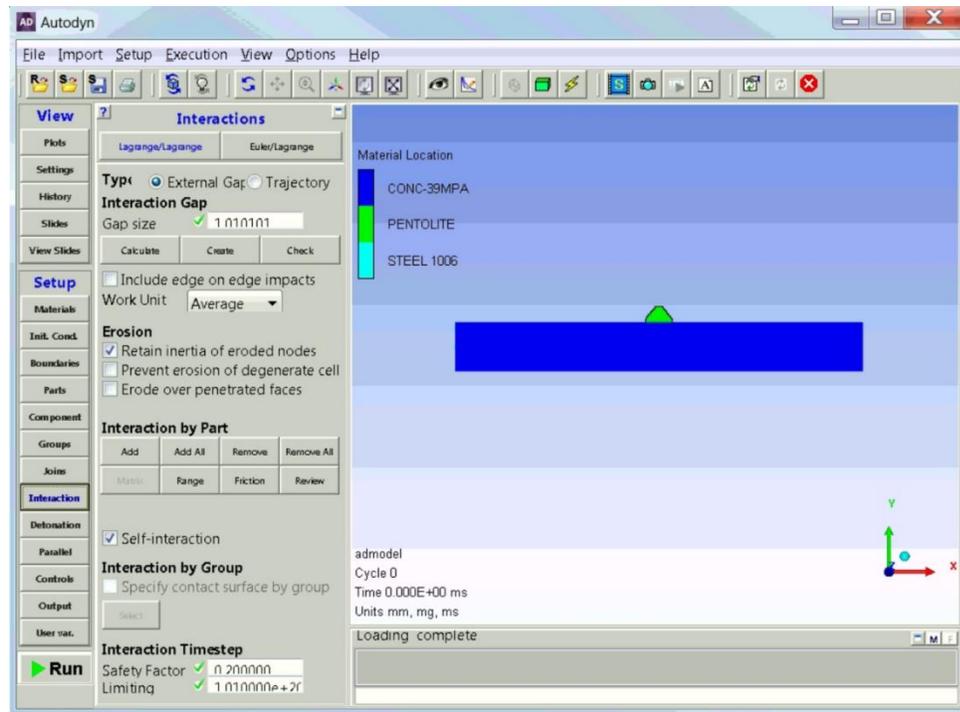
*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

## Interactions.

Se calcula la brecha que va a existir entre la interacción del concreto y el refuerzo longitudinal y transversal.

Figura 29

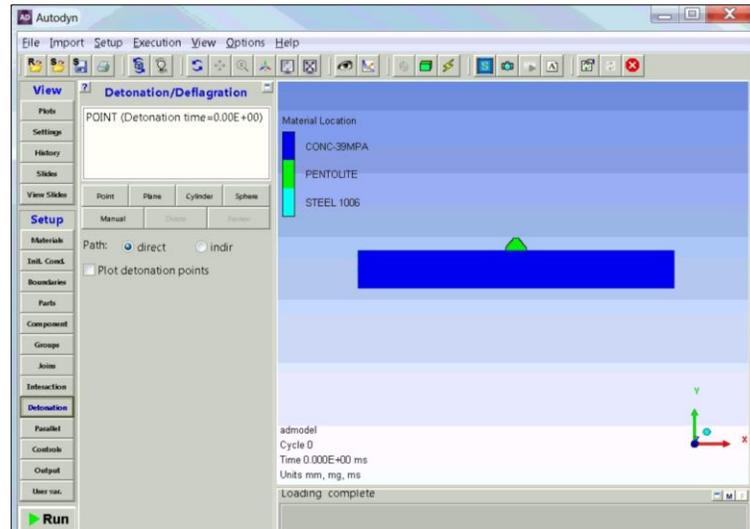
Ventana de Autodyn Interactions



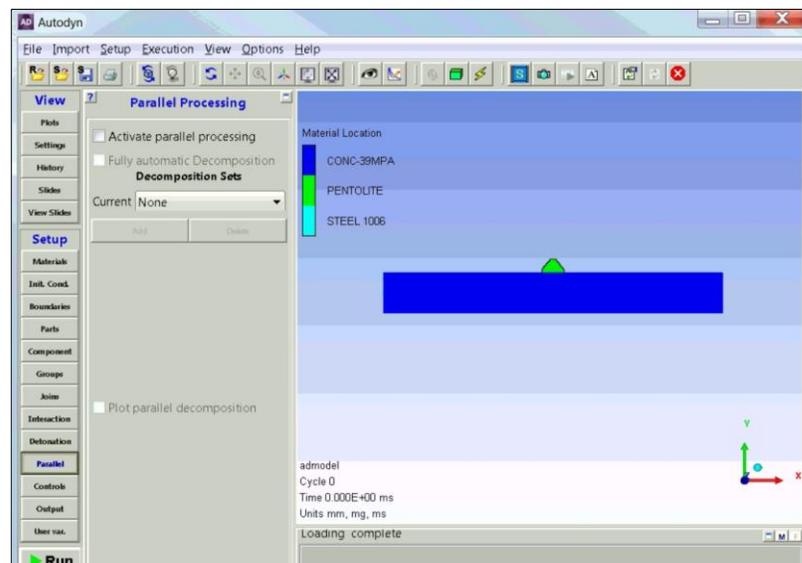
Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench

### Detonation.

En esta opción se aplica el path direct, el cual indica que los tiempos de detonación se calculan en línea recta desde los puntos de detonación. La ruta indirecta no se puede aplicar en modelos con regiones SPH llenas de materiales explosivos.

**Figura 30***Definición del path direct**Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench***Parallel.**

Se desactiva la opción Activate parallel processing para establecer un solo procesador.

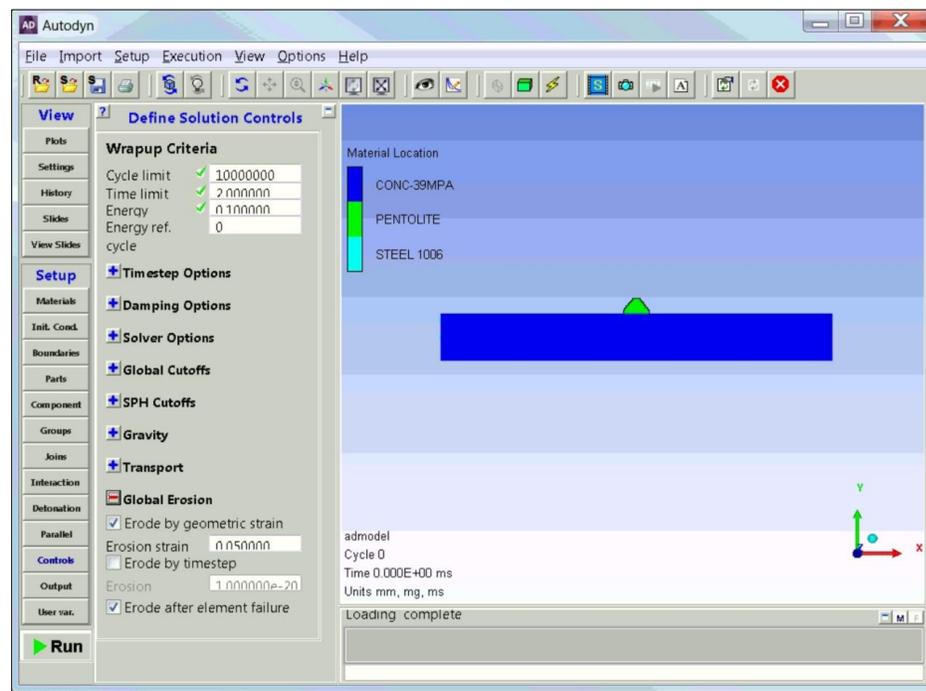
**Figura 31***Verificación de desactivación de procesamiento en paralelo**Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

## Controls.

En esta opción se configura el criterio de erosión global, que rige a todos los elementos que componen la simulación.

**Figura 32**

*Ingreso de criterio de erosión global*



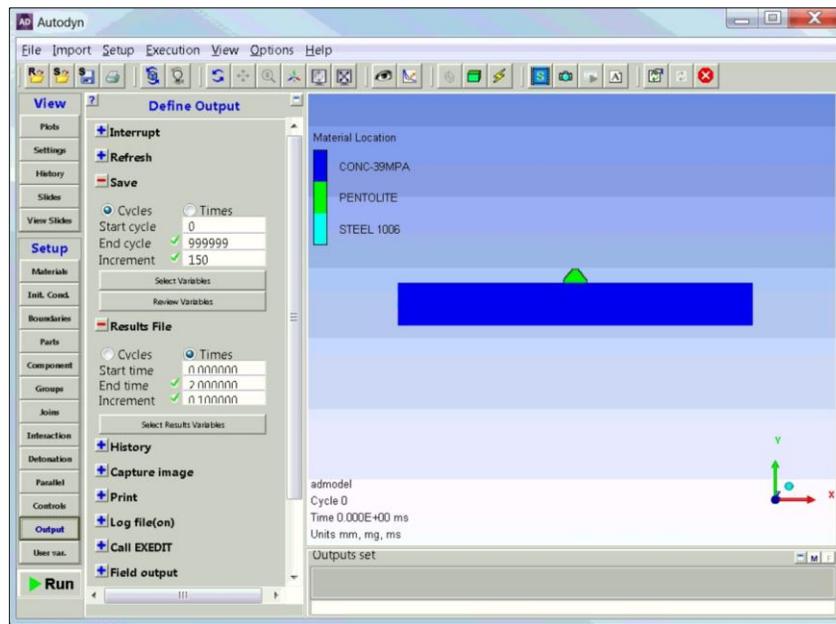
*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

## Output.

El paso previo a la ejecución de la simulación consiste en configurar y delimitar el número de ciclos que se quiere obtener, y de igual manera el incremento de los mismos.

**Figura 33**

*Definición del número e incremento de ciclos*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

## Run.

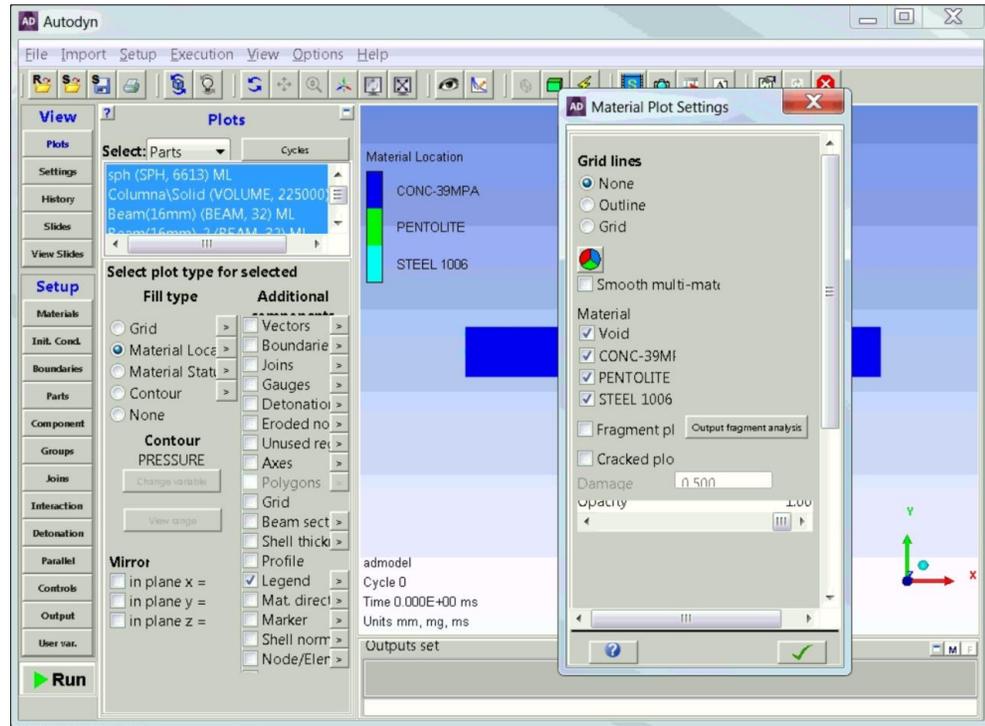
Finalmente, configurado todos los parámetros establecidos se procede a la ejecución de la simulación computacional, presionando el botón RUN. Una vez completada la simulación, la cual tiene un tiempo de duración aproximada de 24 horas para el tiempo requerido de simulación, se extraen los datos requeridos en la opción Plots como se muestra a continuación.

## Plots

**Material local.** Despliega los materiales, los cuales pueden ser omitidos en su visualización, para una mejor apreciación de los elementos internos, así también, permite desplegar los diferentes ciclos con el número de elementos que perduraron después de la detonación de la carga explosiva.

Figura 34

## Ventana Autodyn Plots

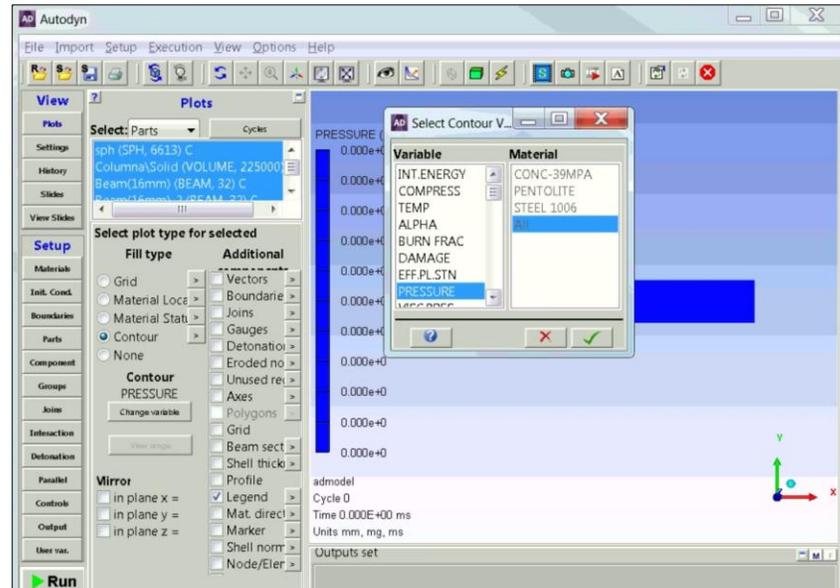


*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

**Contour.** Permite escoger la variable de análisis y de interés para el usuario, y así obtener los datos requeridos. En las siguientes imágenes se presentan algunas de las variables que pueden ser apreciadas, así también, como el desplazamiento absoluto del reforzamiento longitudinal y transversal de la columna.

Figura 35

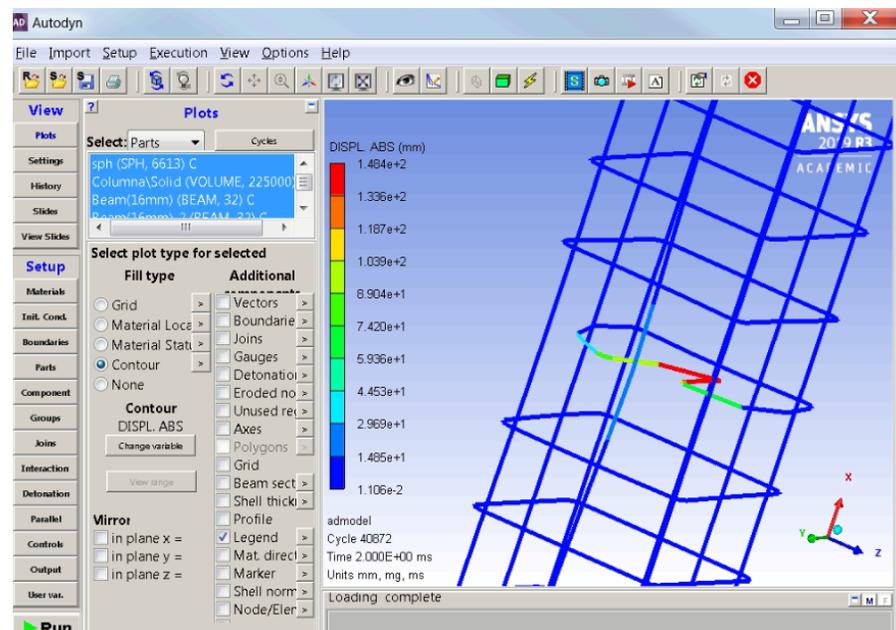
Opción de variables a visualizar



Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench

Figura 36

Desplazamiento absoluto del refuerzo longitudinal y transversal



Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench

### **Metodología de regresión multivariable**

Se presenta la metodología utilizada para desarrollar el modelo analítico del índice de daño, la cual se realiza mediante una serie de análisis matemáticos que están basados en los datos obtenidos en los ensayos experimentales realizados en Peralta (2019); con la ayuda de Matlab se desarrolló el código, que se adjunta en el anexo 2, el cual nos permitió realizar las iteraciones correspondientes del procedimiento que se detalla a continuación hasta conseguir la combinación adecuada de variables.

### **Selección de variables**

En base al índice de daño obtenidos en los resultados de los ensayos experimentales se consideraron las siguientes variables independientes:

$A_g$  =Sección transversal

$m$  =masa del explosivo

$\rho_g$  =Refuerzo longitudinal

$\rho_v$  =Refuerzo transversal

$f'c$  = Resistencia a la compresión del hormigón

$P$  =Carga Axial

$ID$  = Índice de daño

### **Selección de datos**

De la muestra de 33 ensayos experimentales se abarca el 97%, para tener un mejor resultado en el modelo analítico y así disminuir el margen de error.

**Tabla 8***Datos de ensayos experimentales*

Sección Transversal (cm <sup>2</sup> )	Masa explosivo (g)	Reforzamiento longitudinal	Reforzamiento Transversal	Resistencia del concreto (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga axial (T)	Índice de daño
900.00	1140.00	0.01578	0.00753	390.00	50.00	0.23
900.00	1140.00	0.01578	0.00698	250.00	50.00	0.81
1600.00	1140.00	0.01539	0.00393	390.00	50.00	0.12
1600.00	2280.00	0.01539	0.00393	390.00	50.00	0.26
1600.00	3420.00	0.01539	0.00393	390.00	50.00	0.10
900.00	910.00	0.01578	0.00753	390.00	50.00	0.20
900.00	450.00	0.01578	0.00698	390.00	50.00	0.13
2500.00	3420.00	0.01629	0.00251	390.00	50.00	0.50
1600.00	2280.00	0.01539	0.00393	390.00	50.00	0.24
1600.00	2280.00	0.01539	0.00393	250.00	50.00	0.29
2500.00	2280.00	0.01629	0.00251	250.00	50.00	0.23
2500.00	3420.00	0.01629	0.00251	250.00	50.00	0.12
900.00	1140.00	0.01578	0.00753	390.00	40.00	0.21
1600.00	2280.00	0.01539	0.00393	390.00	40.00	0.80
900.00	680.00	0.01578	0.00698	250.00	70.00	0.30
900.00	1140.00	0.01578	0.00753	390.00	50.00	0.34
2500.00	2280.00	0.01629	0.00251	390.00	50.00	0.10
2500.00	3420.00	0.01629	0.00251	390.00	50.00	0.33
1600.00	2050.00	0.01539	0.00393	250.00	50.00	0.37
2500.00	3420.00	0.01629	0.00251	390.00	50.00	0.50
1600.00	2960.00	0.01539	0.00393	250.00	40.00	1.00
2500.00	3420.00	0.01629	0.00251	390.00	50.00	0.29
1600.00	2960.00	0.01539	0.00393	390.00	40.00	0.05
900.00	1140.00	0.01578	0.00753	390.00	40.00	0.40
2500.00	2730.00	0.01629	0.00251	250.00	40.00	0.33
2500.00	2960.00	0.01629	0.00251	390.00	20.00	0.37
1600.00	2280.00	0.01539	0.00393	390.00	40.00	0.20
2500.00	2280.00	0.01629	0.00251	250.00	50.00	0.29

*Continúa...*

900.00	1140.00	0.01578	0.00753	250.00	40.00	0.08
1600.00	1820.00	0.01539	0.00393	250.00	40.00	0.26
900.00	1590.00	0.01578	0.00753	390.00	40.00	0.15
2500.00	4560.00	0.01629	0.00251	390.00	50.00	0.80

---

*Nota: Tomado de Evaluación De Daño En Columnas De Hormigón Armado A Escala Real Por Efecto De Cargas Explosivas Mediante Validación Experimental (p.156), por (Peralta & Sarango, 2019)*

### **Combinación de variables**

Mediante prueba y error se obtuvo la combinación ideal de variables para el cálculo de coeficientes correspondientes al modelo analítico propuesto, de la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (59)$$

Donde:

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  = coeficientes de regresión.

$$x_1 = \ln(m * P) \quad (60)$$

$$x_2 = \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \quad (61)$$

$$y = \left[ \frac{\ln(ID) * \ln(\rho_v * f'c)}{\ln(A_g * \rho_g)} \right] - (x_1 * x_2) \quad (62)$$

### **Datos de la combinación de variables**

Se presenta los datos correspondientes a las nuevas variables  $x_1, x_2$  e  $y$ .

**Tabla 9***Datos de combinación de variables*

$x_1$	$x_2$	$y$
10.95081	2.46302	-27.56880
10.95081	4.76558	-52.23112
10.95081	7.50232	-82.43905
11.64395	7.50232	-87.53620
12.04942	7.50232	-90.70549
10.72547	2.46291	-27.06930
10.02127	2.64944	-27.32081
12.04942	-173.81396	2094.36115
11.64395	7.50232	-87.54687
11.64395	-181.46323	2112.95628
11.64395	-7.95414	92.80235
12.04942	-7.95414	96.10927
10.72766	2.46291	-27.05489
11.42081	7.50232	-85.71230
10.77059	4.76558	-51.58069
10.95081	2.46291	-27.40884
11.64395	-173.81396	2023.89492
12.04942	-173.81396	2094.36354
10.95081	4.76558	-53.00779
11.53762	-181.46323	2093.65892
12.04942	-173.81396	2094.36115
11.68182	-181.46323	2119.82152
12.04942	-173.81396	2094.36429
11.68182	7.50232	-88.04007
10.72766	2.46291	-26.79327
11.60094	-7.95414	92.41480
10.98868	-173.81396	1909.99112
11.42081	7.50232	-85.89708
11.64395	-7.95414	92.77321
10.72766	4.19420	-45.59620
11.19547	-181.46323	2031.57380
11.06037	2.46291	-28.01093
12.33710	-173.81396	2144.36161

### ***Coefficientes de regresión***

La matriz de variables independientes  $X$  se genera utilizando la forma que se encuentra en la ecuación (36).

**Tabla 10**

*Matriz X*

<b>Constante</b>	<b><math>x_1</math></b>	<b><math>x_2</math></b>
1	10.95081	2.46302
1	10.95081	4.76558
1	10.95081	7.50232
1	11.64395	7.50232
1	12.04942	7.50232
1	10.72547	2.46291
1	10.02127	2.64944
1	12.04942	-173.8139
1	11.64395	7.50232
1	11.64395	-181.4632
1	11.64395	-7.95414
1	12.04942	-7.95414
1	10.72766	2.46291
1	11.42081	7.50232
1	10.77059	4.76558
1	10.95081	2.46291
1	11.64395	-173.8139
1	12.04942	-173.8139
1	10.95081	4.76558
1	11.53762	-181.4632
1	12.04942	-173.8139
1	11.68182	-181.4632
1	12.04942	-173.8139
1	11.68182	7.50232
1	10.72766	2.46291
1	11.60094	-7.95414
1	10.98868	-173.8139
1	11.42081	7.50232
1	11.64395	-7.95414
1	10.72766	4.19420
1	11.19547	-181.4632
1	11.06037	2.46291
1	12.33710	-173.81396

La matriz de variables dependientes  $Y$  se genera como se muestra en la tabla 10.

**Tabla 11**

*Matriz Y*

$y$
-27.56880
-52.23112
-82.43905
-87.53620
-90.70549
-27.06930
-27.32081
2094.36115
-87.54687
2112.95628
92.80235
96.10927
-27.05489
-85.71230
-51.58069
-27.40884
2023.89492
2094.36354
-53.00779
2093.65892
2094.36115
2119.82152
2094.36429
-88.04007
-26.79327
92.41480
1909.99112
-85.89708
92.77321
-45.59620
2031.57380
-28.01093
2144.36161

Mediante la ecuación (35) se procede al cálculo de los coeficientes de regresión

**Tabla 12**

*Coefficientes de regresión*

	<b>Coeficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>	<b>Inferior 95.0%</b>	<b>Superior 95.0%</b>
$\beta_0$	-439,70573	153,41875	-2,86605	0,00753	-753,0286	-126,3828	-753,0286	-126,3828
$\beta_1$	39,42742	13,67713	2,88273	0,00722	11,49500	67,35985	11,49500	67,35985
$\beta_2$	-11,60699	0,08635	-134,41485	0,00000	-11,78334	-11,43063	-11,78334	-11,43063

***Cálculo de y estimada***

Reemplazando los coeficientes calculados en la ecuación (59) se obtiene lo siguiente:

$$y = -439.70573 + 39.42742x_1 + -11.60699x_2 \quad (63)$$

De la cual se reemplazan los datos para  $x_1, x_2, x_3$  obteniendo así la y estimada que se presenta a continuación:

**Tabla 13**

*Y estimada*

<b><i>Y estimada</i></b>
-36.50
-63.30
-95.00
-67.70
-51.70
-45.40
-75.40
2052.80
-67.70
2125.60
111.70
127.70
-45.30
-76.50
-70.40

-36.50  
 2036.80  
 2052.80  
 -63.30  
 2121.50  
 2052.80  
 2127.10  
 2052.80  
 -66.20  
 -45.30  
 110.00  
 2011.00  
 -76.50  
 111.70  
 -65.40  
 2107.90  
 -32.20  
 2064.20

---

### **Confiabilidad de los coeficientes de regresión $\beta$**

Es muy importante realizar este cálculo ya que nos indica el grado de aceptación que posee la ecuación propuesta. En base a la tabla 2 se procede al cálculo de las sumatorias de cuadrados, el estadístico F y el valor p.

#### **Tabla 14**

*Tabla ANOVA calculada*

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	$F_0$	<b>Valor-p</b>
Regresión	32503936.26	2	16251968.13	12147.8962	2.3217E-44
Error o residuo	40135.26603	33 – 2 – 1	1337.842201		
Total	32544071.53	33 – 1			

Se procede al cálculo del coeficiente de determinación  $R^2$  mediante la ecuación (43) y se obtiene  $R^2 = 0.9986$ . Posteriormente, se calcula el coeficiente de correlación aplicando la ecuación (45) dando como resultado  $R = 0.9993$ .

## Capítulo IV

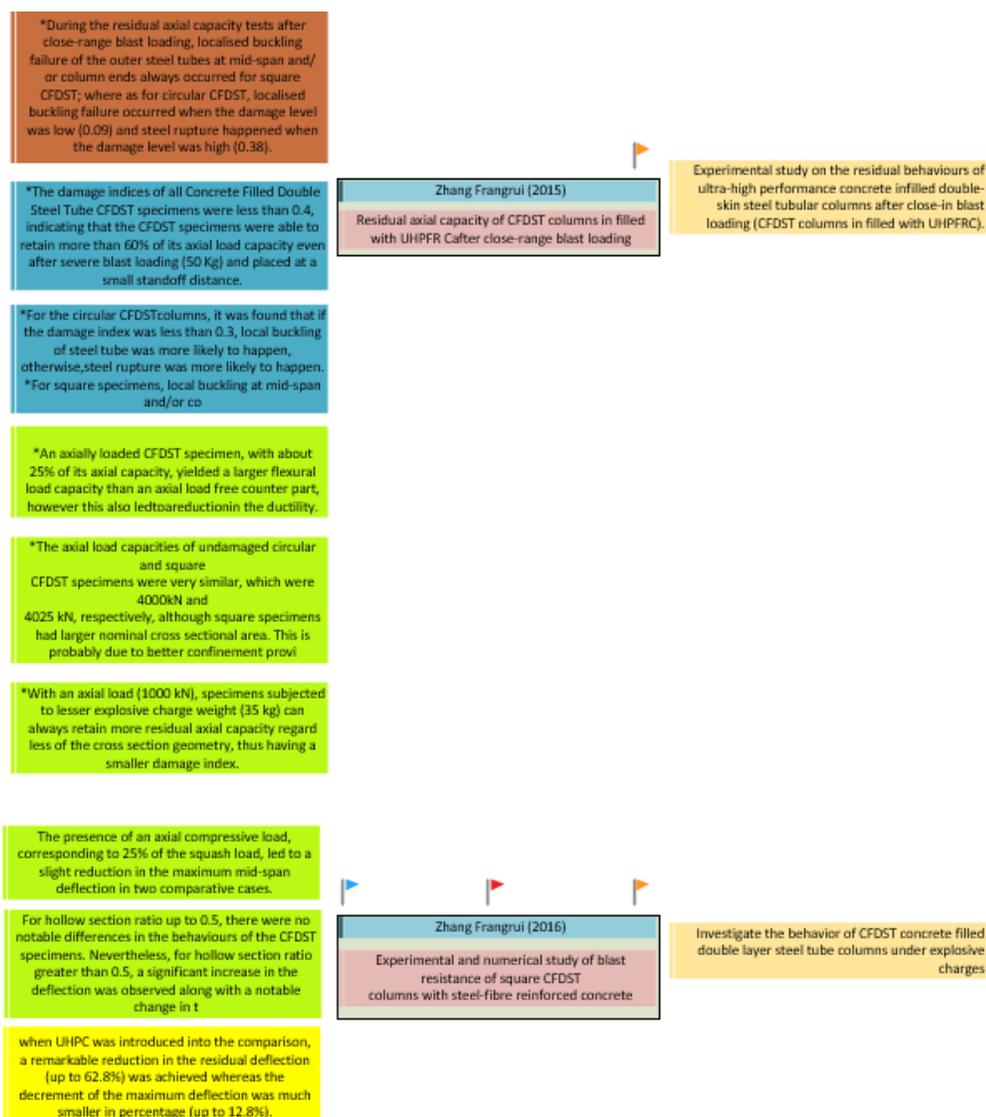
### Resultados

#### Estado del arte

Los resultados obtenidos en la investigación del estado del arte son presentados parcialmente en la figura 37, los cuales son una recopilación de los datos más relevantes de cada estudio realizado por varios investigadores en años anteriores. Estos contribuyen a la redacción del artículo científico como parte de su fundamentación teoría.

#### Figura 37

*Extracto de clasificación de resultados en Visio*



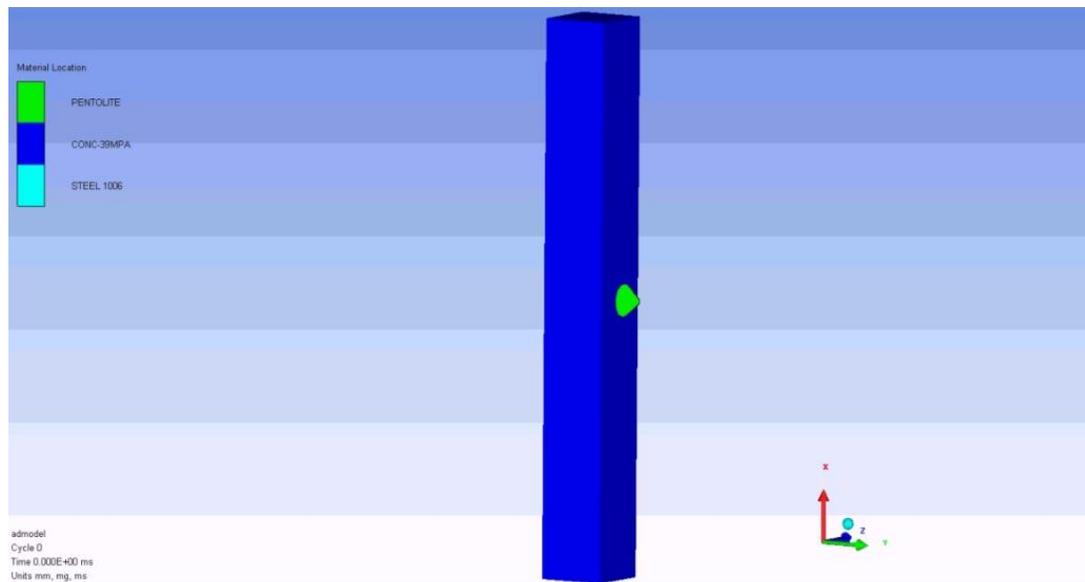
Una vez organizada y clasificada la información por medio de la matriz de estado del arte y ordenarla en la herramienta computacional Visio como se puede observar en la figura 37 se realizó la redacción del estado del arte y la introducción del artículo que se planifica publicar. Dichas redacciones no se adjuntan para evitar el plagio de la información.

### Simulación computacional

Los resultados de las simulaciones computacionales no pueden ser adjuntados en este apartado para evitar el plagio de los mismos y salvaguardar los derechos de autor debido a que serán publicados en un artículo científico. Sin embargo, se adjuntan imágenes de la simulación para hacer constar el trabajo realizado.

### Figura 38

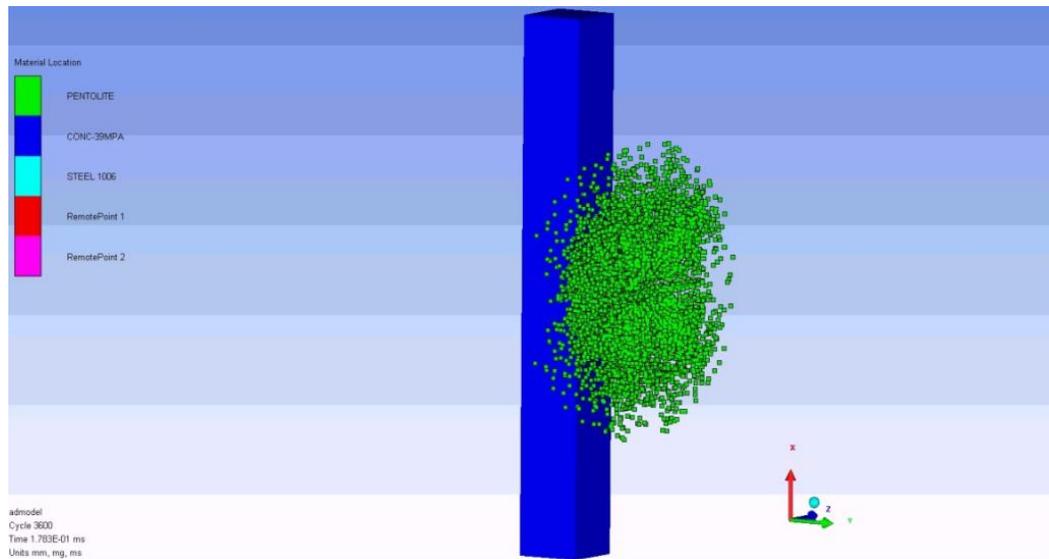
*Inicio de la simulación – 0 milisegundos*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

**Figura 39**

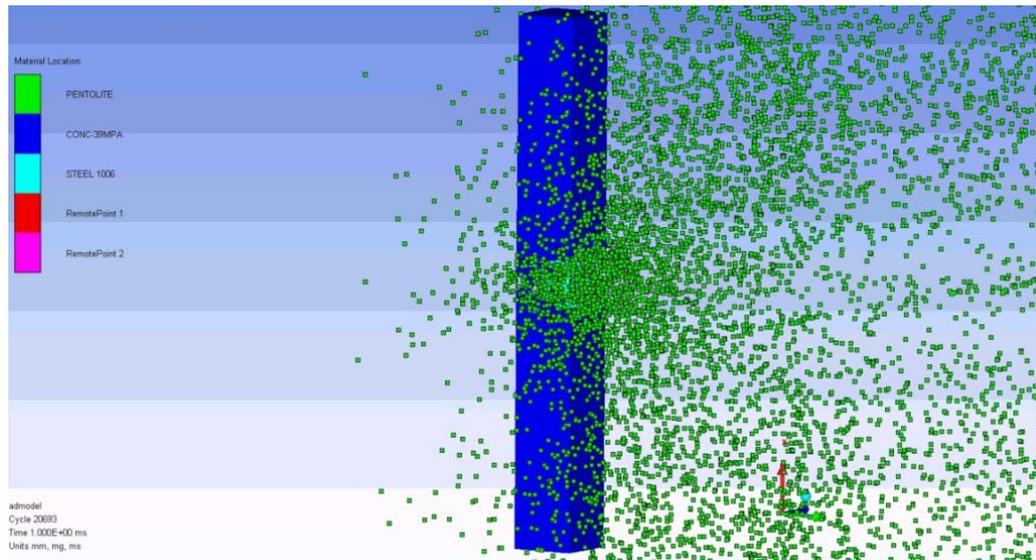
*Detonación del explosivo*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

**Figura 40**

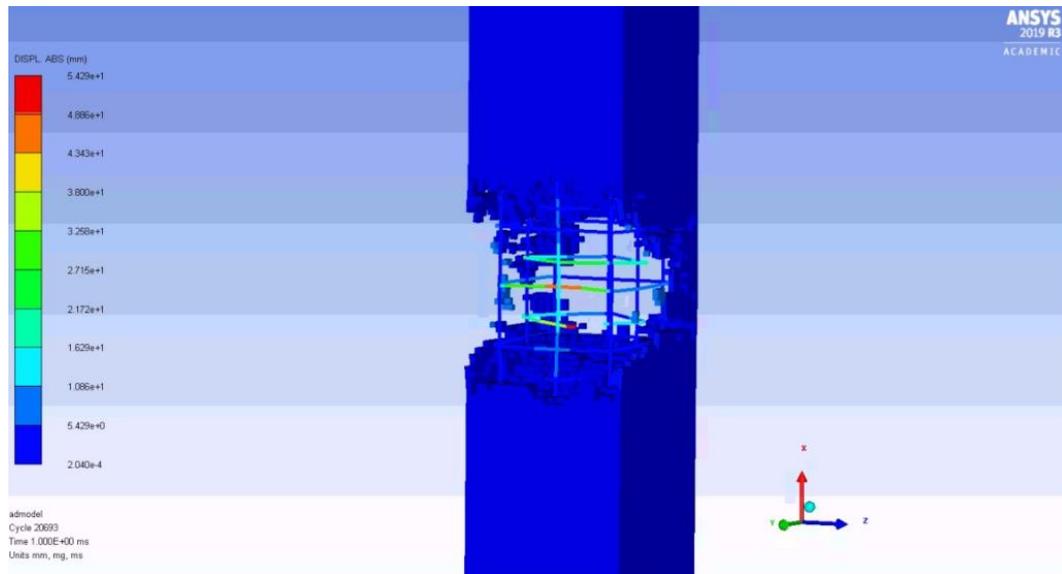
*Simulación finalizada a 1 milisegundo*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

**Figura 41**

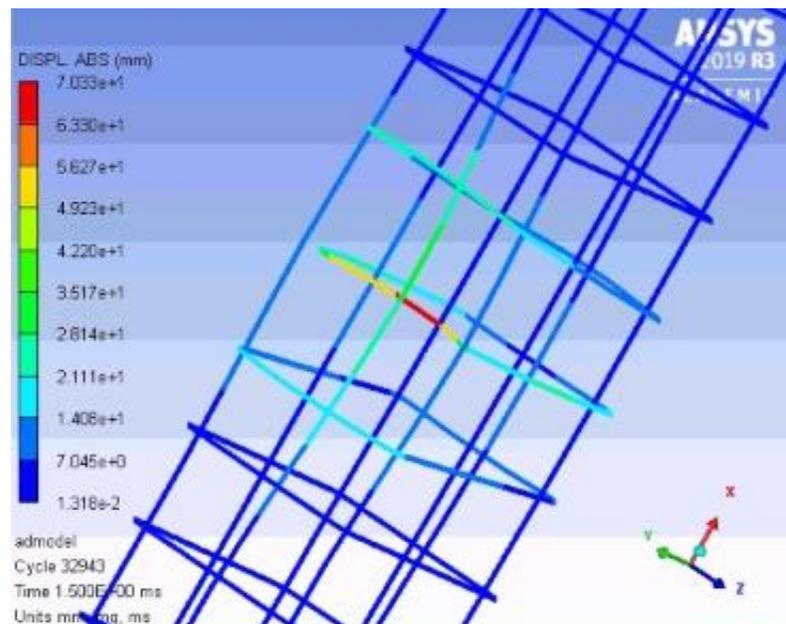
*Fragmentación del hormigón después de la detonación*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

**Figura 42**

*Deformación absoluta - reforzamiento longitudinal y transversal*



*Nota: Tomado de ANSYS 2019R3 Workbench*

## Regresión lineal multivariable

En base al procedimiento indicado en la metodología, se obtuvo la ecuación (70) para la determinación del índice de daño de una columna bajo el efecto de carga explosiva y carga axial. La nomenclatura de las variables es la que se encuentra en la sección 3.3.1. A continuación, se presenta el procedimiento algebraico para la obtención de la ecuación final.

Partiendo de la ecuación (62) se reemplazan las variables  $x_1, x_2$  que corresponden a las ecuaciones (60) y (61).

$$y = \left[ \frac{\ln(ID) * \ln(\rho_v * f'c)}{\ln(A_g * \rho_g)} \right] - \left[ \ln(m * P) * \left( \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right) \right] \quad (64)$$

Se iguala la ecuación 64 con la ecuación xx y se obtiene la ecuación 65.

$$\left[ \frac{\ln(ID) * \ln(\rho_v * f'c)}{\ln(A_g * \rho_g)} \right] - \left[ \ln(m * P) * \left( \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right) \right] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (65)$$

De igual manera, en la ecuación 65 se reemplazan las variables  $x_1$  y  $x_2$

$$\left[ \frac{\ln(ID) * \ln(\rho_v * f'c)}{\ln(A_g * \rho_g)} \right] - \left[ \ln(m * P) * \left( \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right) \right] = \beta_0 + \beta_1 * \ln(m * P) + \beta_2 * \left[ \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right] \quad (66)$$

Se despeja la ecuación 66 aplicando propiedades algebraicas

$$\left[ \frac{\ln(ID) * \ln(\rho_v * f'c)}{\ln(A_g * \rho_g)} \right] = \beta_0 + \beta_1 * \ln(m * P) + \beta_2 * \left[ \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right] + \left[ \ln(m * P) * \left( \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right) \right] \quad (67)$$

Después de aplicar las propiedades logarítmicas se obtiene la ecuación (70) que representa el índice de daño.

$$\ln(ID) = \left[ \beta_0 + \beta_1 * \ln(m * P) + \beta_2 * \left[ \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right] + \left[ \ln(m * P) * \left( \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right) \right] \right] * \left[ \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(\rho_v * f'c)} \right] \quad (68)$$

$$e^{\ln(ID)} = e^{\left[ \beta_0 + \beta_1 * \ln(m * P) + \beta_2 * \left[ \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right] + \left[ \ln(m * P) * \left( \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right) \right] \right]} * \left[ \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(\rho_v * f'c)} \right] \quad (69)$$

$$ID = e^{\left[ \beta_0 + \beta_1 * \ln(m * P) + \beta_2 * \left[ \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right] + \left[ \ln(m * P) * \left( \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(f'c * \rho_v)} \right) \right] \right]} * \left[ \frac{\ln(A_g * \rho_g)}{\ln(\rho_v * f'c)} \right] \quad (70)$$

## Capítulo V

### Discusión

#### Conclusiones y recomendaciones

- Después de realizar el análisis de una primera muestra bibliográfica comprendida de 82 artículos científicos, se determinó que solo 42 de estos proporcionaron información acorde a los parámetros necesarios para la redacción del artículo a publicar, siendo estos parámetros: columnas de hormigón armado, aplicación de carga explosiva y carga axial.
- Una vez realizadas las simulaciones computacionales de cargas explosivas en columnas de H.A. se evidenció que se disminuye el tiempo en la obtención de resultados en comparación con los ensayos experimentales, en alrededor de un 97%.
- Finalizadas las simulaciones se observó que el método SPH resultó ser el apropiado para la modelación de la carga explosiva ya que, si se utilizaba el método lagrangiano se hubiera requerido de un medio continuo para generar la propagación de la onda, para lo cual se necesitaba modelar adicionalmente el entorno que interactúa con la columna y la carga explosiva; conllevando un incremento en el tiempo de ejecución.
- En las simulaciones computacionales se puede tolerar un error al momento de obtener resultados, ya que se la puede volver a simular hasta conseguir una tolerancia aceptable, en cambio en un ensayo experimental si se realiza mal una práctica esto conlleva a pérdidas de materiales lo que generaría un costo más elevado.
- Conforme se realizaban las simulaciones se pudo definir que la mínima variación del criterio de erosión afectaba exponencialmente la fragmentación de la columna.

- De acuerdo a la ecuación (62) presentada se evidenció que un cambio en la masa del explosivo tiene gran influencia en el índice de daño calculado mediante la ecuación propuesta, variando entre un 50% a 60%. Según los resultados presentados en la tabla ANOVA el valor de  $p = 2.3217 \text{ E-}44$  es inferior a 1%, el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9987$  llegando a una correlación sospechosamente perfecta y las probabilidades son inferiores al 5% las cuales indican que la combinación de variables asumidas tienen gran influencia en la ecuación, por lo que se determina que la regresión cumple con todos los parámetros estadísticos. Sin embargo, esta no refleja el fenómeno físico que se quiere representar, motivo por el cual esta ecuación únicamente sirve como primera aproximación que servirá como base para futuras investigaciones.
- Se comprobó que la correlación multivariable necesita que el número de datos ( $n$ ) sea mayor al número de variables ( $k$ ), de lo contrario no se puede generar dicha correlación y por ende una ecuación.
- Es importante recopilar información de artículos científicos que han sido publicados en revistas ubicadas en los primeros quintiles, esto ayudará a tener información relevante y certificada para dar mayor credibilidad al proyecto de investigación a realizar.
- Para manejar gran cantidad de información bibliográfica se recomienda organizarla y clasificarla en una matriz en donde se ubique los datos más importantes.
- Para lograr resultados óptimos y confiables de un modelo computacional, se debe realizar al menos 20 simulaciones; teniendo en cuenta que mientras más grande sea la muestra mayor precisión tendrá el modelo.

- Además de hallar el valor de  $R^2$  cercano a 1 es importante evaluar los parámetros  $\beta$  mediante la hipótesis nula e hipótesis alternativa intentando que siempre el valor estadístico T se mantenga menor al 1%, ya que con esto el nivel de confianza es máximo.
- Al momento de realizar un análisis de regresión lineal multivariable es importante definir a las variables dependientes como cualitativa o cuantitativa; y tener claro cuáles son las variables dependientes y la independiente para poder relacionarlas correctamente, así como conocer su influencia o principio físico para analizar los resultados que se obtienen en cada iteración.
- Al realizar las simulaciones computacionales se debe tener siempre claros los datos y parámetros que se va a ingresar porque el cometer un error en esto, implicará resultados equivocados y se pierde tiempo computacional.

## Referencias

- Alexopoulos, E. (2010). Introduction to Multivariate Regression Analysis. *Hipokratia*, 23-28. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3049417/>
- Antón, J. (2012). *Simulación Numérica de Interacción Fluido - Estructura*. Madrid. Retrieved from [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16086/PFC\\_Jesus\\_Anton\\_Mayoral.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16086/PFC_Jesus_Anton_Mayoral.pdf)
- Astarlioglu, S., Krauthammer, T., Morency, D., & Tran, T. P. (2013). Behavior of reinforced concrete columns under combined effects of axial and blast-induced transverse loads. *Engineering Structures*, 55, 26-34.
- Bao, X., & Li, B. (2010). Residual strength of blast damaged reinforced concrete columns. *International Journal of Impact Engineering*, 295-308.
- Barreiro, A., Crespo, A., Domínguez, J., & M., G.-G. (2012). Aplicación del modelo SPH en la protección de costas.
- Baylot, J. T., & Bevins, T. L. (2007). Effect of responding and failing structural components on the airblast pressures and loads on and inside of the structure. *Computational Structures*, 85, 891-910.
- Becker, P., Nigro, N., & Idelsohn, S. (2012). Integración temporal explícita con grandes pasos de tiempo de la ecuación de transmisión del calor. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 28(4), 187-197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.001>
- Beltrán, J. C. (2021, 03 20). *Integración directa*. Retrieved from Matemática de la U (MatU): <https://www.calculo.jcbmat.com/id468.htm>
- Benson, D. (1990). *COMPUTATIONAL METHODS IN LAGRANGIAN AND EULERIAN HYDROCODES*. San Diego.
- Collins, G. (2002). *An Introduction to Hydrocode Modeling*.
- Cui, J., Shi, Y., & Li, Z. (2015). Failure analysis and damage assessment of RC-columns under close-in explosions. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(5), B4015003-1–B4015003-11. doi:<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000766>

- Dua, A., Braimah, A., & Kumar, M. (2019). Contact explosion response of RC columns: experimental and numerical investigation. *Structures and Buildings*. doi:<https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00223>
- Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Abbas, H., Al-Salloum, Y. A., & Alsayed, S. H. (2011). Effect of blast loading on CFRP-Retrofitted RC columns – a numerical study. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 8, 55-81.
- Esarte, A. (2020, 05 21). *Visio, De Microsoft*. Retrieved from ESPACIOBIM: <https://www.espaciobim.com/visio>
- Guevara Patiño, R. (2016, julio). El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? *Folios*.
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. McGraw-Hill .
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado , C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la Investigación* (quinta ed.). McGraw-Hill.
- Jayasooriya, R., Thambiratnam, D., Perera, N., & Kosse, V. (2011). Blast and Residual Capacity Analysis of Reinforced Concrete Framed Buildings. *Engineering Structures*, 33, 3483-3495.
- Jiménez, S. (2015, septiembre 29). *ENFOQUE EULERIANO DEL MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS*. Retrieved from Hidráulica Fácil: <https://www.hidraulicafacil.com/2015/09/Eulerianohidraulica.html>
- Korwar, P. (2020, agosto 17). *Introduction to Multivariate Regression Analysis*. Retrieved from Great Learning: <https://www.mygreatlearning.com/blog/introduction-to-multivariate-regression/>
- Kwaffo, I. (2017). *Residual Capacity of Blast-Damaged Reinforced Concrete Columns*.
- Li, B., Nair, A., & Kai, Q. (2012, junio 1). Residual Axial Capacity of Reinforced Concrete Columns with Simulated Blast Damage. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(3).
- Liu, M., & Lui, G. (2010). Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17, 25-76.

- Londoño, O., Maldonado, L., & Calderón, L. (2016). *Guía para Construir Estados del Arte*. Bogotá: International Corporation of Network of Knowledge, ICONK.
- Luccioni, B., & Aráoz, G. (2011, noviembre). EROSION CRITERIA FOR FRICTIONAL MATERIALS UNDER BLAST LOAD. *Mecánica Computacional*, 30, 1809-1831.
- Luccioni, B., Ambrosini, R., & Danesi, R. (2004). Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*, 63-71.
- Minitab. (2019, abril 18). *Comprensión del Análisis de Varianza (ANOVA) y la Prueba F*. Retrieved from El Blog de Minitab: <https://blog.minitab.com/es/compreension-del-analisis-de-varianza-anova-y-la-prueba-f>
- Minitab. (2019). *Soporte técnico de Minitab 18*. Retrieved from Minitab 18: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/>
- Molina Montoya, N. P. (2005). ¿Qué es el estado del arte? *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 2-3.
- Monaghan, J. (1998). An introduction to SPH. *Computer Physics Communications*, 48, 89-96.
- Núñez, E., Steyerberg, E., & Núñez, J. (2011). Estrategias para la elaboración de modelos estadísticos de regresión. *Revista Española de Cardiología*, 64(6), 501-507. doi:<https://doi.org/10.1016/j.recesp.2011.01.019>
- Nystrom, U. (2008). *Concrete Structures Subjected to Blast and Fragment Impacts*.
- Nystrom, U. (2013). *Modelling of Concrete Structures Subjected to Blast and Fragment Loading*. Göteborg.
- Patil, N., & Khrud, V. (2018). Effects of different reinforcement schemes and column shapes on the response of reinforced concrete columns subjected to blast loading. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 05(08), 571-581.
- Peralta, R., & Sarango, Á. (2019). *EVALUACIÓN DE DAÑO EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO A ESCALA REAL POR EFECTO DE CARGAS EXPLOSIVAS*. Sangolquí.
- Pierazzo, E., & Collins, G. (2004). *A Brief Introduction to Hydrocode Modeling of Impact Cratering*.

- Riedel, W. (2000). *Beton unter dynamischen Lasten Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter (in German)*. Doctoral Thesis.
- Roller, C., Mayrhofer, C., Riedel, W., & Thoma, K. (2013). Residual load capacity of exposed and hardened concrete columns under explosion loads. *Engineering Structures*, 55, 66-72. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.004>
- RYTEWIKI. (n.d.). *Análisis Multivariante*. Retrieved marzo 30, 2021, from RyteWiki: [https://es.ryte.com/wiki/An%C3%A1lisis\\_Multivariante](https://es.ryte.com/wiki/An%C3%A1lisis_Multivariante)
- Scapin, M. (2013). *Shock-wave and high strain-rate phenomena in matter: modeling and applications. Ph.D. Thesis*.
- Simscale. (2021, febrero 25). *What is a Mesh?* Retrieved from SIMSCALE: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/preprocessing/what-is-a-mesh/>
- Singh, T., Dontha, L., & Bhardwaj, V. (2008). Study into blast vibration and frequency using ANFIS and MVRA. *Minin Technology*, 117(3), 116-121. doi:DOI 10.1179/037178409X405741
- Stanislaw, D., & Leszek, F. (2015). Numerical Simulations of Blast Loads from Near-field Ground Explosions in Air. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37(4), 11-18. doi:DOI: 10.1515/sgem-2015-0040
- Wu, K.-C., Li, B., & Tsai, K.-C. (2011). The Effects Of Explosive Mass Ratio On Residual Compressive Capacity of Contact Blast Damaged Composite Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(4), 602-612. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.12.001>
- Yenes, J., Castedo, R., Santos, A., & J.R., S. (2016). Experimentación, simulación y análisis de artefactos improvisados-proyectiles formados por explosión. *Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 32(1), 48-57. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2014.11.003>

Anexos