

**ESTUDIO Y MODELAMIENTO POR ELEMENTOS FINITOS DE LA
INTERACCIÓN ACERO-CONCRETO DE TUBERIAS EMBEBIDAS EN
CONCRETO**

ANDRÉS EDUARDO ABRIL RONDEROS



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D. C.
2019**

**ESTUDIO Y MODELAMIENTO POR ELEMENTOS FINITOS DE LA
INTERACCIÓN ACERO-CONCRETO DE TUBERIAS EMBEBIDAS EN
CONCRETO**

ANDRÉS EDUARDO ABRIL RONDEROS

**Trabajo de grado para Optar al Título de
Ingeniero Civil**

Directora:

**Marisol Nemocón Ruiz
Ingeniera Civil**

Coasesor:

**Carlos Pérez Lasso
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D. C.
2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

Ing. Marisol Nemocón
Director de Proyecto

Ing Carlos Pérez Lasso
Coasesor de proyecto

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogota D.C., 19 de mayo de 2019

Este trabajo es dedicado a todas las horas de apoyo, paciencia y escucha que me han brindado mi madre Rosalba y mi hermano Jonathan.

Esto es por y para Uds. con todo mi amor.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento al Ingeniero Carlos Pérez Lasso, coasesor de proyecto de grado, quien de manera amable con sus lineamientos, tiempo y enseñanza me permitió aprender de elementos finitos y del software Abaqus para el desarrollo de la tesis. También quiero agradecer a la Asesora de proyecto la Ingeniera Marisol Nemocón por sus correcciones en el documento.

GLOSARIO

ACERO: “es el nombre que se le dan a las aleaciones de hierro (Fe) y carbono (C), donde el contenido en carbono en disolución sólida en el hierro sea menor del 2,1%. El acero también contiene otros elementos químicos aleantes, hasta alcanzar más de 30, pero entre los que destacan el manganeso, el cromo, el níquel, el silicio, el molibdeno, y el vanadio, etc., que le van modificando sus propiedades de modos muy distintos para permitirlo adaptarlo a las necesidades según el uso.”¹

CONCRETO: Mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos.²

ELEMENTOS FINITOS: “El método de elementos finitos es un método numérico como el método de diferencias finitas, pero es más general y poderoso en su aplicación a problemas del mundo real que involucran complicadas condiciones físicas, de geometría y de contorno. En el método de elementos finitos, un dominio dado se ve como una colección de subdominios, y sobre cada subdominio la ecuación que rige se aproxima por cualquiera de los métodos variacionales tradicionales.”³

ESFUERZO: Esfuerzo es la resistencia que ofrece un área unitaria (A) del material del que está hecho un miembro para una carga aplicada externa (fuerza, F)⁴

¹ UNIÓN DE EMPRESAS SIDERÚRGICAS. Que es el acero [en línea]. Madrid: La Empresa [citado 18 noviembre, 2017]. Disponible en <https://unesid.org/siderurgia-que-es-el-acero.php>

² MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, NSR-10 Norma Sismo Resistente Colombiana, Segunda. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS. 2010

³ PRIETO RUIZ y GARZON VARGAS, José Esteban y Cristian Felipe. Análisis numérico por el método de elementos finitos de una conexión de un perfil de alma llena embebido en un elemento de concreto. Bogotá, 2018, 89p. (Trabajo De Grado Para Optar al Título De Ingenieros Civiles). Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería.

⁴ GUILLEN MARTINEZ, Juan Francisco Concepto de esfuerzo: [En línea]. 28 Abril de 2019 Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/79610753/CONCEPTO-DE-ESFUERZO>.

INTERACCIÓN: “Efecto en el que intervienen un número de cuerpos, partículas o sistemas como resultado del cual tiene lugar algún cambio físico o químico en uno o más de ellos. V. también interacciones fundamentales.”⁵

LIMITE ELASTICO: “Valor del esfuerzo unitario hasta el cual es proporcional la deformación al esfuerzo. A valores inferiores al límite elástico no se producen deformaciones permanentes.”⁶

MODELO: “Un modelo es una descripción interpretativa de un fenómeno que facilita el acceso al fenómeno (‘fenómeno’ refiere a ‘cosas que acontecen’), explicando que “Las interpretaciones descriptivas pueden descansar, por ejemplo, en idealizaciones o simplificaciones o en analogías con descripciones interpretativas de otros fenómenos.”⁷

MODULO DE ELASTICIDAD: “Relación del esfuerzo unitario a la deformación unitaria correspondiente para cualquier valor del esfuerzo unitario menor que el límite de elasticidad.”⁸

TUBERÍA: “Las tuberías son un sistema formado por tubos, que pueden ser de diferentes materiales, que cumplen la función de permitir el transporte de líquidos, gases o sólidos en suspensión (mezclas) en forma eficiente, siguiendo normas estandarizadas y cuya selección se realiza de acuerdo a las necesidades de trabajo que se va a realizar.”⁹

⁵ OXFORD UNIVERSITY PRESS. Diccionario Oxford –Complutense, Física. Segunda edición. Madrid. COMPLUTENSE, 2007

⁶ GARCIA DIAZ, Rafael. Manual de fórmulas de ingeniería. Ciudad de México: limusa, 2005. 121p.

⁷ ROLLERI, José. L. ¿Qué son los modelos físicos? En: Valenciana. No 11 (Ene-jun.2013); p. 271-288.

⁸ GARCIA DIAZ, Rafael. Manual de fórmulas de ingeniería. Ciudad de México: limusa, 2005. 121p

⁹ COTACALLAPA LOPEZ, Carmen. Tipos de tubería. Lima, 2014, 39p. Monografía para el curso de abastecimiento de agua y alcantarillado (Ingeniero civil). Universidad privada Telesup. Facultad de ingeniería.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación representa el estudio de la interacción acero y concreto en blindajes hidroeléctricos apoyado en referencias bibliográficas y por medio del software de análisis de elementos finitos Abaqus CAE, en el cual se desarrollaron siguiendo los lineamientos de las normas AWWA C200 y NSR-10 para los datos de resistencia de materiales y presiones hidrostáticas que permitieron la extracción de modelos 2D con resultados asociados a distribución de esfuerzos, deformaciones y presiones de contacto; información con la cual se plateo el análisis del comportamiento.

ÍNDICE

1	TÍTULO.....	17
2	ALTERNATIVA.....	17
3	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	18
4	INTRODUCCIÓN	19
5	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
6	ANTECEDENTES	21
7	JUSTIFICACIÓN	25
8	OBJETIVOS	26
8.1	GENERAL.....	26
8.2	ESPECIFICOS.....	26
9	ALCANCES Y LIMITACIONES.	27
10	MARCO DE REFERENCIA.....	29
10.1	MARCO CONCEPTUAL.....	29
10.2	MARCO TEÓRICO	30
10.2.1	Método de elementos finitos	30
10.2.1.1	Sistemas discretos y sistemas continuos.....	34
10.2.2	Tuberías de conducción en concreto	35
10.2.3	Blindaje de acero	36
10.2.4	Clasificación y diseño de la estructura de conducción.....	38
10.2.5	Diseño de blindajes.....	39
10.2.6	Interacción acero concreto.....	42
10.2.7	Software de análisis y modelamiento por método de elementos finitos Abaqus 44	
10.2.7.1	Análisis de contacto.....	45
10.2.7.2	Características de contacto general (General contact) en Abaqus/Standard	46
10.2.7.3	(CEL – Coupled Eulerian Lagrangian) Eulerian-Lagrangian acoplado: 48	

10.2.7.4	(SPH - Smoothed particle hydrodynamics) Hidrodinámica de partículas alisadas	49
10.2.7.5	(DEM – Discrete element method) Método de elementos discretos. 50	
10.2.7.6	Características de pares de contacto (Contact pairs) en Abaqus/Standard	50
10.2.7.7	Detección de contacto (Contact detection)	51
10.2.7.8	Nodo a superficie (Node to Surface)	51
11	ESTADO DEL ARTE	52
12	METODOLOGÍA	57
13	MODELACIÓN	59
13.1	UNIDADES	59
13.2	MATERIALES	59
13.2.1	Tubería en acero	59
13.2.2	Concreto	60
13.3	DISEÑO DEL MODELO.	63
13.4	MODELOS DE INTERACCIÓN.	69
13.4.1	Part	69
13.4.2	Property	71
13.4.3	Mesh	75
13.4.4	Assembly	79
13.4.5	Step	79
13.4.6	Interaction	81
13.4.7	Load	84
13.4.8	Job	86
14	RESULTADOS	94
14.1	MODELO 1	94
14.2	MODELO 2	96
14.3	MODELO 3	97
14.4	MODELO 4	99

14.5	MODELO 5	100
14.6	MODELO 6	102
14.7	MODELO 7	103
14.8	MODELO 8	105
14.9	MODELO 9	106
14.10	MODELO 10	108
14.11	MODELO 11	109
14.12	MODELO 12	111
15	ANÁLISIS DE RESULTADOS	113
15.1	ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS	113
15.2	ANÁLISIS DE DEFORMACIONES	116
15.3	ANÁLISIS DE PRESIONES DE CONTACTO	118
16	CONCLUSIONES	120
17	RECOMENDACIONES	123
18	BIBLIOGRAFÍA	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Los 30 pies de diámetro de blindaje hacia abajo desde Arizona y Nevada.	22
Figura 2. Blindaje Anderson Ranch Dam de 15 pies de diámetro.....	23
Figura 3. Diagrama esquema de blindaje en acero de la Planta hidroeléctrica de Kannagawa.....	24
Figura 4. Mapa conceptual estudio y modelamiento por elementos finitos de la interacción acero-concreto de blindajes de conducción de agua en proyectos hidroeléctricos.....	29
Figura 5. Representación de un dominio bidimensional por una colección de triángulos y cuadriláteros	31
Figura 6. Determinación del perímetro de un círculo.	32
Figura 7. Efectos de elementos de aleación	37
Figura 8. Configuración de los movimientos del suelo, Lateral y longitudinal	43
Figura 9. Estado de esfuerzos iniciales	43
Figura 10. Software de análisis por elementos finitos Abaqus/CAE 2017	45
Figura 11. Edit interaction for general contact, option of Abaqus CAE	48
Figura 12. Ejemplos de aplicación de análisis por contacto general con CEL	49
Figura 13. Sección de blindaje.....	63
Figura 14. Menú Creación de parte.	69
Figura 15. Creación de parte en concreto.....	70
Figura 16. Creación de parte de tubería.	70
Figura 17. Menú Administrar material	71
Figura 18. Ventana de Edición de material para Concreto.	72
Figura 19. Ventana Edición de material para acero.....	73
Figura 20. Ventana Crear sección.	74
Figura 21. Ventana Editar sección.....	74
Figura 22. Asignación de sección para parte.....	75
Figura 23. Ventana de edición global de nodos.....	75
Figura 24. Ejemplo de partición de sección	76
Figura 25. Menú Control de malla.....	77
Figura 26. Asignación de malla tipo estructural a sección	77
Figura 27. Ejemplo de sección con asignación de malla	78
Figura 28. Menú Crear ensamblaje.....	79
Figura 29. Menú Crear paso	80
Figura 30. Menú Administrador de pasos	80
Figura 31. Edición de propiedades de contacto	81
Figura 32. Menú Crear interacción.....	82

Figura 33. Menú Edición de interacción.....	83
Figura 34. Ejemplo de Creación de condición de frontera	84
Figura 35. Menú Edición de condición de frontera.....	85
Figura 36. Menú de Edición de carga de presión.....	86
Figura 37. Menú Crear trabajo.....	87
Figura 38. Menú Administrador de trabajos	88
Figura 39. Menú de impresión de deformación de forma.....	88
Figura 40. Menú de opciones de impresión	89
Figura 41. Menú salida de datos	89
Figura 42. Menú manejo de visualización de superficies.....	90
Figura 43. Ejemplo de menú selección de distribución esfuerzos de deformación en la estructura	90
Figura 44. Ejemplo de datos de distribución de esfuerzos de deformación en la estructura de concreto	91
Figura 45. . Ejemplo de selección de deformación en la estructura de concreto	92
Figura 46. Ejemplo de presión de contacto en pared exterior de tubería.....	92
Figura 47. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 1.....	94
Figura 48. Deformación en blindaje de concreto para modelo 1.....	95
Figura 49. Presión de contacto en tubería para modelo 1	95
Figura 50. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 2.....	96
Figura 51. Deformación en blindaje de concreto para modelo 2.....	96
Figura 52. Presión de contacto en tubería para modelo 2	97
Figura 53. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 3.....	97
Figura 54. Deformación en blindaje de concreto para modelo 3.....	98
Figura 55. Presión de contacto en tubería para modelo 3	98
Figura 56. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 4.....	99
Figura 57. Deformación en blindaje de concreto para modelo 4.....	99
Figura 58. Presión de contacto en tubería para modelo 4	100
Figura 59. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 5.....	100
Figura 60. Deformación en blindaje de concreto para modelo 5.....	101
Figura 61. Presión de contacto en tubería para modelo 5	101
Figura 62. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 6.....	102
Figura 63. Deformación en blindaje de concreto para modelo 6.....	102
Figura 64. Presión de contacto en tubería para modelo 6	103
Figura 65. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 7.....	103
Figura 66. Deformación en blindaje de concreto para modelo 7.....	104
Figura 67. Presión de contacto en tubería para modelo 7	104
Figura 68. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 8.....	105
Figura 69. Deformación en blindaje de concreto para modelo 8.....	105

Figura 70. Presión de contacto en tubería para modelo 8	106
Figura 71. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 9.....	106
Figura 72. Deformación en blindaje de concreto para modelo 9.....	107
Figura 73. Presión de contacto en tubería para modelo 9	107
Figura 74. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 10.....	108
Figura 75. Deformación en blindaje de concreto para modelo 10.....	108
Figura 76. Presión de contacto en tubería para modelo 10	109
Figura 77. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 11.....	109
Figura 78. Deformación en blindaje de concreto para modelo 11.....	110
Figura 79. Presión de contacto en tubería para modelo 11	110
Figura 80. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 12.....	111
Figura 81. Deformación en blindaje de concreto para modelo 12.....	111
Figura 82. Presión de contacto en tubería para modelo 12	112

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Relación de Modelos y esfuerzo máximo	114
Gráfica 2. Relación entre modelo y f'_c máximo a tensión	115
Gráfica 3. Relación de modelos y deformación máxima	117
Gráfica 4. Relación de modelos y presión de contacto.	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características mecánicas de acero	38
Tabla 2 Categorías y clases de exposición (Tabla C.23-C.4.2.1.)	61
Tabla 3. Requisitos para el concreto según la clase de exposición	62
Tabla 4. Calculo de S.....	64
Tabla 5 Dimensiones para tubería 36" ASTM A-106 Gr. B.....	65
Tabla 6. Dimensiones para tubería 42" ASTM A-106 Gr. B	65
Tabla 7. Dimensiones para tubería 48" ASTM A-106 Gr. B	66
Tabla 8. Calculo de Presión según cambio de diámetro y espesor.	66
Tabla 9. Dimensiones de blindaje acorde a diámetro	67
Tabla 10. Cálculo de Modulo de Elasticidad según f'_c	67
Tabla 11. Relación de Modelos y esfuerzo máximo.....	114
Tabla 12. Resistencia máxima a tensión registrada en modelos	115
Tabla 13. Relación de modelos y deformación máxima.....	116
Tabla 14. Relación de modelos y presión de contacto.....	118

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Cálculos	130
Anexo 2. Modelos	131
Anexo 3. Análisis de resultados.....	132

1 TÍTULO

ESTUDIO Y MODELAMIENTO POR ELEMENTOS FINITOS DE LA INTERACCIÓN ACERO-CONCRETO DE TUBERIAS EMBEBIDAS EN CONCRETO

2 ALTERNATIVA

Con el fin de cumplir con las alternativas que contempla el Trabajo de grado en el acuerdo 265 del Capítulo I, Artículo 4, numeral 3, se opta por la siguiente modalidad:

- **Trabajo de investigación:** consiste en la formulación y propuesta de solución de un problema de investigación aplicado en la disciplina. Dentro de los trabajos de investigación, el estudiante también puede identificar una necesidad tecnológica y formular un proyecto que responda a la misma y a los avances en el desarrollo de un prototipo, simulación o diseño.

3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Análisis de resistencia a estructuras.

4 INTRODUCCIÓN

En los últimos años el desarrollo de proyectos de infraestructura hidráulica han tenido gran auge debido a la demanda del sector energético, tanto en ciudades principales como municipios en proceso de expansión, estos megaproyectos están enfocados en el diseño de caudales y en muchas ocasiones estructuras civiles que demandan túneles de gran diámetro, por lo que se ve la importancia de analizar con precisión las fuerzas a las que están expuestos los revestimientos de túneles en presión, tomando como estructura de análisis las tuberías de conducción con blindajes en acero.

La característica principal para este trabajo es estudiar la interacción de contacto entre la pared externa de la tubería de acero que esta confinada con un blindaje de concreto, debido al tipo de estructura e interacción a estudiar se ha realizado la búsqueda de información teórica, técnica y normativa relacionada con los blindajes, donde se evidencia el estudio de este tipo de comportamientos se emplea programas de estructuras específicos y para este caso se implementara el software Abaqus, el cual permite el análisis con la implementación de elementos finitos.

Para todo ello se analizó el contacto con la tubería en acero teniendo en cuenta los principales factores a iterar (Diámetros, espesor de tubería) que tendrán relación con el recubrimiento en concreto cuando son sometidos a esfuerzos de presiones internas debido a su implementación en conducción de agua de grandes caudales como los requeridos en centrales hidroeléctricas.

Se encuentra importancia en el estudio de este tipo de estructuras civiles debido a la poca implementación de software especializado en elementos finitos el cual permite un análisis detallado de las áreas en contacto que sufren más deformaciones y esfuerzos, y así determinar el adecuado diseño de ingeniería que proporcione estructuras de este tipo acordes a las necesidades de estos proyectos hidroeléctricos.

5 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Es común ver tubería de acero embebida en concreto en conducciones de agua a presión áreas o enterradas. Es de interés para los ingenieros civiles conocer el comportamiento mecánico detallado de la interacción acero-concreto para fines de diseño. Esta tesis propone el análisis de elementos finitos como método especializado para entender este comportamiento.

¿Cómo es la distribución de esfuerzos, deformaciones y presiones de contacto en el concreto, considerando la interacción mecánica acero – concreto?

6 ANTECEDENTES

La implementación de recubrimientos en tuberías en los últimos años ha cobrado gran importancia debido a la demanda de estructuras de conducción hidráulica, en muchas ocasiones las condiciones topográficas, hídricas, geomorfológicas no son las más aptas para hacer este tipo de conducción de manera sencilla, por lo tanto, estos diseños han sido soluciones prácticas que responden a las necesidades del ser humano y en ocasiones dada la antigüedad de dichos sistemas de acueducto presentan fallas a lo largo del sistema de conducción, fallas como fisuras del concreto, pérdidas de producto a lo largo del conducto; pandeo local, fallas en las juntas, entre otras consecuencias que pueden afectar otras partes del sistema de conducción; es entonces necesario reforzar ese tramo y así evitar dichas fallas, para ello se dispuso una tubería en un material con mayor compatibilidad ante los problemas presentados en el concreto expuesto al agua, a grandes rasgos es el planteamiento inicial por el cual se utilizan tuberías en acero que hacen las veces de blindaje para la tubería en concreto, sin embargo, “dados los cambios de caudales en dichos proyectos ha presentado fallas a lo largo del sistema de conducción, y con el tiempo impacto al proyecto de manera significativa en cuanto a tiempos, mano de obra y por supuesto factores económicos.”¹⁰

Por lo anterior, se han implementado estudios de los blindajes en acero, por ejemplo, los desarrollados en la Hidroeléctrica de Galicia, la cual se desarrollaba en construcción cuando se analizó la tubería enterrada para evitar una ladera muy descomprimida, que hubiera comprometido seriamente la estabilidad de una tubería exterior¹¹, en tal situación se hizo un análisis teórico.

Otros estudios analizan el comportamiento del acero y concreto, desde la parte estructural, se han realizado en blindajes a presión interna como el desarrollado hace cerca de 80 años en la construcción de la planta de hidroenergía de Noruega, la cual fue liderada con todas las soluciones, usando sistemas de diseño precisos como el de métodos finitos que han tenido resultados seguros para localizar líneas de presión subterráneas. Estos métodos aplicados a túneles han tenido bajo costo de construcción y así reduciendo un poco el capital, como también el periodo de construcción. Adicional a mejorado la distribución doméstica en Noruega, debido a

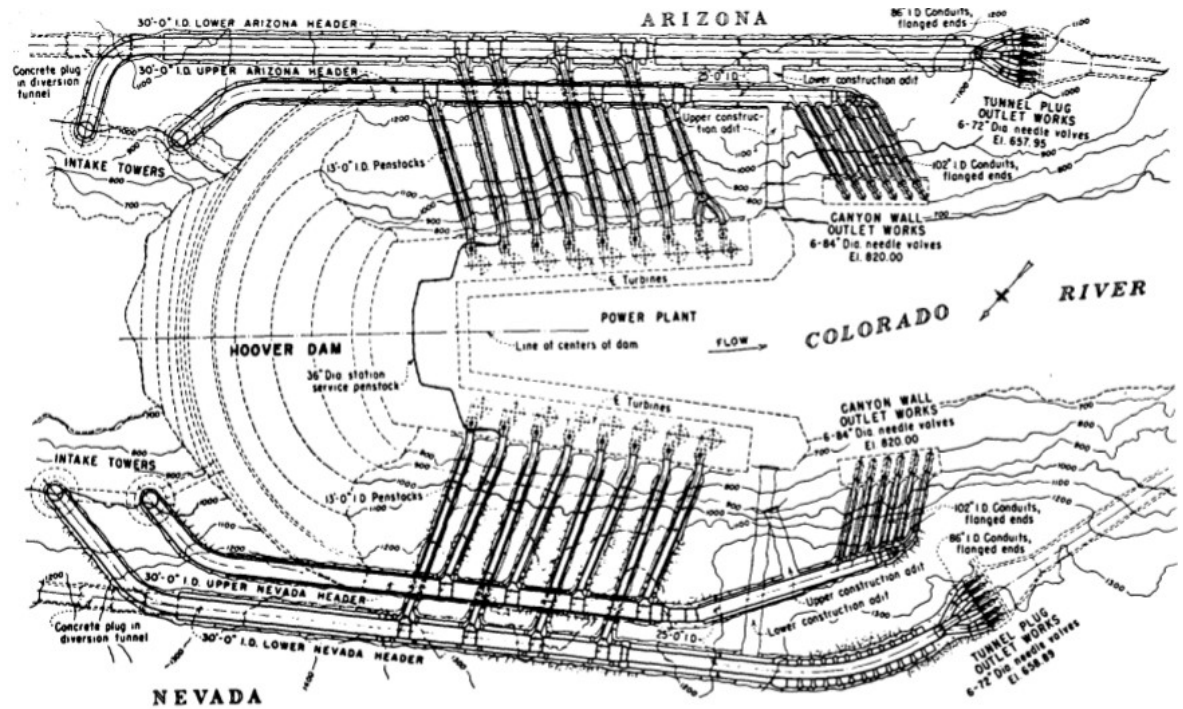
¹⁰ D. Red, E. D. E. Acueducto, and A. Y. A. D. E. Bogotá, “ALCANTARILLADO EAB - ESP,” pp. 1–36, 2017.

¹¹ TORAL SANTANDER, José Ramón. Pandeo de Blindajes de Galerías Forzadas y Tuberías Embebidas En Presas de Hormigón. 2011, pp. 515–24, Disponible en http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1965/1965_tomol_3002_06.pdf.

que planta de tratamiento que fue construida cerca del año de 1950 y desde la mitad de los 60's han brindado soluciones tradicionales.¹²

Otra obra civil en los cual se implementaron blindajes en acero, fue para el desagüe de Arizona y Nevada en la presa Hoover como se muestra en la Figura 1¹³

Figura 1. Los 30 pies de diámetro de blindaje hacia abajo desde Arizona y Nevada.



Fuente: Welded Steel Penstocks¹⁴

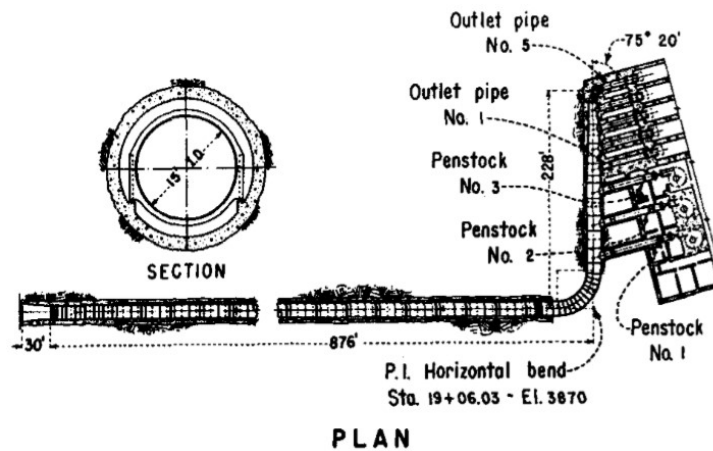
Y en la sección como se muestra en la Figura 2.

¹² PALMSTROM, Arild. Norwegian Design and Construction Experiences of Unlined Pressure Shafts and Tunnels. Design. Enero 1987, 1 p.

¹³ United States Department of the Interior Bureau of reclamation. Welded Steel Penstocks. Washinton. Editorial: U.S. Government Printing Office. 1977.

¹⁴ Ibid., p 02

Figura 2. Blindaje Anderson Ranch Dam de 15 pies de diámetro.



Fuente: Welded Steel Penstocks¹⁵

Otro megaproyecto en el cual se implementó blindajes de conducción hidráulica fue la planta eléctrica de Tokyo:

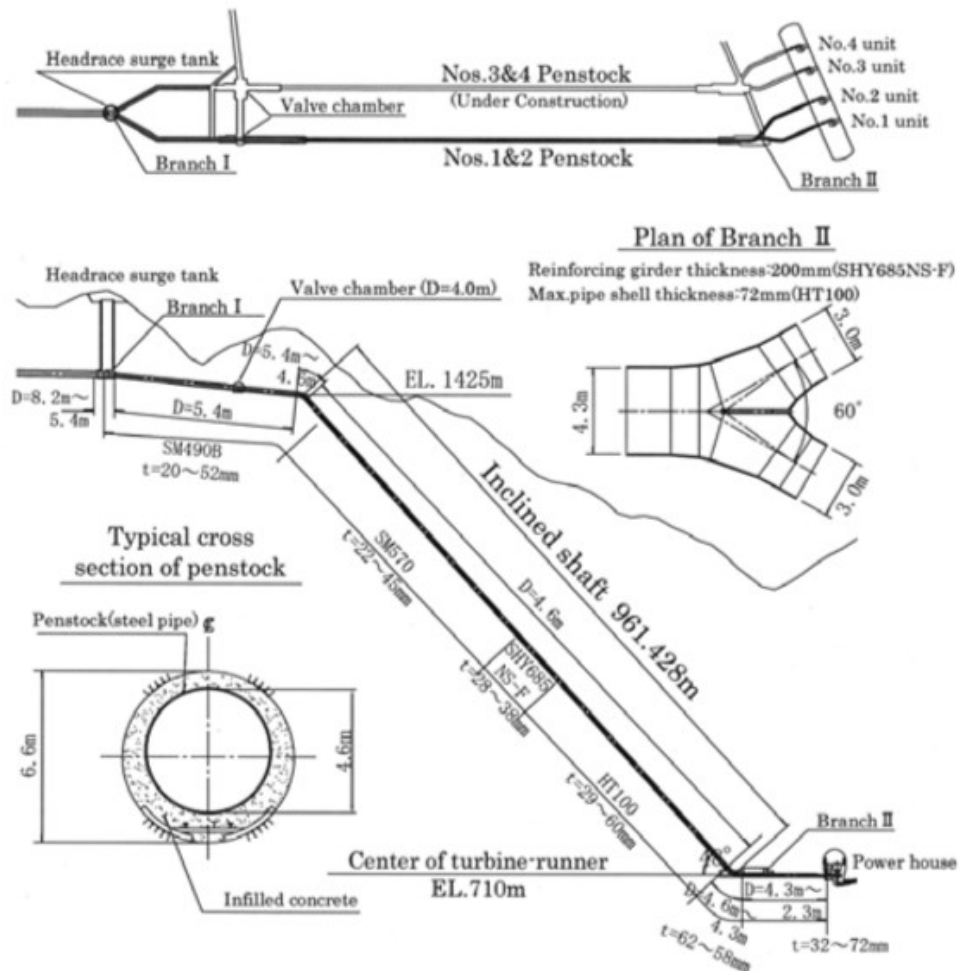
[...] por la compañía de Kannagawa la cual está localizada en Gunma prefecture, Japón, para esta planta eléctrica se utilizó acero de alta intensidad (HT100) con fuerza a tensión de 950 N/mm², estos fueron adoptados para usar en los blindajes y para reducir los costos de construcción. Para esta planta los blindajes están embebidos en roca maciza a lo largo de 1400 m con una diferencia de elevación de 745m y teniendo una cabeza de diseño de 1076 m y una cabeza estática es 817 m y dentro del rango de diámetros desde 2.3 m hasta 8,2 m. Los blindajes metálicos consisten en una sección de eje horizontal inclinado y sección inferior inclinada. Esta inclinación fue de 48 grados en una tubería de 4,6 m de diámetro [...]

Como se muestra en la Figura 3¹⁶

¹⁵ *Ibíd.*, p. 03

¹⁶ AOKI K, MASAYUKI M. Construction of Steel Penstocks using HT100 at Kannagawa Hydropower Plant. Conf High Strength Steels Hydropower Plants. 2015:1-8 p.

Figura 3. Diagrama esquema de blindaje en acero de la Planta hidroeléctrica de Kannagawa



Fuente: Construction of Steel Penstocks using HT100 at Kannagawa Hydropower Plant ¹⁷

Este tipo de estructuras también han sido analizadas desde la fatiga del material evaluando términos de confiabilidad y seguridad, fenómenos que han sido las principales causas de destrucción de los materiales. A veces, las estructuras de acero con grandes esfuerzos como los de las centrales hidroeléctricas, se diseñan adecuadamente respecto a deformación elástica y plástica, pero estos también pueden sufrir daños catastróficos causados por una ruptura repentina. La responsabilidad de eso se da por la fatiga del material, por lo cual, se evaluó la vida útil de las compuertas de acero en hidroeléctricas basado en la teoría del crecimiento de grietas (propagación de grietas)

¹⁷ Ibid., p. 01

7 JUSTIFICACIÓN

Para la optimización de los procesos de ingeniería como es el caso de sistemas de conducción hidráulica el estudio de tuberías revestidas de concreto se requieren métodos que permitan analizar con precisión su comportamiento a lo largo de su sección como también su interacción con el medio que le rodea, refiriéndose a la pared de concreto y la superficie de tubería que esta alrededor de éste, puesto que dichos parámetros en muchas ocasiones son despreciados sus análisis en conjunto; el presente trabajo pretende relacionar estos en conjunto con los esfuerzos a las cuales se verá expuesto para así determinar las cargas que se transmiten a cada material.

La recopilación de datos en el presente trabajo pretende apoyar la toma de decisiones en los actuales procesos de diseño de sistemas de conducción donde se implementen blindajes de acero, estos resultados estarán apoyados con modelos con resultados en 2D como también cálculos numéricos que respalden la información consignada, todos estos datos elaborados por medio de software especializado en análisis por método de elementos finitos; estos resultados serán de interés para diseños de ingeniería que presenten condiciones iniciales similares a las planteadas y utilizadas en este proyecto de grado.

Este tipo de alcances de estudio tan específicos pretenden implementarse como análisis dentro de las etapas de diseño, los cuales puedan ser de utilidad para proyectos de infraestructura hidráulica para así mitigar las fallas del sistema, rehabilitación y mantenimiento de estructuras. Se busca mejorar el tiempo de ejecución del diseño.

Cuando se presentan fallas en sistemas de conducción hidráulica afectan a la comunidad que se esté beneficiando del recurso, por lo tanto, mejorar la etapa de diseño con estudios específicos en las tuberías contribuye a minimizar impactos negativos a la sociedad.

El presente trabajo busca evaluar la aplicabilidad del software Abaqus para el análisis del comportamiento mecánico aportando una metodología racional dentro de los principios de resistencia de materiales con la cual se pueda analizar de forma adecuada este tipo de estructuras, fomentando el diseños confiables y una alternativa diseño adicional a las realizadas por otros software, en este caso, por medio de elementos finitos.

8 OBJETIVOS

8.1 GENERAL

Analizar la interacción entre acero y concreto en estructuras de conducción hidráulica en mega proyectos por medio de software especializado de elementos finitos.

8.2 ESPECIFICOS

- Investigar el actual desarrollo de blindajes de conducción hidráulica según la información de otros autores.
- Simular mediante elementos finitos comportamiento de blindajes en acero y su interacción con el concreto.
- Representar el comportamiento mecánico del concreto, acero y su transferencia de energía al concreto en blindajes de estructuras de conducción hidráulica.
- Modelar una estructura de blindaje mediante los elementos finitos en el programa de análisis Abaqus.

9 ALCANCES Y LIMITACIONES.

Los estudios implementados para este proyecto de grado proponen una aproximación de la interacción acero – concreto de los blindajes en tuberías forzadas a grandes presiones, por lo cual se orientan los siguientes alcances:

- Recopilación de información relevante de blindajes de acero en estructuras hidráulicas.
- Comportamiento numérico por medio de software de elementos finitos para la distribución de cargas del blindaje.
- Caracterización de fuerzas no lineales blindajes y su transmisión de energía exterior al concreto y a la superficie de roca que la rodea.
- Análisis del comportamiento acero – concreto en blindajes de tuberías frente a presiones internas debido a caudales de gran presión.

El presente proyecto de grado orienta la búsqueda de información y posterior análisis numérico aplicado a blindajes de acero, pero limita su aplicación en un proyecto de construcción actual por lo cual se prevén modelos para una posterior aplicación real. Al ser un análisis de tipo estructural, este difiere de comportamientos hidráulicos que puedan modificar los actuales resultados de caudales y fuerzas que se utilicen para estos blindajes.

A su vez, para esta etapa de investigación se omite el comportamiento de dichos blindajes en otros materiales que no sea acero, por lo cual no se tendrán en cuenta comportamientos con posibles aleaciones u otros materiales. También se omite analizar el comportamiento con caudales de agua que provengan de acuíferos luego de su paso por estructuras de alcantarillado y potabilización para lo cual se desprecian comportamientos hidráulicos de fluidos diferentes a este en interacción con tuberías.

Como el enfoque de este proyecto es el estudio para mega estructuras hidráulicas, no se tomarán en cuenta el análisis de tuberías inferiores a 6" (seis pulgadas) puesto que estas por lo general son de tipo doméstico a escala comercial y su porcentaje de pérdidas es mínimo respecto a los caudales que se utilizan en grandes estructuras hidráulicas.

Tampoco se tendrá en cuenta condiciones de suelo en las tuberías enterradas que puedan afectar drásticamente las estructuras de conducción a analizar, por lo cual, la

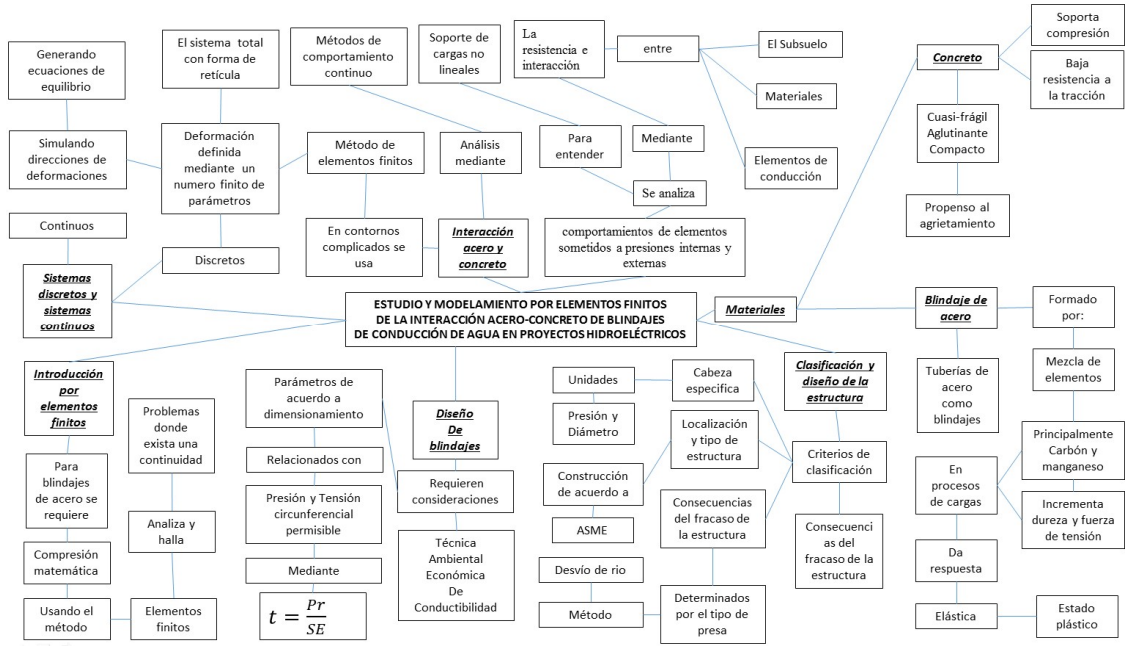
línea de investigación se centra en análisis estructural y no en el análisis de parámetros geotécnicos, hidráulicos y climáticos.

Este proyecto de grado orienta la implementación de resultados en la aplicación de dichos blindajes siempre y cuando los procesos constructivos sean los actualmente usados, por lo cual el análisis no orienta construcción o demás parámetros de instalación, soldadura, y conducción de fluidos en él.

10 MARCO DE REFERENCIA

10.1 MARCO CONCEPTUAL

Figura 4. Mapa conceptual estudio y modelamiento por elementos finitos de la interacción acero-concreto de blindajes de conducción de agua en proyectos hidroeléctricos.



Fuente: Autor.

10.2 MARCO TEÓRICO

El comportamiento de elementos sometidos a presiones internas y externas como es el caso de estudio de blindajes de acero constituye un análisis mediante hipótesis de materiales y elementos de conducción considerados relevantes en el análisis de resistencia e interacción del acero y concreto, por lo cual, conocer las principales propiedades físicas de estos, permite explicar el comportamiento que estos tendrán al soportar cargas de tipo no lineal, como lo demuestra el análisis por elementos finitos.

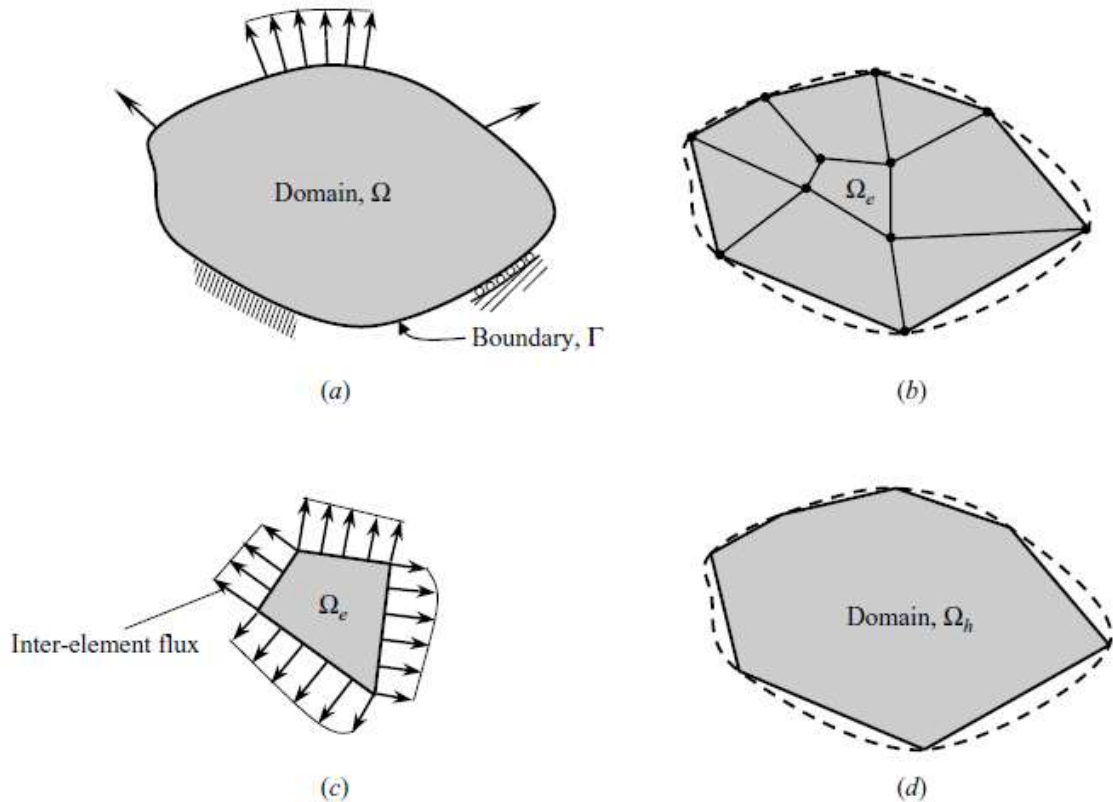
10.2.1 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos es un método numérico como el método de diferencias finitas, pero es más general y poderoso en su aplicación a problemas del mundo real que involucran complicadas condiciones físicas, de geometría y/o límites. En el método de elementos finitos, un dominio dado se ve como una colección de subdominios, y sobre cada subdominio, la ecuación gobernante se aproxima mediante cualquiera de los métodos variaciones tradicionales. La razón principal para buscar una solución aproximada en una colección de subdominios es el hecho de que es más fácil representar una función complicada como una colección de polinomios simples [...] Por supuesto cada segmento individual de la solución debe encajar con sus vecinos en el sentido en que la función y posiblemente las derivadas hasta en un orden elegido son continuas en los puntos de conexión.¹⁸

El método está dotado de tres características distintas que explican su superioridad sobre otros métodos de competencia. Primero, un dominio geoméricamente complejo del problema como es de la Figura 5 (a) en el que se representa como una colección de subdominios geoméricamente simples, llamados elementos finitos Figura 5 (b). Cada elemento finito se ve como un dominio independiente por sí mismo, Figura 5 (c). De aquí la palabra dominio se refiere a la región geométrica sobre la cual se resuelven las ecuaciones. En segundo lugar, sobre cada elemento finito, las ecuaciones algebraicas entre las cantidades de interés se desarrollan utilizando las ecuaciones que rigen el problema. En tercer lugar, las relaciones de todos los elementos se ensamblan (es decir, los elementos se vuelven a colocar en sus posiciones originales el dominio total) como se indica en la Figura (d), utilizando ciertas relaciones entre elementos.

¹⁸ REDDY JN. Introduction to the Finite Element Method, Third Edition. New York: McGraw-Hill Education; 2006.

Figura 5. Representación de un dominio bidimensional por una colección de triángulos y cuadriláteros



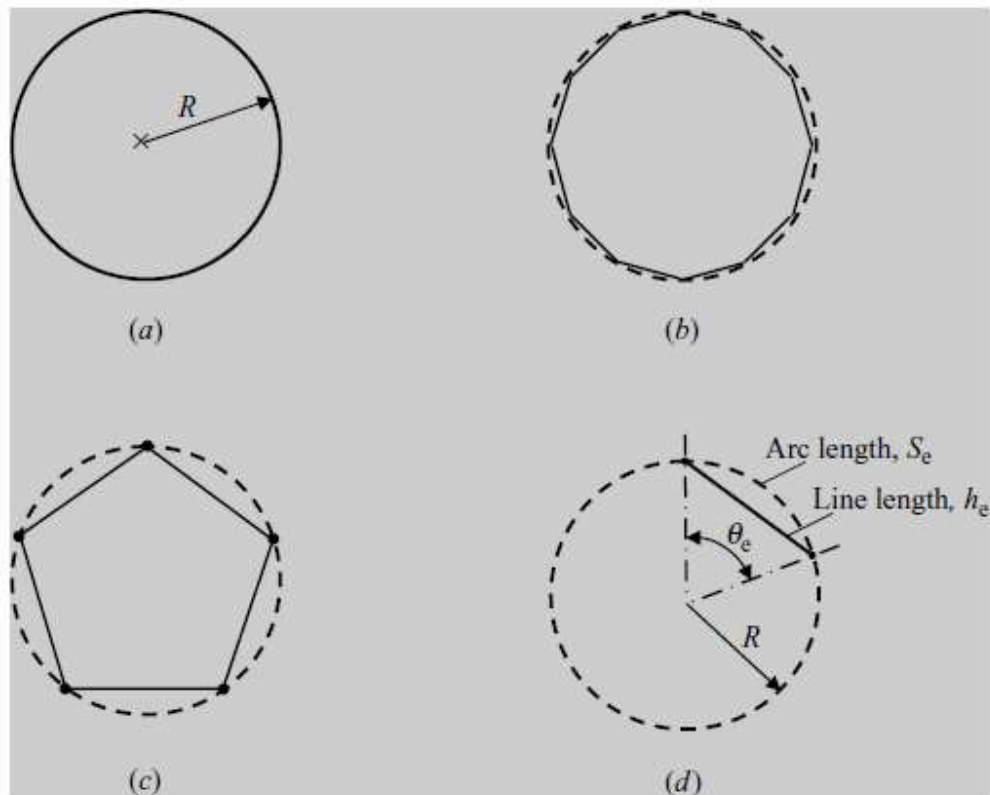
Fuente: Introduction to the Finite Element Method.¹⁹

Considerando la geometría de la superficie a analizar, el problema de un perímetro de un círculo de radio R Según la Figura 6, para este caso no se tiene conocimiento de la fórmula para hallar el perímetro ($P=2 \pi R$). Los matemáticos antiguos estimaban el valor del perímetro de un círculo al aproximarlos en segmentos de línea rectas cuyas longitudes se podían medir. El valor aproximado de la circunferencia se obtiene sumando las longitudes de los segmentos de línea utilizados para representarlo.²⁰

¹⁹ Ibid., p 20

²⁰ Ibid., p 21

Figura 6. Determinación del perímetro de un círculo.



Fuente: Introduction to the Finite Element Method²¹

Las tres características básicas del método de elementos finitos en el presente caso se toman de la siguiente forma: primero, la división del perímetro de un círculo en una colección de segmentos de línea. En teoría un número infinito de dichos elementos de línea para representar el perímetro; de lo contrario, el valor calculado tendrá algún error. Segundo, escribir una ecuación para la cantidad de interés (perímetro) sobre un elemento (segmento de línea) en este caso es exacta. Tercero, el ensamblaje de elementos equivalentes simplemente a agregar las longitudes de los elementos para obtener el valor total.²²

Aunque la geometría del elemento es la idea básica del método de elementos finitos, hay otras características que no están presentes o no son evidentes. Se puede discretizar la geometría del dominio, dependiendo de su forma, en una malla de más de un tipo de elemento (por forma u orden). Por ejemplo, en la aproximación de un dominio irregular, se puede utilizar la combinación de rectángulos y triángulos. Sin

²¹ Ibid., p 21

²² Ibid., p 21

embargo, las interfaces del elemento deben ser compatibles en el sentido de que la solución es continua. Si se utiliza más de un tipo de elemento en la representación del dominio, se debe aislar uno de cada tipo para su desarrollo²³ como el caso de la tubería de blindaje y el recubrimiento de acero, en el caso puntual de la tesis.

Para la aproximación de métodos se utilizan métodos variaciones clásicos. En lugar de representar la solución u combinación lineal en términos de estimación de valores en los puntos nodales. Las funciones de este método de elementos finitos a menudo son polinomios que se derivan usando la teoría de la interpolación. Sin embargo, sin embargo, el método de elementos finitos no se limita al uso de aproximaciones que son combinaciones lineales de valores nodales y funciones de interpolación que son polinomios algebraicos. En este caso, el número y la ubicación de los nodos de un elemento dependen de la geometría del elemento, el grado de aproximación polinómica y la forma integral ponderada de las ecuaciones. En general, el ensamblaje de elementos finitos está sujeto a condiciones de frontera y / o iniciales. Las ecuaciones discretas asociadas con la malla de elementos finitos se resuelven solo después de que se hayan impuesto el límite y / o las condiciones iniciales.²⁴

“Para la presión y la convergencia de la solución de elementos finitos dependen de la ecuación diferencial, su forma integral y el elemento utilizado. "Exactitud" se refiere a la diferencia entre la solución exacta y la solución de elementos finitos, mientras que "convergencia" se refiere a la precisión a medida que aumenta la cantidad de elementos en la malla.”²⁵

El diseño en ingeniería es auxiliado por el análisis, el cual consiste en realizar cálculos del funcionamiento de un prototipo para predecir este funcionamiento si es práctico como el tener que calcular un campo. “Existen muchos tipos de campos, y cada uno influye de manera diferente sobre el funcionamiento de lo que se esté diseñando, por ejemplo, los esfuerzos que actúan sobre algún mecanismo deben ser calculados para estar seguros de que el artefacto no va a fallar. Por otra parte, siempre existirá un potencial asociado con cualquier campo, por ejemplo:”²⁶

²³ *Ibíd.*, p 22

²⁴ *Ibíd.*, p 25

²⁵ *Ibíd.*, p 30

²⁶ MOLINA Julio. *Análisis Estructural Con Elementos Finitos*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León; 1992

Campo	Potencial
Flujo de calor	Temperatura.
Esfuerzos mecánicos	Desplazamientos
Campos eléctricos	Voltaje
Campo magnético	Vector de potencial magnético
Velocidad del fluido	Potencial del fluido

“Para este tipo de parámetros, el método de elementos finitos es un procedimiento numérico para analizar estructuras y problemas donde exista una continuidad. El método produce muchas ecuaciones algebraicas simultáneas, las cuales son generadas y resueltas en software especializado en análisis del método de elementos finitos y luego su razonamiento puede arrojar datos con menor grado de incertidumbre.”²⁷

Luego, en muchos casos los resultados no pueden ser definidos debido a la ausencia modelo adecuado utilizando un método de elementos finitos con parámetros definidos, “tales problemas se denominan discretos. En otra subdivisión prosigue indefinidamente y el problema solo puede resolverse por medio de fricción matemática; ello nos conduce a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con número infinitos implicado. A tales sistemas se les denominará continuos.”²⁸

10.2.1.1 Sistemas discretos y sistemas continuos

Al efectuar una clasificación de estructuras, suelen dividirse en discretas o reticulares y continuas. Las primeras son aquellas que están formadas por un ensamblaje de elementos claramente diferenciados unos de otros y unidos en una serie de puntos concretos, de tal manera que el sistema total tiene forma de malla o retícula. La característica fundamental de las estructuras discretas es que su deformación puede definirse de manera exacta mediante un número finito de parámetros, como por ejemplo las deformaciones en los puntos de unión de unos elementos y otros. De esta manera el equilibrio de toda estructura puede

²⁷ Ibid., p 10

²⁸ ZIENKIEWICZ OC. El Método de Los Elementos Finitos, Vol 1.Pdf. Barcelona: Reverté S.A.; 1992.

representarse mediante las ecuaciones de equilibrio en las direcciones de dichas deformaciones.²⁹

Luego de consolidar una serie de datos de entrada y analizar una estructura, debido a la cantidad de procesos matemáticos que conllevan para resultados óptimos, la tecnología ha dispuesto de herramientas tales como software especializado en la simulación por el método de elementos finitos, rama de estudio por la cual se desarrolla en análisis de este proyecto de grado. “El software se trata de una herramienta integral, que consta de importantes librerías de elementos programados, y con la ayuda de macros mecanizan las tareas rutinarias y facilitan la realización de modelos parametrizables, así como de un amplio abanico de funcionalidades implementadas por el pos proceso.”³⁰

10.2.2 Tuberías de conducción en concreto

En términos generales, “el concreto u hormigón puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión.”³¹

El concreto, al ser un material cuasi-frágil presenta comportamientos a tensión y compresión, bajo esfuerzo a tensión, dado su baja resistencia a la tracción por lo cual es propenso a agrietamiento cuando supera el estado límite. Por lo cual su desarrollo se ha visto estrechamente desarrollado como “concreto armado” debido a que se concibió para fines estructurales.³²

Los blindajes o también conocidos como galerías entre las cuales pueden ser de drenaje, presión, auscultación y tratamiento de macizo. Para este caso se destaca la galería de presión, que es el túnel por el cual se conduce el agua del embalse, desde la torre toma hasta la turbina, en un salto hidráulico. Estos conductos generalmente están revestidos de hormigón y termina en un tramo blindado antes de la turbina. “Para este proceso de tratamiento de una galería de presión se tienen dos fases: la primera es fase de inyección de relleno del contacto roca-hormigón y la segunda, una

²⁹ CELIGÜETA LIZARZA Juan Tomas. Método de Los Elementos Finitos Para El Análisis Estructural. Madrid: UNICOPIA C.B.; 2008.

³⁰ RODRÍGUEZ VELAZCO Lucas. Estudio de la presión exterior crítica de pandeo en blindajes de aceros confinados. 2013. http://oa.upm.es/21370/1/Tesis_master_Lucas_Rodriguez_Velasco.pdf.

³¹ SÁNCHEZ DE GUZMÁN Diego. Tecnología Del Concreto y Del Mortero. Bogotá D.C.: Biblioteca de la construcción; 2001.

³² SÁNCHEZ DE GUZMÁN Diego. Op. Cit.

aureola de consolidación alrededor del túnel. En el contacto roca-hormigón se pueden formar huecos durante el hormigonado, especialmente en la clave en la que el peso el hormigón tiende a separarlo de la roca.”³³ (Keller, 2019)

“El tratamiento del contacto roca-hormigón se realiza a través de taladros cortos perforados en el trasdós y de la inyección de una lechada espesa o incluso de mortero de cemento. La consolidación del macizo alrededor de la galería se logra perforando secciones de taladros radiales e inyectando lechada.”³⁴

“El tramo blindado requiere una inyección adicional del contacto blindaje hormigón. Esta inyección se realiza a muy baja presión a través de agujeros roscados en el propio blindaje, Después se bate con un martillo de goma todo el blindaje para localizar los huecos que hayan podido escapar a la inyección, y una vez localizados, se inyectan previa apertura de nuevos agujeros roscados en el blindaje. La dificultad estriba en rellenar los huecos sin “arrugar” el blindaje por un exceso de presión.”³⁵

10.2.3 Blindaje de acero

Los blindajes están elaborados generalmente en estructuras metálicas, su construcción de acero es una mezcla de acero y carbón con cantidades variables de otros elementos, principalmente magnesio, fosforo, azufre y silicón.³⁶ Como lo menciona el autor: “el carbono es el principal elemento de endurecimiento en metálicas porque cada adición incrementa la dureza y fuerza de tensión. El carbono ha creado tendencias de durabilidad, maleabilidad, tenacidad y soldabilidad; también el magnesio incrementa la dureza y fuerza de elementos en acero pero en menor grado que el carbono. Manganeso combinado con azufre forma sulfato de manganeso, por lo tanto disminuye los efectos nocivos del azufre.”³⁷

El comportamiento estructural de un tubería depende en gran medida del material en el cual este construida, en el caso del acero es admisible que aceptar una ley elastoplástica en la interacción entre la tensión y deformación que experimentará el material cuando se someta a procesos de cargas en este caso hidráulicas y las que rodean. “Por lo general la respuesta del acero es elástica, su deformación no depende del tiempo de aplicación de carga y por ende cuando exista descarga, no habrá

³³ 1. KELLER. Inyecciones de Galerías y Cavernas Subterráneas. [En línea] 2019. Disponible en: <https://www.keller-cimentaciones.com/tratamientos-en-presas/inyecciones-galerias-cavernas-subterranas/>

³⁴ Op. Cit.

³⁵ Op. Cit.

³⁶ AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Steel pipe -- Design and installation. 2017.

³⁷ Ibid., p 03

deformaciones residuales en el material. Luego se encontrará el estado plástico donde el rango de las deformaciones no son proporcionales a las cargas aplicadas.³⁸

La Gráfica No. 5 permite evidenciar el comportamiento de materiales metálicos respecto a sus aleaciones y demás elementos de los cuales este compuesto.

Figura 7. Efectos de elementos de aleación

Aluminum (Al)	Nickel (Ni)
<ul style="list-style-type: none"> Used to deoxidize or "kill" molten steel 	<ul style="list-style-type: none"> Increases strength and toughness
Boron (B)	Nitrogen (N)
<ul style="list-style-type: none"> Small amounts (0.0005 %) increases hardenability in quenched and tempered steels Used only in aluminum killed steels Most effective at low carbon levels 	<ul style="list-style-type: none"> Increases strength and hardness
Carbon (C)	Phosphorus (P)
<ul style="list-style-type: none"> Principal hardening element in steel Increases strength and hardness Decreases ductility, toughness, and weldability Moderate tendency to segregate 	<ul style="list-style-type: none"> Increases strength and hardness Decreases ductility and toughness Considered an impurity, but sometimes added for atmospheric corrosion resistance
Chromium (Cr)	Silicon (Si)
<ul style="list-style-type: none"> Increases strength Increases atmospheric corrosion resistance 	<ul style="list-style-type: none"> Used to deoxidize or "kill" molten steel Decreases durability and toughness
Copper (Cu)	Sulfur (S)
<ul style="list-style-type: none"> Primary contributor to atmospheric corrosion resistance 	<ul style="list-style-type: none"> Considered undesirable except for machinability Decreases ductility, toughness, and weldability Adversely affects surface quality Strong tendency to segregate
Manganese (Mn)	Vanadium (V) and Columbium (Nb)
<ul style="list-style-type: none"> Increases strength Controls harmful effects of sulfur 	<ul style="list-style-type: none"> Small additions increase strength

Fuente: Steel pipe³⁹

Como también influyen las características de los materiales metálicos, en la Tabla No. 1 se muestra una ley típica de estos:

³⁸ RODRÍGUEZ VELAZCO Lucas. *Ibíd.*, p 22

³⁹ AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. *Ibíd.*, 03

Tabla 1. Características mecánicas de acero

Propiedad	Unidad	Valor
Módulo de elasticidad	<i>MPa</i>	210000
Coefficiente de Poisson	-	0,3
Peso específico	$\frac{kN}{m^3}$	78,5
Límite elástico (F_y)	<i>MPa</i>	275,0
Tensión de rotura	<i>MPa</i>	410,0

Fuente: Estudio de la presión exterior crítica de pandeo en blindajes de aceros confinados ⁴⁰

Pero en función de su forma, para este caso, tuberías de acero que servirán como blindajes, estas tienen características de comportamiento que difieren de lo regular. Suele ser más frecuente en las zonas de conducción más próxima hacia la central en la que producen mayores presiones internas y en ocasiones exteriores.⁴¹

10.2.4 Clasificación y diseño de la estructura de conducción.

Los principales criterios de clasificación a seguir son:

- **Poder o cabeza específica:** Una definición convencional son:
 - ❖ Poder PD^2
 - ❖ Cabeza específica PD (Proporcional a la carga de la circunferencia sobre el muro)

Unidades seleccionadas:

P = presión calculada en metros por columna de agua (m.w.c.)

D = diámetro interno en metros.

- **Localización y tipo de la estructura:** Estos blindajes (tuberías en acero) son conductos de presión entre la turbina y la primera apertura de aguas arriba de la turbina, estas pueden provenir de un tanque, río, un canal o una reserva. Por lo tanto, estos blindajes deberán ser hidráulicamente eficientes como prácticos conservando cabeza disponible y estructura segura para prevenir

⁴⁰ RODRÍGUEZ VELAZCO Lucas. *Ibíd.*, p 23

⁴¹ GARCIA VALDEOLIVAS, Jose Luis, *Comportamiento Estructural De Tuberías Forzadas Y Blindajes En Saltos Hidroeléctricos. Propuestas De Diseño Y Cálculo.* Universidad Politécnica de Madrid, 2013. 383 p.

fallas a futuro. Por lo cual el diseño y construcción de estas obras de conducción, como compuertas siguiendo las reglas y prácticas seguras, los cuales deberán ser construidos de acuerdo a ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sección VIII.⁴² Su localización debe ser considerada según topografía mientras el diseño no sea una afectación imprevista, limitación sobre tamaño y peso secciones de blindaje, restricciones geológicas, consideraciones hidrológicas y demás consideraciones que puedan afectar su localización.

- **Consecuencias directas e indirectas del fracaso de la estructura:** estos serán determinados por el tipo de presa, según la localización de entrada y salida, por eso, la localización de la presa y planta de energía, de acuerdo al método de desviación usado en el río durante su construcción. Por lo cual, las consecuencias de fracaso implican pérdidas de vida humana en el caso más drástico, daño importante en la planta de tratamiento, afectaciones a estructuras urbanas como también paro de las operaciones.⁴³ (European committee for boilermaking and kindred steel structures, 1979)

10.2.5 Diseño de blindajes

El diseño y el costo efectivo de sistemas de blindajes requieren la consideración técnica, ambiental, económica y factores de contractibilidad. Por ende, se tienen en cuenta las consideraciones de impacto del diseño detalladas criterios y metodologías de diseño:

- Preferencia del material y tipo de diseño.
- Planta de operación – carga base, voltaje de control, número de ciclos de operación.
- Parámetros y criterios para determinación de costos anuales de investigación, inversión de capital.
- Inspección y filosofía de mantenimiento.

⁴² United States Department of the Interior Bureau of reclamation. *Ibíd.*, 01 p

⁴³ STRUCTURES, EUROPEAN COMMITTEE FOR BOILERMAKING AND KINDRED STEEL, Recommendations for Design, Manufacture and Erection of Steel Penstocks Old Welded Construction for Hydro Electric Installations. United Kingdom: Janvier. 1979

- Aplicaciones internas y guías gubernamentales, criterios y requerimientos de diseño.
- Cuestiones legales y políticas, incluyendo ambientales, permisos y emisión de licencias.

“El túnel hidráulico tiene la particularidad frente al resto de obras subterráneas de estar sometidos de forma casi permanente a presión interior. Además, deben asegurar una suficiente permeabilidad para evitar fugas importantes de agua en el macizo rocoso.”⁴⁴

“En el diseño de blindajes embebidos en macizo rocoso, la presión interna hidráulica parcialmente nace del macizo rocoso que rodea el blindaje, aunque con el objetivo es reducir el espesor de la tubería en acero.⁴⁵ Los principales parámetros a tener en cuenta en el diseño de estos blindajes son:

- Espesor del blindaje, calidad del acero y disposición o no rigidizadores.
- Calidad y resistencia de la roca.
- Fallas y discontinuidades inaceptadas.
- Cobertura superior y lateral de la conducción.
- Permeabilidad del macizo.
- Presión por posibles infiltraciones del nivel freático.
- Holgura inicial entre el blindaje y el relleno.
- Imperfecciones geométricas, especialmente las derivadas de la soldadura.

Todos estos parámetros están sujetos a dimensionamiento, ejemplo, en el caso de revestimientos para soportar una proporción de la carga hidrostática total externa ya que esta tiene drenajes que no pueden reducir las presiones a cero, y siempre cabe la posibilidad de que algunos se obturen o no funcionen correctamente.⁴⁶

⁴⁴ GARCIA VALDEOLIVAS, Jose Luis. *Ibíd.*, p 14.

⁴⁵ AOKI K, MASAYUKI M. *Op Cit.*

⁴⁶ GARCIA VALDEOLIVAS, Jose Luis. *Ibíd.*, p 15.

Criterios de diseño.

Durante la etapa preliminar de la fase de diseño, habrán más consideraciones y parámetros relacionados con la presión de diseño y tensión circunferencial permisible.

El espesor de la carcasa se determinará por la fórmula clásica:

$$t = \frac{Pr}{SE} \quad (\text{Ecuación No. 1})$$

Donde:

t= espesor de la carcasa, en pulgadas (in)

P= presión interna considerada por la fase de estudio, (ps).

r= Radio interno del blindaje cilíndrico, en pulgadas (in)

S= tensión permisiva considerada por la fase de estudio (psi)

E= factor de reducción de unión.

Los anteriores parámetros dependerán de los valores usados por tensión permisiva, dependiendo del tipo de carcasa metálica, características de resistencia del material y los factores que sean más seguros que puedan considerarse según tipo de instalación.⁴⁷

“El diseño más considerado, al menos dos tipos de acero adecuado (bajo, medio o alta resistencia) alta resistencia puede ser requerido por diseño donde la instalación de secciones debería ser difícil (necesitando secciones ligeras) o donde la soldadura en campo presente problemas.”⁴⁸

“Si el blindaje es relativamente delgado el material no plastificará y por lo tanto no se altera la capacidad de tomar carga. En tanto esta aumenta se irá produciendo una mayor deformación y pérdida de rigidez “pico” próximo a cero, momento en el cual se determinará el valor de la presión crítica de pandeo elástico”⁴⁹

En el caso que el acero plastificara antes de producirse el pandeo elástico y se producirán blindajes con redistribuciones plásticas ya no se toma la carga exterior pero es importante porque la presión que actúa debe producir un descenso de la

⁴⁷ AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. STEEL PIPE. DESIGN AND INSTALLATION. 2017

⁴⁸ *Ibid.*, 17 p

⁴⁹ RODRÍGUEZ VELAZCO, Lucas. *Ibid.*, p 24.

rigidez del sistema con la consecuente deformación para producir las necesarias redistribuciones que impliquen a mas material y equilibrar de esta forma la carga que actúa.⁵⁰

10.2.6 Interacción acero concreto

En ingeniería se ha analizado la interacción desde el conocimiento de acero y concreto en función de refuerzo y su posible relación en acción de fuerzas, deformaciones, y como estos en su aleación pueden satisfacer las necesidades de soporte en estructuras donde se requiere de ambos materiales para que estos compartan sus módulos elásticos. Esto con el fin de evitar mantenimiento contante en las estructuras, en el caso de las tuberías el mayor problema de mantenimiento de tuberías es la corrosión. Se han escrito libros sobre su teoría, pero el punto importante es que la corrosión interna de las tuberías generalmente es causada por el oxígeno atmosférico disuelto en el agua, y se detiene cuando el oxígeno se elimina o se consume por su ataque al metal. El agua que ingresa al sistema desde el exterior siempre está saturada de oxígeno y continuará corroyendo la tubería hasta que el oxígeno se consuma en el proceso. Es por eso que las líneas de agua de servicio (siempre suministradas con agua nueva y oxígeno nuevo) se oxidan más rápido que las líneas de calentamiento de agua caliente, que recirculan constantemente la misma agua.⁵¹

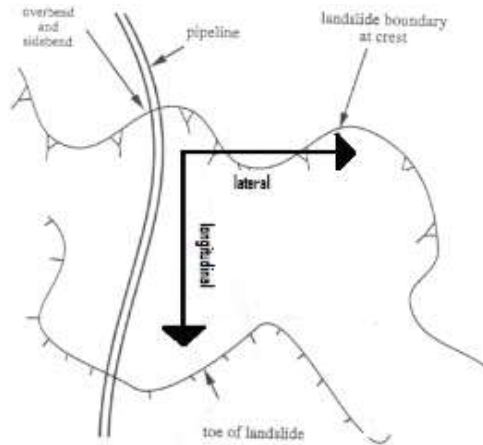
Para el desarrollo de blindaje y su interacción se ha analizado un problema de contacto, parte de la geometría de dos cuerpos, con su en mallado y puntos de control (nodos) todos estos con sus condiciones de borde pertinentes, de acuerdo al proceso de modelamiento por medio de elementos finitos. También se analizan en el medio y tolerancia de estos para luego de aplicar las cargas determinar el proceso iterativo de hallar la deformación que se equilibre con las fuerzas externas. Hablamos de esfuerzos en confinamiento, que nos permite hacer un acercamiento simplificado entre la interacción de la tubería, una condición a tener en cuenta en el análisis de la interacción entre el concreto y la tubería, debido a que suelo ofrece una resistencia frente a un esfuerzo. Esta resistencia alcanza el límite máximo de esfuerzo en el rango elástico, punto en el cual el suelo falla desplazándose por la curva de

⁵⁰ RODRÍGUEZ VELAZCO, Lucas. *Ibid.*, p 24 -25

⁵¹ MOBLEY, R Keith, and DARRIN J Wikoff. *Maintenance Engineering Handbook 7th Edition*. New York: McGraw-Hill Education. 2008

perfectamente plásticos. Estos tipos de desplazamientos del suelo se enmarcan en dos tipos de movimientos lateral y longitudinal. [...] ⁵²

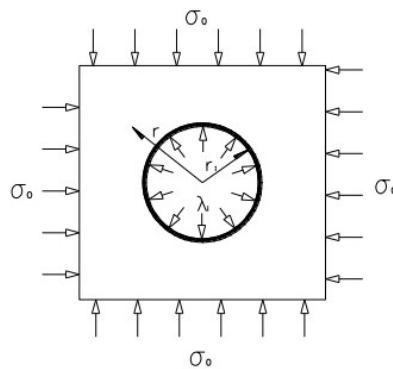
Figura 8. Configuración de los movimientos del suelo, Lateral y longitudinal



Fuente: Oleoductos enterrados en suelo ⁵³

“El estudio de estos movimientos requiere un análisis dimensional de variables, que permitan correlacionar fuerzas, momentos, desplazamientos y propiedades.” ⁵⁴

Figura 9. Estado de esfuerzos iniciales



Fuente: Oleoductos enterrados en suelo

“En el caso de la roca, la curva de convergencia describe la relación entre la tensión de la roca en el contorno del túnel (λ_i) y el desplazamiento radial de dicho contorno (u_i). La curva de convergencia para una geometría circular solo depende de las

⁵² VARGAS BENDECK, Andrés Alejandro. Oleoductos enterrados en suelo. Trabajo de grado para Profesional en Ingeniería Mecánica Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. 2006.

⁵³ *Ibíd.*, 24 p

⁵⁴ *Ibíd.*, 24 p

propiedades de la roca. Si el estado de tensiones iniciales del medio es homogéneo e isotrópico, el estado del medio se puede caracterizar haciendo disminuir la tensión (λ_i) en su contorno, de su valor inicial σ_0 hasta cero.”⁵⁵ Para el caso de tuberías expuestas en superficies de terreno expuestas.

10.2.7 Software de análisis y modelamiento por método de elementos finitos

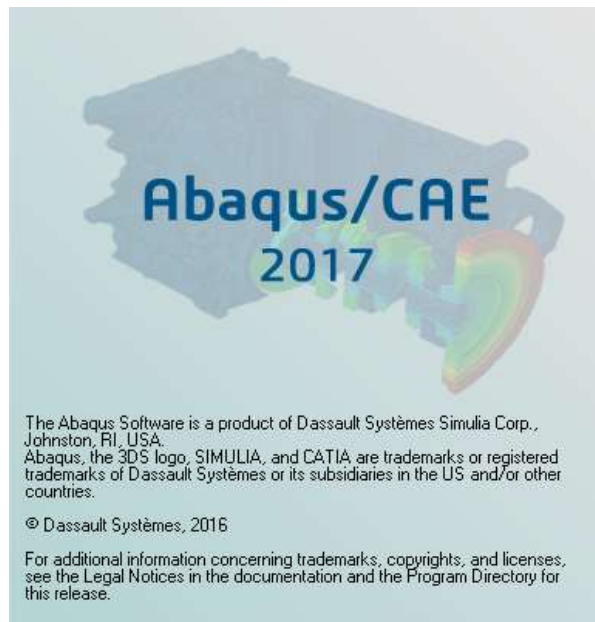
Abaqus

Abaqus es un programa destinado a resolver problemas de ciencias e ingeniería, está basado en el método de los elementos finitos. El programa puede resolver todo tipo de requerimientos, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales. Este software posee una extensa librería de elementos finitos que permiten modelar virtualmente cualquier geometría, así como su extensa lista de modelos que simulan el comportamiento de una gran mayoría de materiales, permitiendo su aplicabilidad en distintas áreas de ingeniería.⁵⁶

⁵⁵ PINILLA ESTUPIÑAN, Diego Simón. Modelación Numérica de Túneles Profundos. Universidad de los Andes. 2016

⁵⁶ UZCÁTEGUI FLORÉS, Maylett.Y. ABAQUS Programa de Elementos Finitos. 2005. 1–10 p

Figura 10. Software de análisis por elementos finitos Abaqus/CAE 2017



Fuente: Autor.

10.2.7.1 Análisis de contacto.

El programa de análisis Abaqus permite dentro de su interfaz el diseño, modelación y análisis de estructuras en las cuales se desee conocer si interacción o contacto con otras para el existen diferentes tipologías a implementar: Sin embargo, la capacidad del software para realizar la simulación de contacto va integrada al tipo de licencia que se tenga. El Abaqus/Standard se implementa para análisis implícitos mientras que el Abaqus/Explicit para análisis explícitos. En el caso de Abaqus/Standard proporciona los siguientes enfoques:

- Contacto general (Contact general)
 - CEL
 - SPH
 - DEM
- Pares de contacto. (Contact pairs)
 - Superficie a superficie.
 - Nodo a superficie.

- Propiedades de contacto (Contact properties or elements)
 - Deslizamiento finito.
 - Pequeño deslizamiento.

“Los elementos de contacto se implementan para ciertas interacciones que no se pueden modelar ni con el contacto general ni con los pares de contacto; sin embargo, generalmente se recomienda utilizar el contacto general o los pares de contacto si es posible.”⁵⁷

10.2.7.2 Características de contacto general (General contact) en Abaqus/Standard

De una manera resumida, las principales características del algoritmo general contact en Abaqus/Standard son:

- Se especifica como parte de la definición del modelo
- Permite definiciones de contactos muy simples con muy pocas restricciones sobre los tipos de superficies involucradas.
- Utiliza algoritmos de seguimiento para garantizar que las condiciones de contacto se cumplan de forma eficaz.
- Puede utilizarse simultáneamente con el algoritmo de pareja de contacto (es decir, algunas interacciones pueden modelarse con el algoritmo de contacto general, mientras que otras se modelan con el algoritmo de pareja de contacto “contact pair”)
- Puede utilizarse con superficies bidimensionales o tridimensionales
- Utiliza la formulación de contacto de deslizamiento finito (finite-sliding) y superficie a superficie (surface-to-surface) como formulación de contacto principal, complementado por las formulaciones de contacto de borde a superficie (edge-to-surface), de borde a borde (edge-to-edge) y de vértice a superficie (vertex-to-edge).⁵⁸

⁵⁷INTRINSYC, Introduction to Contact Analysis. : [En línea] US. YouTube. 2016. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=6l0aKFo0i4Y>

⁵⁸INTRINSYC. Ibíd., p 01.

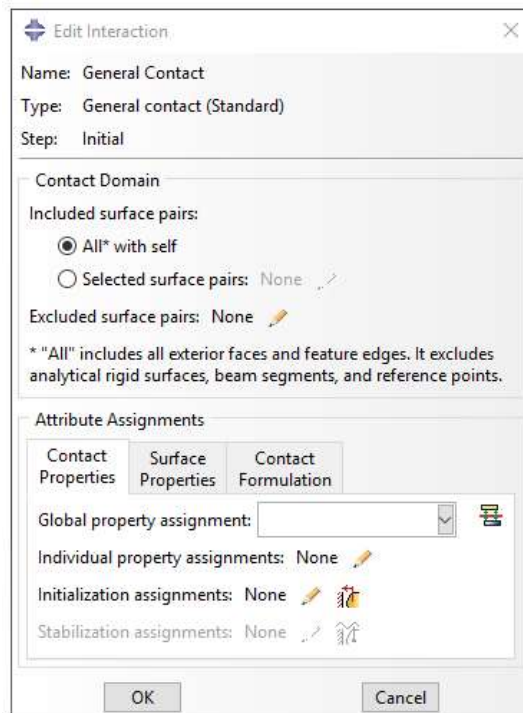
La formulación de contacto superficie a superficie (surface-to-surface) es la formulación principal para el general contact. Ésta formulación trata principalmente casos con contacto sobre las caras de la superficie.

El general contact utiliza las otras formulaciones de contacto como formulaciones suplementarias. Por ejemplo, el segundo, tercer y cuarto caso sería tratado con las formulaciones de borde a superficie (edge-to-surface), de borde a borde (edge-to-edge) y de vértice a superficie (vertex-to-edge), respectivamente. Las formulaciones suplementarias también se utilizan por el general contact para tratar el contacto entre elementos de vigas y cerchas.

“Las formulaciones de superficie a superficie, de borde a superficie y de vértice a superficie pueden tratar interacciones de contacto en las que una superficie (que no representa un borde o un vértice) es una superficie rígida. El contacto general no considera el contacto entre dos superficies rígidas analíticas.”⁵⁹

⁵⁹ 4REALISM. General Contact Vs Contact Pairs En Abaqus Standard. [En línea] 2019 Disponible en: <https://www.4realsim.com/es/general-contact-contact-pair-abaqus/>

Figura 11. Edit interaction for general contact, option of Abaqus CAE



Fuente: Autor.

10.2.7.3 (CEL – Coupled Eulerian Lagrangian) Eulerian-Lagrangian acoplado:

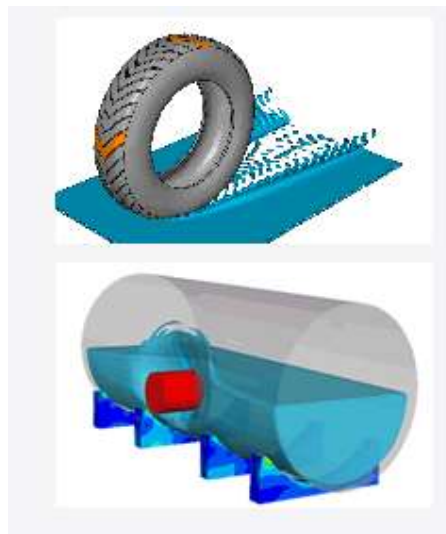
“El enfoque de Eulerian-Lagrangian (CEL) acoplado en Abaqus, que proporciona a los ingenieros y científicos la capacidad de simular una clase de problemas en los que la interacción entre estructuras y fluidos es importante. Esta capacidad no se basa en el acoplamiento de múltiples productos de software, sino que resuelve la interacción de estructura de fluido (FSI) simultáneamente dentro de Abaqus”⁶⁰

- Aplicaciones:
 - Bolsas de aire infladas de flujo de gasolina para automóviles.
 - Neumático hidro-planeado

⁶⁰ DASSAULT SYSTEMES. Abaqus unified FEA. [En línea] 2009. Disponible en: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/multiphysics/coupled-eulerian-lagrangian/>

- Carga de olas en estructuras costa afuera
- Dispensador de productos cosméticos.
- Chapoteo del tanque de combustible
- Impacto y penetración de alta velocidad.
- Interacción suelo-estructura, como la excavación y el desbaste.⁶¹

Figura 12. Ejemplos de aplicación de análisis por contacto general con CEL



Fuente: Abaqus unified FEA⁶²

10.2.7.4 (SPH - Smoothed particle hydrodynamics) Hidrodinámica de partículas alisadas

La partícula hidrodinámica suavizada como método libre de mallas y partículas, se inventó originalmente para modelar fenómenos astrofísicos, y luego se extendió ampliamente para la aplicación de problemas de mecánica continua y fluida. El método SPH y sus diferentes variantes son el tipo principal de métodos de partículas y se han incorporado en muchos códigos comerciales.⁶³

En el método SPH, El estado de un sistema está representado por un conjunto de partículas, con propiedades individuales y movimiento de acuerdo con las

⁶¹ Ibid., p 01

⁶² Ibid., p 01

⁶³ DASSAULT SYSTEMES. Ibid., 'p 01

ecuaciones de conservación que rigen. Meshfree, Lagrangiano, método de partículas, tiene sus características particulares. Tiene algunas ventajas especiales sobre los métodos numéricos tradicionales basados en cuadrícula, el más significativo de los cuales es la naturaleza adaptativa del método SPH. Esta adaptabilidad de SPH se archiva en la etapa muy temprana de la aproximación de la variable de campo que se realiza en cada paso de tiempo en base a un conjunto local actual de partículas distribuidas arbitrariamente. Debido a esta naturaleza adaptativa de la aproximación de SPH, la formulación de SPH no se ve afectada por la arbitrariedad de la distribución de partículas. Esta es, por lo tanto, la característica más atractiva del método SPH. [...] ⁶⁴

10.2.7.5 (DEM – Discrete element method) Método de elementos discretos.

El método de elementos discretos DEM es un método intuitivo en el que las partículas discretas chocan entre sí y con otras superficies durante una simulación dinámica explícita. Por lo general, cada partícula de DEM representa un grano, una tableta, una inyección, etc. El DEM no es aplicable a situaciones en las cuales las partículas individuales sufren una deformación compleja. Por lo tanto, la DEM es diferente, y conceptualmente más simple que el método hidrodinámico de partículas alisadas (SPH) en el que grupos de partículas modelan colectivamente un cuerpo continuo. ⁶⁵

10.2.7.6 Características de pares de contacto (Contact pairs) en Abaqus/Standard

Para utilizar pares de contacto, se deben indicar que pares de superficies pueden interactuar entre sí o que superficies dentro de una misma parte pueden interactuar consigo mismas. Las superficies de contacto deben extenderse lo suficiente para incluir todas las regiones que pueden entrar en contacto durante un análisis; sin embargo, al incluir nodos de superficie adicionales y caras que nunca experimentan contacto puede resultar en un coste computacional adicional significativo. Las principales características de este algoritmo de modelo son:

- Es usado para definir interacciones entre cuerpos en simulaciones del tipo mecánico, acoplado de desplazamiento de temperatura, acopladas térmico-

⁶⁴ LIU GR, LIU MB. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Mesh free Particle Method. Singapore: World Scientific; 2003.

⁶⁵ NTRINSYC. *Ibíd.*, p 01.

eléctricas-estructurales, acopladas de desplazamiento de presión de poros, acopladas térmico-eléctricas y de transferencia de calor.

- Son parte de la definición del modelo.
- Puede formarse utilizando un par de superficies rígidas o deformables o una sola superficie deformable.
- No es necesario utilizar superficies con mallados iguales.
- No puede formarse con una superficie bidimensional y una tridimensional.
- No se puede formar con superficies agrietadas para elementos enriquecidos.

En Abaqus/Standard se puede definir el contacto en términos de dos superficies que pueden interactuar entre sí como un “par de contacto” o en términos de una sola superficie que puede interactuar con sí misma en “auto contacto”. Abaqus/Standard refuerza las condiciones de contacto formando ecuaciones que involucran grupos de nodos cercanos de las superficies respectivas o, en el caso del auto contacto, de regiones separadas de la misma superficie.⁶⁶

10.2.7.7 Detección de contacto (Contact detection)

El uso de la herramienta de detección de contactos es un proceso de dos pasos. Primero, Abaqus / CAE busca las superficies en el modelo que puedan interactuar, luego tiene la oportunidad de revisar las superficies identificadas y modificar los parámetros de pares de contactos predeterminados antes de crear interacciones y restricciones. Usted proporciona algunos criterios básicos para guiar la búsqueda. Estos criterios incluyen el dominio de búsqueda y la distancia entre las superficies que probablemente estarán en contacto.⁶⁷

10.2.7.8 Nodo a superficie (Node to Surface)

“Los nodos en la superficie esclava entran en contacto con los segmentos en la superficie maestra Los nodos esclavos no pueden penetrar la superficie maestra Pautas: la superficie del esclavo debe tener una malla más fina, el cuerpo maestro debe ser más rígido.”⁶⁸

⁶⁶ 4REALISM. *Ibid.*, p 01.

⁶⁷ INTRISYC. *Ibid.*, p 01.

⁶⁸ *Ibid.*, p 01.

11 ESTADO DEL ARTE

La investigación de los blindajes de acero para sistemas de conducción hidráulica en grandes proyectos de infraestructura ha sido abordada desde los últimos años, donde se prevén túneles de gran diámetro y alta presión que a menudo son esquemas subterráneos. Por ello, “los estudios relativos a revestimientos de túneles en presión y los referentes de blindajes de acero han cobrado una mayor relevancia. Se ha analizado la descripción y comparación de las formulaciones existentes para el cálculo de blindajes tanto a presión exterior como interior.”⁶⁹

Por ello, el comportamiento no lineal del concreto se presenta debido al proceso de figuración del material bajo esfuerzos de tensión, procesos que algunos autores han estudiado el efecto de la degradación del concreto por esfuerzos tensionantes. Una alternativa por la cual analizar este tipo de comportamientos es la modelación numérica por medio de un software y analizar su efecto cohesivo del concreto con el blindaje en acero, todo esto mediante el uso de elementos finitos, de esta forma conocer con la práctica y simulación como es la respuesta de estos elementos en caso de presentar fallas. [...] ⁷⁰

Las investigaciones acerca del comportamiento del concreto en situaciones y modelos donde no solo se evidencia análisis a tracción o compresión, lleva a autores ⁷¹ a evaluar los posibles modelos y simulaciones numéricas de estos comportamientos general el concreto cuando actúan a esfuerzos posteriores al régimen elástico, sin embargo, “debido a la magnitud de las cargas a las cuales se someten estas tuberías, se ha previsto la implementación de acero como blindaje y su estudio igualmente como se ha presentado tanto para el concreto como el acero mediante investigaciones científicas.”⁷² Estos avances científicos se han analizado desde el concepto de saltos hidráulicos en los cuales se han encontrado principales problemas como la socavación, el pandeo y el esfuerzo a grandes presiones desde una perspectiva económica. También se da en galerías forzadas que requieren blindajes por mala calidad o escasos recubrimiento del terreno, dichas situaciones han llevado a aumentar considerablemente el peso del acero y a casusa del esfuerzo incluso aumento del palastro.⁷³

⁶⁹ GARCIA VALDEOLIVAS, José Luis. *Ibíd.*, p 03.

⁷⁰ GUINEA TORTUERO, Gustavo Víctor. *Medida de La Energía de Fractura Del Hormigón*. 1990, 1–361 p

⁷¹ *Op. Cit.*

⁷² LÓPEZ LANCHEROS, Pedro Augusto. *Simulación numérica de vigas en concreto reforzado con barras longitudinales, transversales y fibras cortas de acero mediante el método de los elementos finitos*. Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de grado Maestría. Facultad de Ingeniería. 2012

⁷³ TORAL SANTANDER, José Ramón. *Ibíd.*, p 519.

En la ingeniería de centrales hidroeléctricas, los componentes hidromecánicos son muy importantes y requieren estudios cuidadosos, en el estudio de comportamiento no lineal geométrico y del material de tuberías enterradas, en las que un cilindro de acero hace las veces de revestimiento del túnel excavado en la roca, entre la roca y la tubería de acero se cuele el hormigón de inyección. Estas estructuras se diseñan para resistir la presión interior, y además se verifican para el estado de presión exterior. Estos estudios se realizaron con el fin de prevenir accidentes en caso de existir filtraciones en la roca (sometida a la columna de agua del embalse). El estudio de comportamiento de estas estructuras bajo presión exterior es no lineal debido a: comportamiento no lineal del material, no lineal geométrico para grandes desplazamientos, no linealidad en las condiciones de borde originadas por el problema de contacto entre el cilindro de acero o blindaje, y el hormigón de inyección.⁷⁴

“Otra forma de comprender el comportamiento de dichos blindajes es por medio de los estudios caso que se han desarrollado en algunas plantas de tratamiento de agua donde la incursión de tecnologías en la conducción de sistemas hídricos es de gran importancia siempre que estos respondan a crecientes ritmos de demanda.”⁷⁵

Con la utilización de formulaciones clásicas utilizadas en el cálculo de blindajes lisos y con rigidizadores sometidos a presión exterior no resultan del todo adecuadas, ni son de aplicación general. Además de las formulaciones tradicionales de diseño se han tenido en cuenta como imperfecciones la holgura del blindaje y la ovalidad del mismo, estos se han analizado imperfecciones de tipo ondulatorio derivadas de los procesos de soldaduras y la existencia de espesores reducidos en zonas de corrosión. Para ello en el análisis se por medio de elementos finitos, analizando el funcionamiento de los rigidizadores y su posible adecuación como conectores; también se analizaron las zonas de soldadura para soportar las tensiones entre chapa y conector.⁷⁶

“Entre otros estudios se abordaron los criterios paramétricos de la tubería, tales como espesor, diámetro, límite elástico del acero, espesor del confinamiento de hormigón, por irregularidades en la superficie del tubo”⁷⁷ dichos estudios muchas veces carentes de análisis en modelos 3D por la ausencia de software adecuado para

⁷⁴ GARCIA GARINO, Carlos, RUBÉN LÓPEZ Triaca. Análisis de Tuberías Blindadas Sometidas a Presión Exterior Bajo Condiciones de Vínculo Unilateral. IMPSA. 1993

⁷⁵ LÓPEZ VILLAYZÁN, Silvia Lorena. Diseño Hidráulico de Tubería Forzada de La Central Hidroeléctrica de Yuracyacu. Lima. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2014

⁷⁶ GARCIA VALDEOLIVAS, José Luis. *Ibíd.*, p 14 – 15.

⁷⁷ RODRÍGUEZ VELAZCO, Lucas. *Op. Cit.*

lo mismo; proporcionando análisis en 2D, que en la mayoría de veces resulta poco exacto dada su nivel de incertidumbre, según sea el caso.

Como el análisis de sistemas de conducción hidráulico se ve expuesto a grandes presiones según sea el diseño puede suministrarse por tramos en solo hormigón y otros tramos con blindajes de tubería en acero, según se requiera, todo esto lo determinan los parámetros geo mecánicos, así como los detalles hidráulicos de operación. Por lo cual, si se evidencia sectores del túnel donde posee baja cobertura y una presión de confinamiento endeble, insuficiente para soportar presiones internas, el macizo rocoso se deformara a través de .las discontinuidades, aumentando el flujo normal de agua y degradando el medio al mantener esta carga constantemente durante su operación, fenómeno llamado hidrogateo;⁷⁸ dados estos parámetros la tubería debe ser en acero y revestida en hormigón, por lo cual, varias líneas de investigación, más allá de analizar si los blindajes cumplen y son óptimos para el diseño planteado, los análisis también deben ir enfocados a determinar si la superficie de suelo a la cual se va a ver expuesta este sistema de conducción es óptimo para usar blindajes que puedan mitigar la socavación y daños de gran magnitud a la superficie de terreno sobre la tubería.

Como consideraciones dentro de los diseños de blindajes hidráulicos en el caso de los túneles de potencia deben operar cada vez más bajo mayores presiones. En algunos casos, especialmente para proyectos de altas presión, se produjeron fallas mientras se cumplían todos los criterios de diseño tradicionales y se necesitaban métodos mejorados. Para esto se disponen revestimientos en estos túneles. Los criterios incluidos son: posición, alineación del túnel, empuje hidráulico y protección de empuje vertical, selecciones de recubrimientos finales, diseño de la selección de revestimiento de acero y aspectos operativos.⁷⁹

En las tuberías a presión también se evalúan condiciones de daño producto del aire que pueda quedar atrapado en el conducto de agua, como lo menciona el autor: “la presencia de bolsas de aire atrapadas en conductos a presión pueden reducir de forma importante el transporte de agua en este tipo de sistemas. En acueductos a bombeo o impulsiones, la presencia de aire se puede reflejar en un incremento de consumo de energía eléctrica y la reducción del caudal.”⁸⁰ Razón por la cual l es

⁷⁸ CERVANTES, José Francisco. Ensayos de Hidrogateo En La Determinación de La Longitud Del Blindaje de Un Túnel a Presión Con Baja Cobertura. Portal de Revistas Académicas. 1994. P 01

⁷⁹ BENSON, R P. Design of Unlined and Lines Pressure Tunnels. Tunneling and Underground Space Technology. 1989.p 1–4

⁸⁰ POZOS-ESTRADA, O., FUENTES, O. A., SÁNCHEZ, A, RODAL, E.A., y DE LUNA, F, Análisis de Los Efectos Del Aire Atrapado En Transitorios Hidráulicos En Acueductos a Bombeo’, Revista

relevante implementar es estudio de un modelo preciso que permita evidenciar el daño en la tubería y como pre diseñarlo de tal manera que sea optimo, para ello empezaron a implementar modelos tridimensionales basados en métodos de elementos finitos.

En las consideraciones de diseño para presas, por ejemplo, para la Presa de Castrovido, en este diseño se optó por la optimización de cálculos hidráulicos y estructurales en los cuales consideraban desagües de fondo, con el cálculo de capacidad y comprobación de las galerías de desagüe, en estas, se realizó el estudio de presión de los blindajes los cuales se desarrollaron por el análisis de MEF, utilizando para ello, el programa de simulación de movimiento de aguas porosas SEEP-2D, para la hipótesis de Embalse lleno. Dentro de estas consideraciones se tiene un nivel de aguas abajo ubicada en la cota solera del cuenco.⁸¹

La interacción acero concreto no solo sea da en blindajes, también se han desarrollado otras combinaciones en las cuales se implementan estos dos materiales con el fin de mejorar condiciones especiales que requieren de la utilización y diseño de acero y concreto por independiente, trabajos de este tipo se han dado en perfiles de acero cuando se complementa con un relleno en concreto. Han realizado estudio de comportamiento de la conexión rígida de una viga tipo I y una columna tubular rellena de concreto, materializada en seis modelos físicos con variación en una relación ancho-espesor (b/t) de las columnas, este se realiza con especificaciones AISC 2005, las provisiones sísmicas de AISC 205 y FEMA 350. Para el desarrollo de modelos teóricos-matemáticos en cuanto a niveles de esfuerzo y deformaciones se logró con la modelación por el MEF con ayuda del software Ansys v10.0.⁸²

Los blindajes en hidroeléctricas son comúnmente utilizados para proteger la integridad de las tuberías debido al daño efectuado por el golpe de ariete debido a ello, la simulación es un requisito esencial para asegurar el correcto diseño y operación de los sistemas de distribución de agua por esto, “se desarrolló la simulación numérica con un código en Scilab que permite representar la propagación de las ondas de presión, el estudio se realizó con una solución de ecuaciones diferenciales parciales de golpe de ariete. Entre esas se destacan el método de

Internacional de Métodos Numéricos Para Calculo y Diseño En Ingeniería, 33 (2017), 79–89
<https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.11.002>

⁸¹ ARRIETA ARRIETA, Mikel. Proyecto Presa de Castrovido. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2012.

⁸² VALLEJO URIBE, Maritza, y VALENCIA CLEMENT, Gabriel F. Calificación de Una Conexión Rígida de Una Viga I y Una Columna Tubular Rellena de Concreto Bajo La Acción de Cargas Dinámicas. 2009. p 24–34

características (MC), los de diferencias finitas (DF), los de elementos finitos (MEF) y los híbridos (MH).”⁸³

⁸³ CALDERÓN RODRÍGUEZ, Wilson, y PALLARES MUÑOZ, Myriam Rocío. Modelo Numérico Del Golpe de Ariete Con Scilab. Ingeniería e Investigación, 27 2007. p 98–105

12 METODOLOGÍA

Describir la interacción entre acero y concreto en estructuras de conducción hidráulica en mega proyectos por medio de elementos finitos. Por medio de los diferentes autores se pretende consolidar los casos de estudio y proyectos en los cuales se haya implementado blindajes de tubería en la conducción hidráulica para mega proyectos, información que será utilizada como punto de referencia para garantizar el comportamiento entre el acero y el concreto, interacción la cual carece de estudio analítico y numérico que pueda mostrar resultados certeros en de comportamiento en condiciones ideales y en caso desfavorable, cuando estas fallan. Para esto es primordial conocer el método por lo cual se va a analizar, los materiales en que están compuestos los elementos estructurales como también las características físicas y químicas, análisis de cargas hidrostáticas que se efectúa, y demás parámetros que limiten el diseño para resultados óptimos y eficientes

Para la consecución de los objetivos definidos, se propone desarrollar la siguiente metodología:

- **Investigar el actual desarrollo de blindajes de conducción hidráulicas según la información de otros autores.** Es importante recopilar la información actual de los conocimientos por medio del estado del arte, marco teórico y los antecedentes.
- **Simular mediante elementos finitos comportamiento de blindajes en acero y su interacción con el concreto.** Por medio de los conocimientos teóricos se plantea definir una serie de modelos, esta fase comprende la investigación de parámetros funcionales, propiedades físicas y químicas de los materiales, es decir, definir los parámetros de entrada para el diseño del blindaje y obtener resultados de que permitan analizar la interacción. Para este planteamiento se pretende iterar diámetro y espesor de tubería, y su posible afectación respecto al cambio de presión interna.
- **Representar el comportamiento mecánico del concreto, acero y su transferencia de energía al concreto en blindajes de estructuras de conducción hidráulica.** Con la información base definida de la fase anterior se pretende evaluar y analizar el comportamiento interno y externo de cargas de la tubería, pero al tener poco estudio entre la interacción de cargas externas que se presentan en dicha estructura, esta fase pretende centrar su foco de análisis en la interacción de acero del blindaje y la capa de concreto que la rodea mediante datos teóricos y prácticos que permitan conocer su funcionamiento, sus posibles fallas a tensión o compresión (según sea el caso) mediante la realización de cálculos transitorios hidráulicos.

• **Modelar una estructura de blindaje mediante los elementos finitos en el programa de análisis Abaqus.** Una vez la información 'as built' este consolidada, se halla realizado la simulación numérica por medio de elementos finitos de la interacción acero concreto en blindajes, se procederá a modelar este tipo de comportamientos en el software Abaqus el cual es especializado en análisis estructural por (MEF). En este se llevará a cabo el cálculo de estructuras con diversidad de configuraciones geométricas, con valores reales existentes y analizar los siguientes ítems:

- Interacción del acero y el concreto, factores desencadenantes de falla y posible figuración del concreto.
- Observación de límites de resistencia ultima y limite plástico de estructura.
- Trasmisión de carga a concreto en condiciones de situación crítica de caudales en conducción por dicho blindaje y la manera óptima de reforzarlo.

Se consideran demostración de modelos matemáticos, esquemas de análisis en 2D (según parámetros a analizar) teniendo presente el énfasis en el comportamiento acero- concreto del blindaje.

13 MODELACIÓN

13.1 UNIDADES

El modelo será elaborado en las siguientes unidades equivalentes:

- Longitud: metros (m)
- Esfuerzos: Pascales (Pa)
- Módulo de elasticidad: $\times 10^{10}$ (Pa) Para acero
- Módulo de elasticidad para concreto: (Pa)

La presión interna implementada en el modelo será dada de acuerdo al espesor y diámetro de tubería

13.2 MATERIALES

13.2.1 Tubería en acero

Serán tuberías de sección circular electro soldadas fabricadas de acuerdo a las especificaciones de la norma AWWA C-200⁸⁴: la cual señala la construcción de tuberías en acero con resistencias de elasticidad que varía entre 207 MPa y 345 MPa; dichas resistencias también van relacionadas a las utilizadas por los fabricantes de tuberías. Atendiendo a lo anterior, la aplicación de resistencia estará limitada de acuerdo al diámetro nominal que se requiere en el estudio, por ello se implementara las siguientes especificaciones:

- Placa de acero: ASTM A106 Gr. B
- Resistencia mínima a Tracción: 415 MPa
- Módulo de elasticidad (E_s): 210 MPa
- Limite elástico: 240 MPa
- Relación de Poisson: 0.33

Para definir el diámetro y espesor de la tubería se deberá tener en cuenta los diámetros comerciales de tuberías en acero, para ello se usara en los modelos de

⁸⁴ AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. AWWA C-200. EE UU: American Water Works Association, 1997

este trabajo los proporcionados por el catálogo de Contain S.A.⁸⁵ fabricante que proporciona tuberías hasta de 48" de diámetro y está dentro de los parámetros establecidos por la norma AWWA C-200⁸⁶

13.2.2 Concreto

De acuerdo a la NSR-10 Titulo C. Capítulo 8.⁸⁷, donde se especifica un módulo de elasticidad de concreto (E_c) respecto la siguiente ecuación:

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c} \text{ [MPa]}$$

Para definir el f'_c se tiene en cuenta los requisitos de concreto según la clase de exposición de las tablas 2 y 3:

⁸⁵ CONTAIN, S.A. Tubo de acero sin soldadura tubo de acero sin soldadura. p 5-43

⁸⁶ AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. AWWA C-200. Op. Cit.

⁸⁷ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op, Cit. Ibid. p 877.

Tabla 2 Categorías y clases de exposición (Tabla C.23-C.4.2.1.)

Categoría	Severidad	Clase	Condición	
F Congelamiento y deshielo	No es aplicable	F0	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo	
	Moderada	F1	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y exposición ocasional a la humedad	
	Severa	F2	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto continuo con la humedad	
	Muy severa	F3	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo que estará en contacto continuo con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	
S Sulfato			Sulfatos solubles en agua (SO_4) en el suelo, % en peso	Sulfato (SO_4) disuelto en agua, ppm
	No aplicable	S0	$SO_4 < 0.10$	$SO_4 < 150$
	Moderada	S1	$0.10 \leq SO_4 < 0.20$	$150 \leq SO_4 < 1500$ agua marina
	Severa	S2	$0.20 \leq SO_4 \leq 2.00$	$1500 \leq SO_4 \leq 10000$
	Muy severa	S3	$SO_4 > 2.00$	$SO_4 > 10000$
P Requiere baja permeabilidad	No aplicable	P0	En contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad	
	Requerida	P1	En contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad	
C Protección del refuerzo para la corrosión	No aplicable	C0	Concreto seco o protegido contra la humedad	
	Moderada	C1	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	
	Severa	C2	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen	
Q Exposición a químicos corrosivos	No aplicable	Q0	Concreto que no está expuesto a químicos corrosivos	
	Severa	Q1	Concreto expuesto a químicos corrosivos diferentes de descongelantes	

Fuente: NSR-10⁸⁸

⁸⁸ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Ibíd.*, p 875.

Tabla 3. Requisitos para el concreto según la clase de exposición

Clase de Exposición	Rel. a/mc máx.±	f _c mín. MPa	Requisitos mínimos adicionales			
			Contenido de aire			Limites en los cementantes
F3	0.42	31	Tabla C.4.4.1			Tabla C.4.4.2
			Tipo de material cementante*			Aditivo cloruro de calcio
			ASTM C 150	ASTM C 595	ASTM C 1157	
S0	0.45	28	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0.42	31	III ¹²	IP(MS), IS(-70) (MS)	MS	Sin restricción
S2	0.40	35	V ²	IP(HS), IS(-70) (HS)	HS	No se permite
S3	0.40	35	V puzolanas o escoria ³	IP(HS) y puzolanas o escoria ⁴ o IS(-70) (HS) y puzolanas o escoria ⁴	HS y puzolanas o escoria ⁴	No se permite
P1	0.45	28	Ninguna			
Q1	0.42	31	Ninguna			

*Se pueden permitir combinaciones alternativas de materiales cementantes diferentes a los mencionados en la Tabla C.23-C.4.3.1 siempre que sean ensayados para comprobar la resistencia a los sulfatos y deben cumplirse los criterios de C.23-C.4.5.1.
¹ Para exposición al agua marina, se permiten otros tipos de cemento Portland con contenidos de hasta 10 por ciento de aluminato tricíclico (C₃A) si la relación a/mc no excede 0.40.
² Se permiten otros tipos de cemento como el tipo III o tipo I en exposiciones clase S1 o S2 si el contenido de C₃A es menor al 8 ó 5 por ciento, respectivamente.
³ La cantidad de la fuente específica de puzolanas o escoria que se debe usar no debe ser inferior a la cantidad que haya sido determinada por experiencia en mejorar la resistencia a sulfatos cuando se usa en concretos que contienen cemento tipo V. De manera alternativa, la cantidad de la fuente específica de puzolanas o escoria que se debe usar no debe ser menor a la cantidad ensayada según la NTC 3330 (ASTM C 1012) y debe cumplir con los requisitos de C.4.5.1.
⁴ El contenido de iones cloruro solubles en agua provenientes de los ingredientes incluyendo el agua, agregados, materiales cementantes y aditivos de la mezcla de concreto, deben ser determinados según los requisitos de la NTC 4049 (ASTM C 1218M), a edades que van de 28 a 42 días.
 Para concreto liviano véase C.4.1.2

Fuente: NSR-10⁸⁹

Teniendo en cuenta la condición más desfavorable para el concreto de tipo S3 según la Tabla 3, se seleccionó un $f'_c = 35$ MPa como lo indica la Tabla 3. Es decir, que el E_c será:

$$E_c = 4700 * \sqrt{35} \text{ [MPa]}$$

$$E_c = 27805.57498 \text{ MPa} = 27\ 806\ 000\ 000 \text{ Pa}$$

$$E_c = 2.8 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

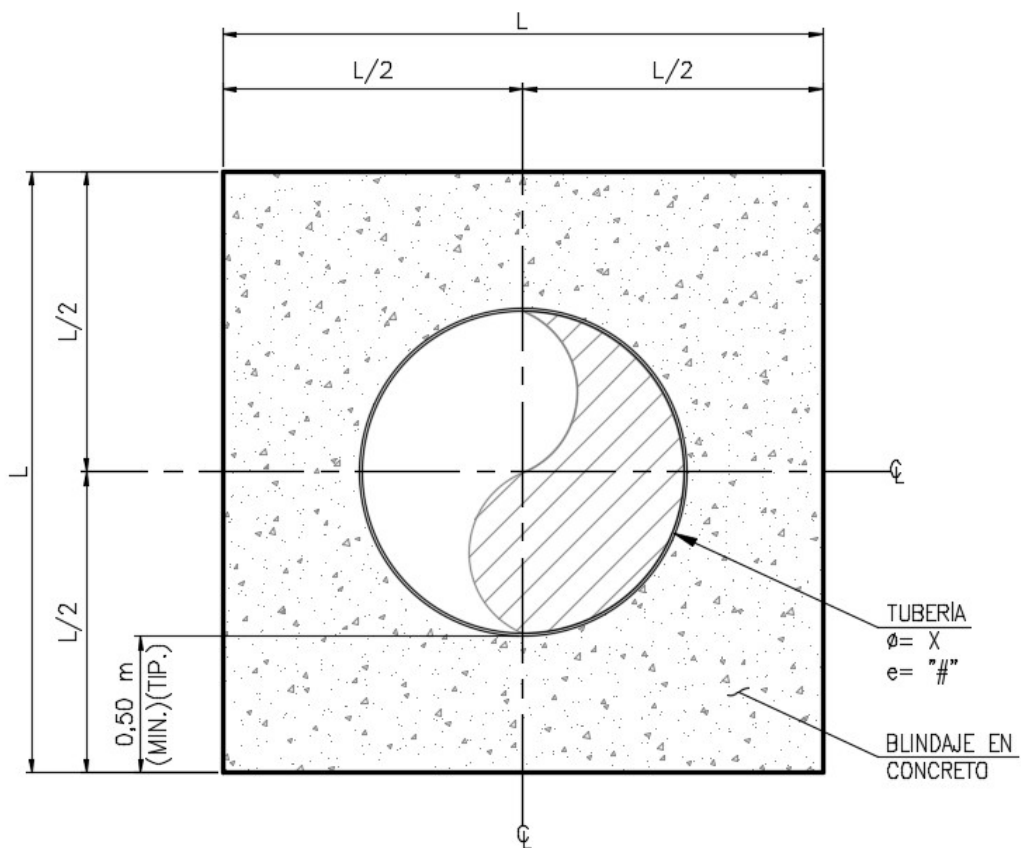
⁸⁹ Ibid., p 876.

Su relación de Poisson será de 0.2 como lo indica la NSR-10 en el Capítulo 8, Título 5, Modulo de elasticidad.⁹⁰

13.3 DISEÑO DEL MODELO.

El diseño del concreto se establece alrededor de la tubería, proporcionándole un blindaje, se tendrá en cuenta un bloque rectangular como el mostrado en la Figura 13.

Figura 13. Sección de blindaje.



Fuente: Autor.

Para los modelos se prevé un recubrimiento de 0.50 m alrededor de la tubería pero haciendo variaciones de diámetro de tubería (ϕ), espesor de tubería en acero (e) y presiones internas para así evaluar y comparar la interacción.

⁹⁰ Op. Cit.

La presión interna estará dada por la siguiente Ecuación de prueba hidrostática de tubería:⁹¹

$$P = \frac{2St}{D}$$

“Donde:

P= Presión de prueba hidrostática mínima (psi, KPa)

S= presión en la pared del tubo durante la prueba hidrostática (psi, KPa) la cual será de 0.75 veces el punto de elasticidad mínimo especificado de acero usado.

t= grosor de la pared (pulgadas, milímetros)

D= diámetro exterior (pulgadas, milímetros)”⁹²

Primero se procede a determinar el S de acuerdo al E_s:

Tabla 4. Calculo de S.

Limite elástico (MPa)	240
Esfuerzo admisible (MPa)	180
S	180000

Fuente: Autor.

Los valores de diámetro se tomaron del catálogo de Contain, S.A.⁹³, utilizando los diámetros más grandes (36”, 42” y 48”). Para este caso de estudio se desprecian los datos de tubería diferentes a las indicadas a pesar que el catalogo proporcione más diámetros. Se seleccionan estos diámetros de acuerdo a los lineamientos y alcance del análisis.

⁹¹ AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. AWWA C-200. *Ibíd.*, p 38.

⁹² *Ibíd.*, p 39.

⁹³ CONTAIN, S.A. Op. Cit.

Tabla 5 Dimensiones para tubería 36" ASTM A-106 Gr. B.

DIAMETRO NOMINAL IN.	DIAMETRO EXTERIOR mm.	ESPESOR mm.	EXTREMOS LISOS Kg/m.	IDENTIFICACION DE ESPESORES	
				STANDARD X-STRONG / XX-STRONG	SCHEDULE NUMERO
36"	914,40	6,4	142,02		
		7,1	159,64		
		7,9	177,23		10
		8,7	194,77		
		9,5	212,30	STD	
		10,3	229,79		
		11,1	247,26		
		11,9	264,68		
		12,7	282,08	XS	20
		14,3	316,78		30
		15,9	351,36		40
		19,05	420,15		

Fuente: Tubo de acero sin soldadura para conducciones según normas ASTM⁹⁴

Tabla 6. Dimensiones para tubería 42" ASTM A-106 Gr. B

DIAMETRO NOMINAL IN.	DIAMETRO EXTERIOR mm.	ESPESOR mm.	EXTREMOS LISOS Kg/m.	IDENTIFICACION DE ESPESORES	
				STANDARD X-STRONG / XX-STRONG	SCHEDULE NUMERO
42"	1.066,8	8,74	227,95		
		9,52	248,31	STD	
		10,31	268,63		
		11,13	289,59		
		11,91	309,86		
		12,70	330,09	XS	
42" (Cont.)	1.066,8	14,27	370,47		
		15,88	411,37		
		17,48	452,14		
		19,05	492,15		
		20,62	532,03		
		22,22	572,43		
		23,83	612,71		
		25,40	652,22		

Fuente: Tubo de acero sin soldadura para conducciones según normas ASTM⁹⁵

⁹⁴ Ibid., p 45.

⁹⁵ Ibid., p 46.

Tabla 7. Dimensiones para tubería 48" ASTM A-106 Gr. B

DIAMETRO NOMINAL IN.	DIAMETRO EXTERIOR mm.	ESPESOR mm.	EXTREMOS LISOS Kg/m.	IDENTIFICACION DE ESPESORES	
				STANDARD X-STRONG / XX-STRONG	SCHEDULE NUMBER
48"	1.219,2	8,74	260,78		
		9,52	284,11	STD	
		10,31	307,39		
		11,13	331,40		
		11,91	354,62		
		12,70	377,81	XS	
		14,27	424,11		
		15,88	471,02		
		17,48	517,81		
		19,05	563,73		
		20,62	609,53		
		22,22	655,95		
		23,83	702,24		
		25,40	747,67		

Estos diámetros luego se relacionan en mm para determinar el valor correspondiente de P (Presión hidrostática), que luego se pasara a Pa (Pascales) Datos que deben ser equivalentes para ingresarlos al software como lo muestra la Tabla 8

Tabla 8. Calculo de Presión según cambio de diámetro y espesor.

MODELO	DIAMETRO ø (pulgadas)	DIAMETRO ø (mm)	ESPESOR (mm)	PRESIÓN (mca)	PRESIÓN (Pa)
Modelo 1	36	914,40	6,40	2,52	2519685,04
Modelo 2	36	914,40	6,40	2,52	2519685,04
Modelo 3	36	914,40	6,40	2,52	2519685,04
Modelo 4	36	914,40	6,40	2,52	2519685,04
Modelo 5	42	1066,80	7,92	3,12	3118110,24
Modelo 6	42	1066,80	7,92	3,12	3118110,24
Modelo 7	42	1066,80	7,92	3,12	3118110,24
Modelo 8	42	1066,80	7,92	3,12	3118110,24
Modelo 9	48	1219,20	8,74	3,44	3440944,88
Modelo 10	48	1219,20	8,74	3,44	3440944,88
Modelo 11	48	1219,20	8,74	3,44	3440944,88
Modelo 12	48	1219,20	8,74	3,44	3440944,88

Fuente: Autor.

Se prevé un blindaje de 0.50 m mínimo alrededor de la tubería el cual se aproximara al entero superior en una medida cerrada, para así obtener la longitud L. como lo muestra la Tabla 9.

Tabla 9. Dimensiones de blindaje acorde a diámetro

MODELO	DIAMETRO \varnothing (pulgadas)	DIAMETRO \varnothing (mm)	ESPESOR (mm)	L (mm)	L FINAL (m)
Modelo 1	36	914,40	6,40	1914,40	1,95
Modelo 2	36	914,40	6,40	1914,40	1,95
Modelo 3	36	914,40	6,40	1914,40	1,95
Modelo 4	36	914,40	6,40	1914,40	1,95
Modelo 5	42	1066,80	7,92	2066,80	2,10
Modelo 6	42	1066,80	7,92	2066,80	2,10
Modelo 7	42	1066,80	7,92	2066,80	2,10
Modelo 8	42	1066,80	7,92	2066,80	2,10
Modelo 9	48	1219,20	8,74	2219,20	2,25
Modelo 10	48	1219,20	8,74	2219,20	2,25
Modelo 11	48	1219,20	8,74	2219,20	2,25
Modelo 12	48	1219,20	8,74	2219,20	2,25

Fuente: Autor.

Para analizar el efecto de la presión en relación con la tubería y el blindaje de concreto se planteó la iteración de los modelos variando la resistencia a compresión del concreto f_c el cual se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Cálculo de Modulo de Elasticidad según f_c .

MODELO	DIAMETRO \varnothing (pulgadas)	f_c (MPa)	E_c (MPa)	E_c (Pa)
Modelo 1	36	21	21538,11	21538105766
Modelo 2	36	28	24870,06	24870062324
Modelo 3	36	35	27805,57	27805574981
Modelo 4	36	40	29725,41	29725410006
Modelo 5	42	21	21538,11	21538105766
Modelo 6	42	28	24870,06	24870062324
Modelo 7	42	35	27805,57	27805574981
Modelo 8	42	40	29725,41	29725410006
Modelo 9	48	21	21538,11	21538105766
Modelo 10	48	28	24870,06	24870062324
Modelo 11	48	35	27805,57	27805574981
Modelo 12	48	40	29725,41	29725410006

Fuente: Autor.

Los cálculos realizados en las anteriores tablas de este capítulo están en el Anexo 1 con los procedimientos matemáticos completos relacionados de cada modelo aquí consignado para los resultados y posterior análisis.

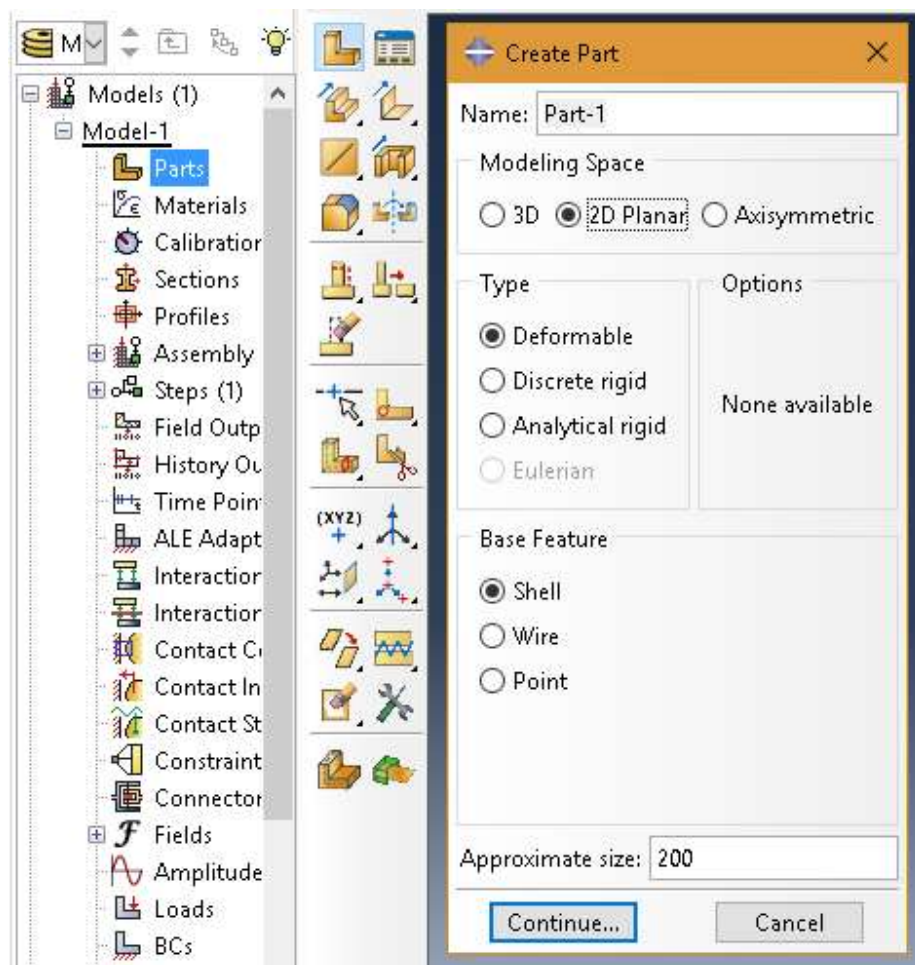
13.4 MODELOS DE INTERACCIÓN.

De acuerdo con las tablas 8,9 y 10 se hicieron los modelos de interacción siguiendo los siguientes lineamientos.

13.4.1 Part

Estos serán modelos 2D, se deberá dejar la siguiente configuración.

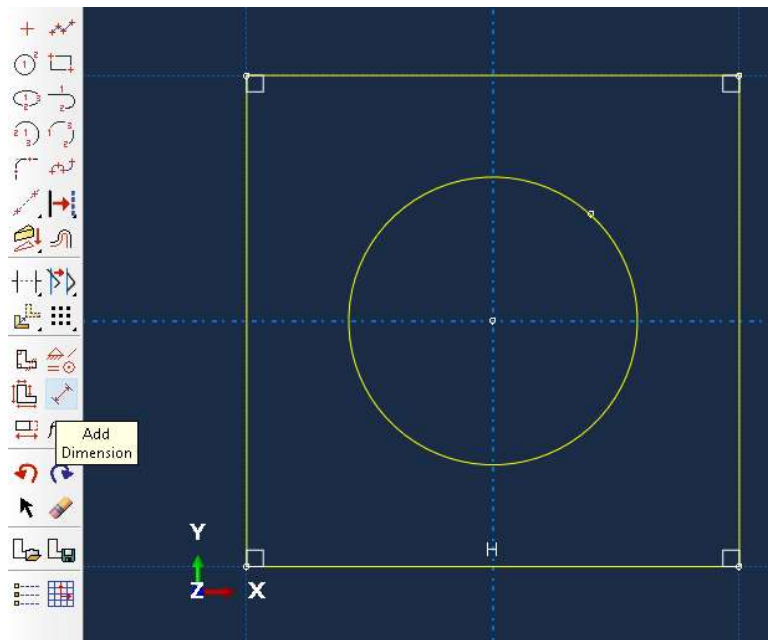
Figura 14. Menú Creación de parte.



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

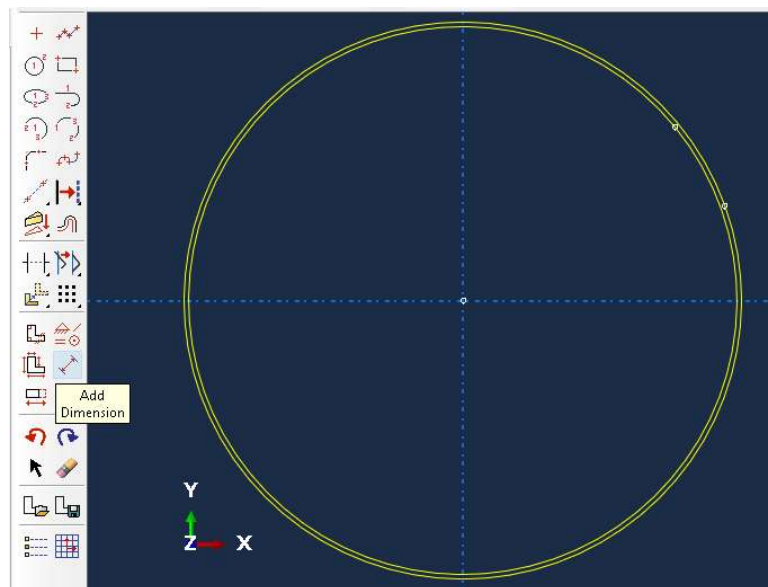
Se crearan dos partes una para el blindaje en concreto y otra para la tubería, éstas se realizan en metros como lo indican las Figuras 15 y 16.

Figura 15 Creación de parte en concreto



Fuente: Abaqus CAE, Autor

Figura 16 Creación de parte de tubería.



Fuente: Abaqus CAE, Autor

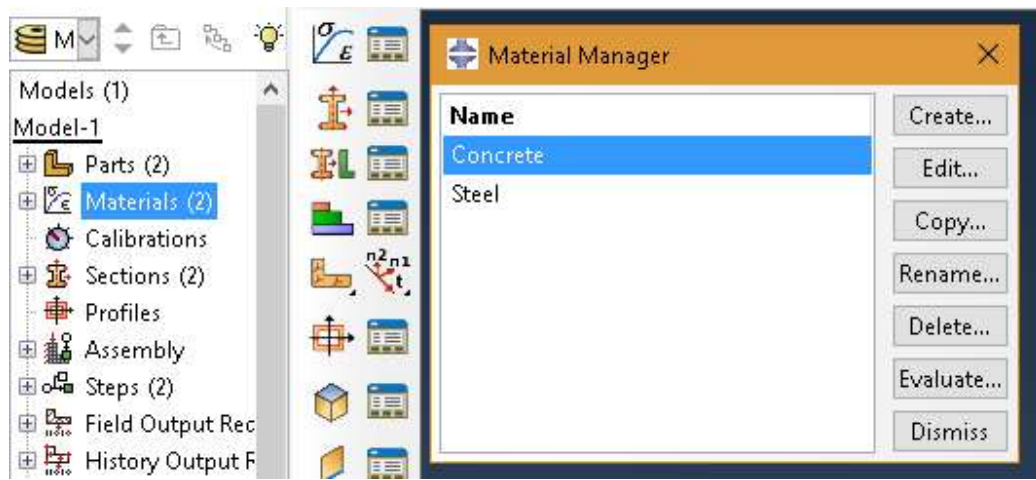
Se editaran las dimensiones de las superficies con la herramienta de Add Dimension, y de acuerdo a las unidades indicadas en el capítulo 13.1 y siguiendo las dimensiones

de ancho, largo, diámetro nominal, diámetro interior y espesor de tubería como lo indica la Tabla 9.

13.4.2 Property

Se crearan los materiales de concreto y acero siguiendo los lineamientos:

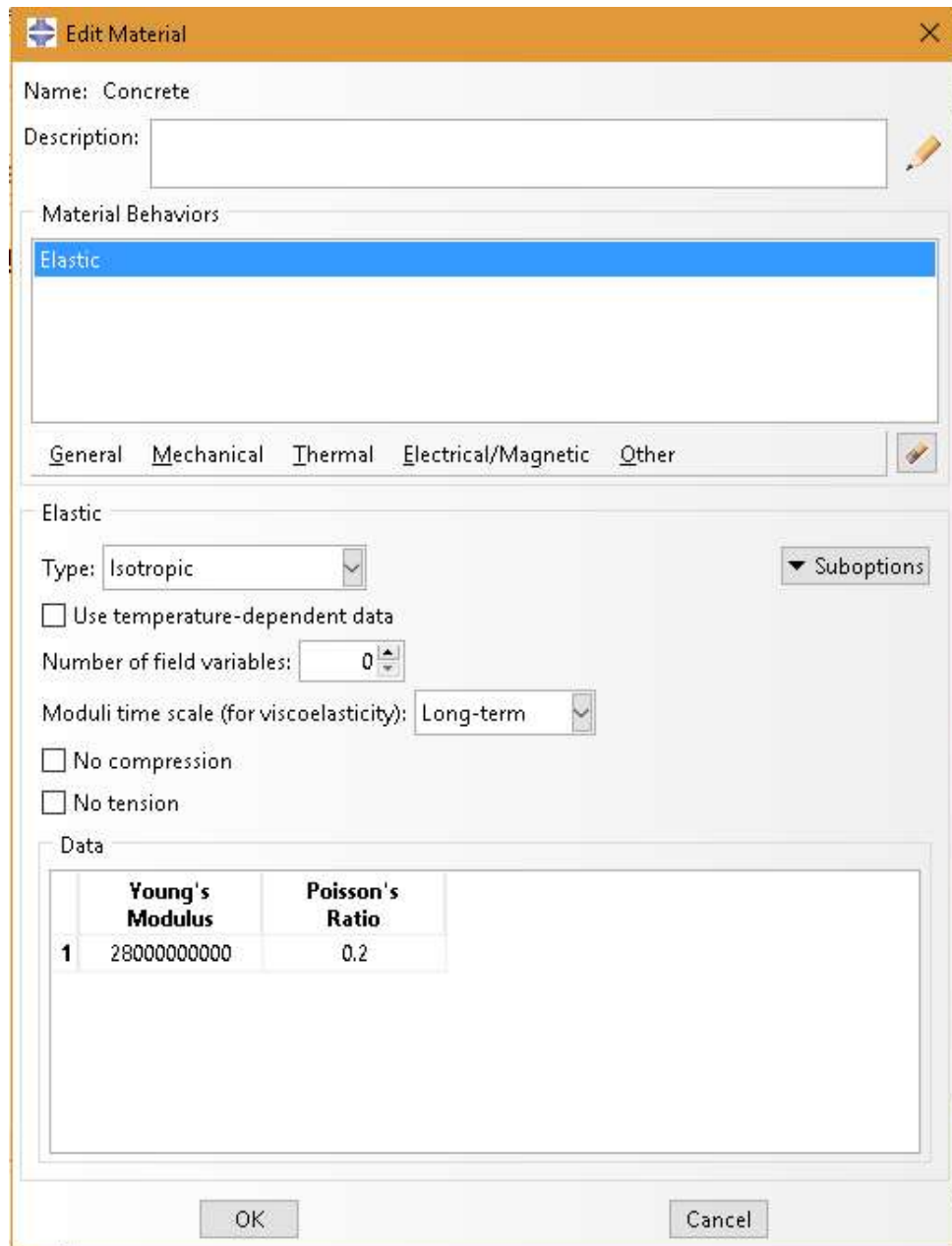
Figura 17. Menú Administrar material



Fuente: Abaqus CAE, Autor

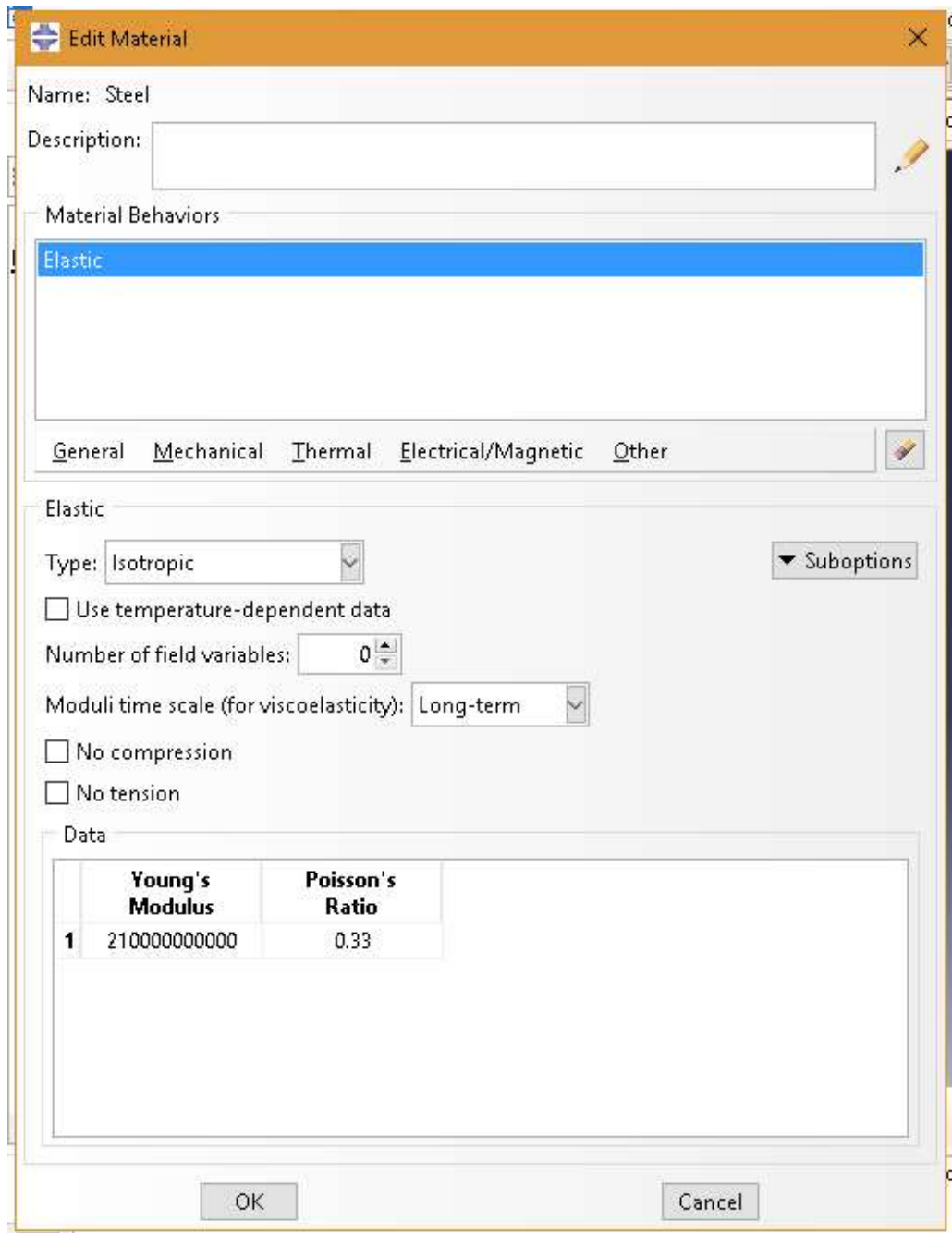
Por medio de la opción Property + Create, ambos de tipo Mechanical + Elastic e Isotropic como muestra las Figuras 18 y 19

Figura 18. Ventana de Edición de material para Concreto.



Fuente: Abaqus CAE, Autor

Figura 19. Ventana Edición de material para acero

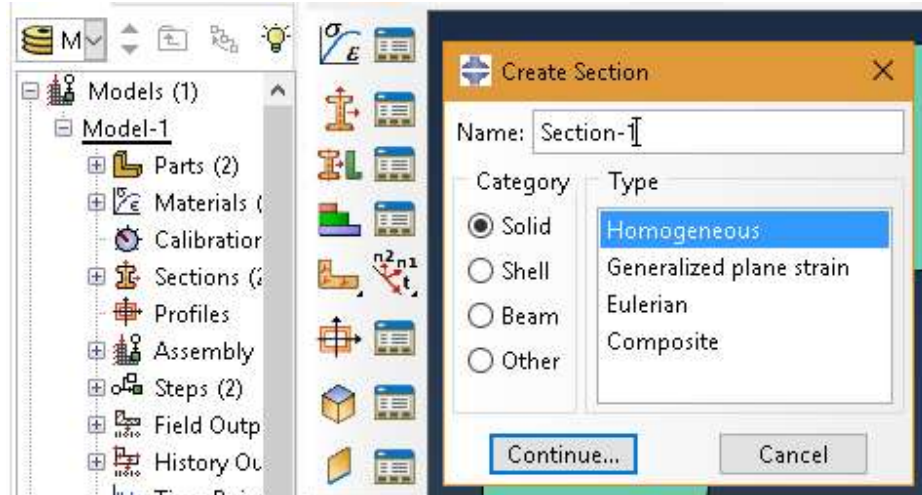


Fuente: Abaqus CAE, Autor

Los módulos de Young (Modulo de elasticidad) y Ratio Poisson (Modulo de Poisson) corresponden a los indicados en el apartado 13.2.1. Y 13.2.2. En la Tabla 8.

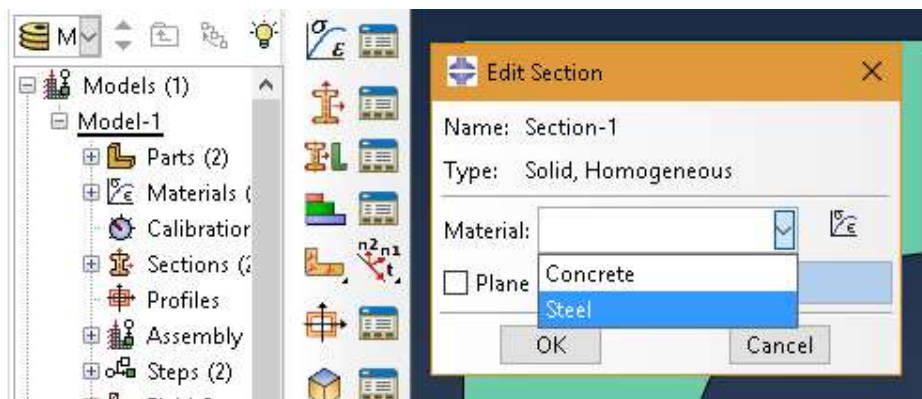
Luego se crearan las secciones y a estas se les asignara el material.

Figura 20. Ventana Crear sección.



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

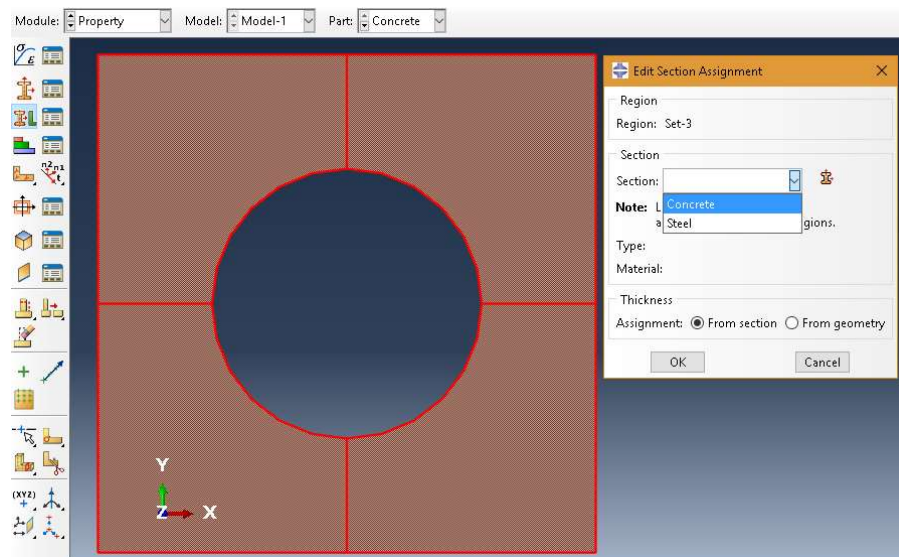
Figura 21. Ventana Editar sección.



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

De acuerdo a la superficie se asignara la sección.

Figura 22. Asignación de sección para parte

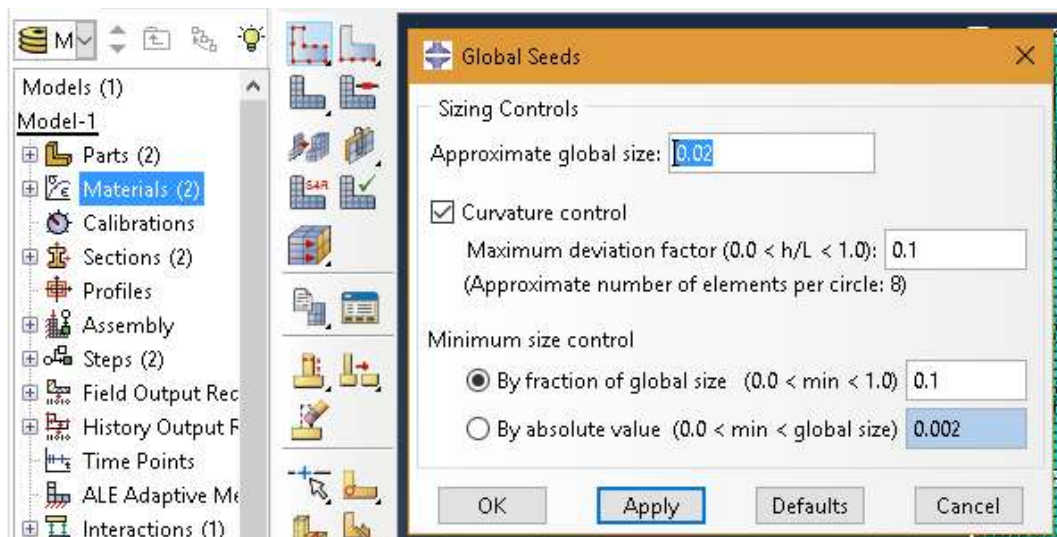


Fuente: Abaqus CAE, Autor.

13.4.3 Mesh

El método de elementos finitos permite analizar una superficie tanto como se desee a partir de nodos, estos asociados a una malla, se pasara a la opción de Mesh y tendrá la siguiente configuración.

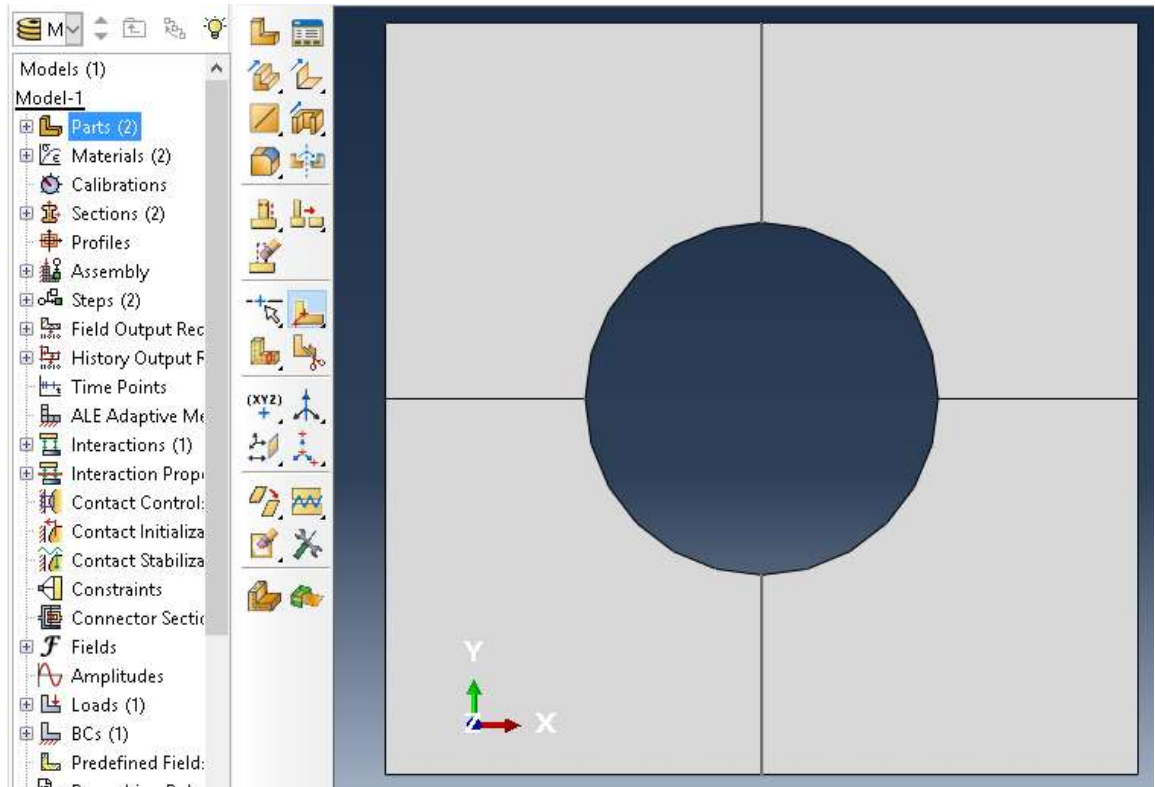
Figura 23. Ventana de edición global de nodos



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

La malla deberá ser ordenada, por lo cual para estos modelos se dividió en 4 secciones. Este enmallado aplica para el blindaje de concreto como para la tubería de acero; entre más fina sea la malla con más detalles se podrá analizar el efecto de las cargas, deformaciones y contacto.

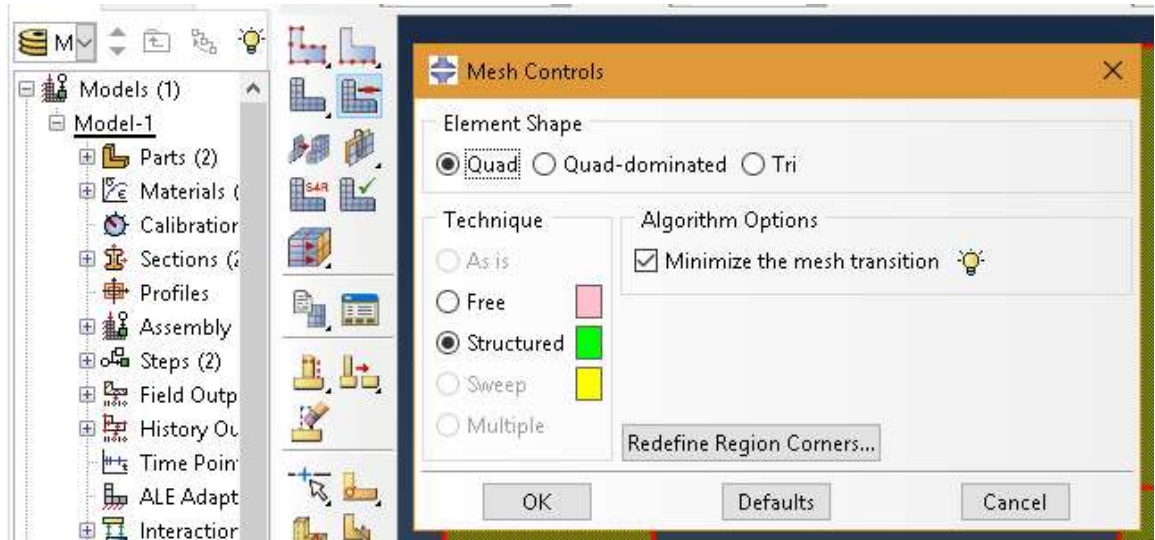
Figura 24. Ejemplo de partición de sección



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

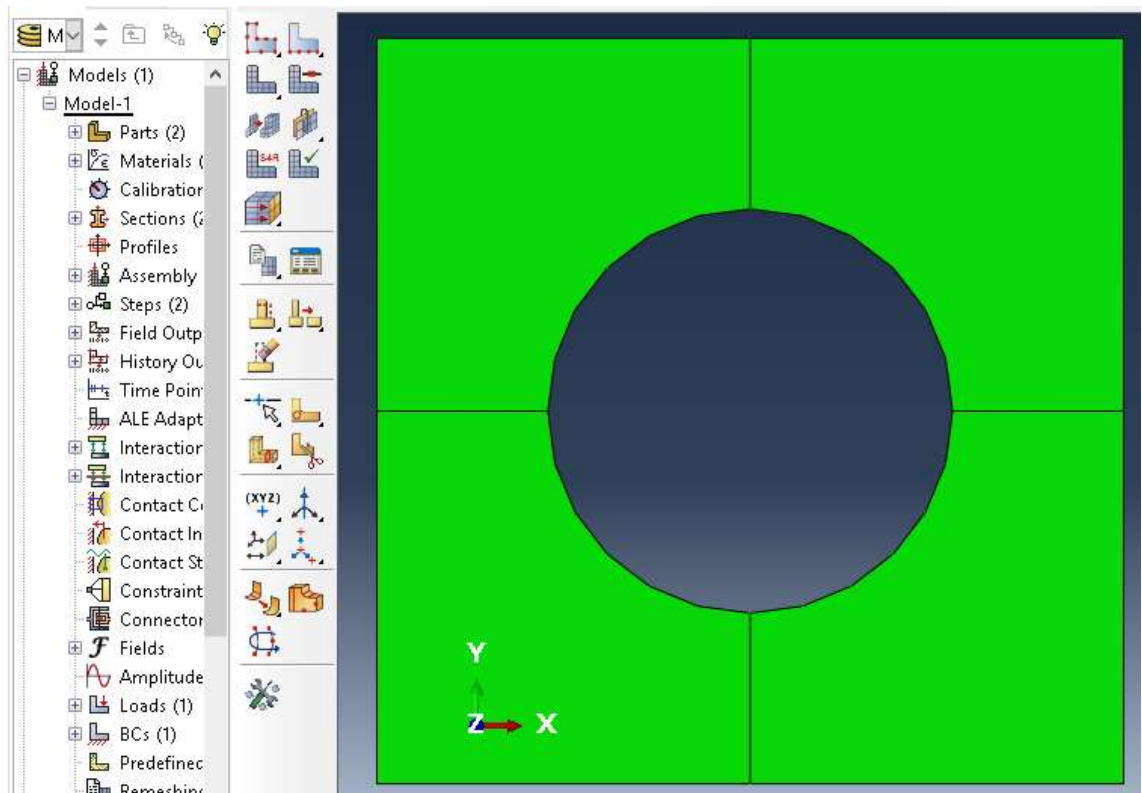
Se asocia la malla a la sección y se asigna control de malla para que sea tipo Structural.

Figura 25. Menú Control de malla



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

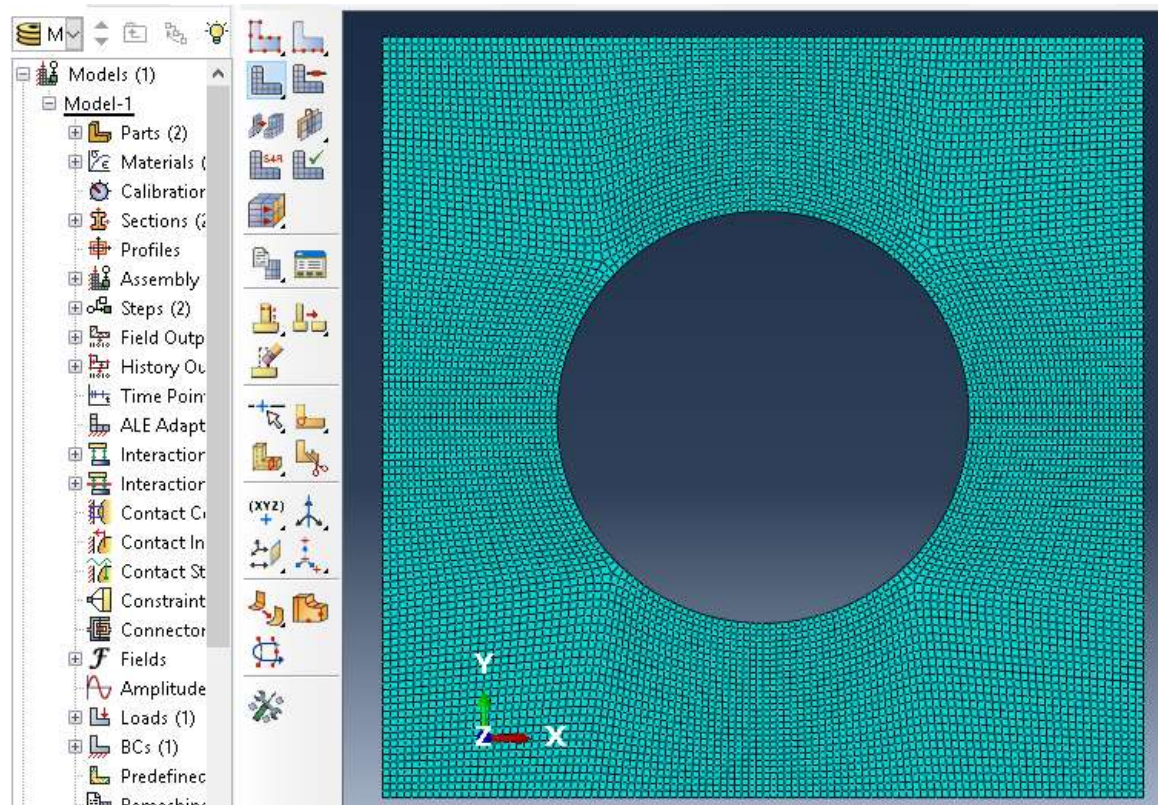
Figura 26. Asignación de malla tipo estructural a sección



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Verifica que esta no presente problemas de dimensiones de malla. Esta anterior es común en superficies de enmallado que adquiera nodos en forma diferente a triángulos o cuadrados ya que su acción de cargas en figuras geométricas diferentes producen iteraciones que entran en conflicto con las que si poseen formas regulares. Si la malla no presenta ningún sombreado en color amarillo o morado, el enmallado está correctamente creado.

Figura 27. Ejemplo de sección con asignación de malla

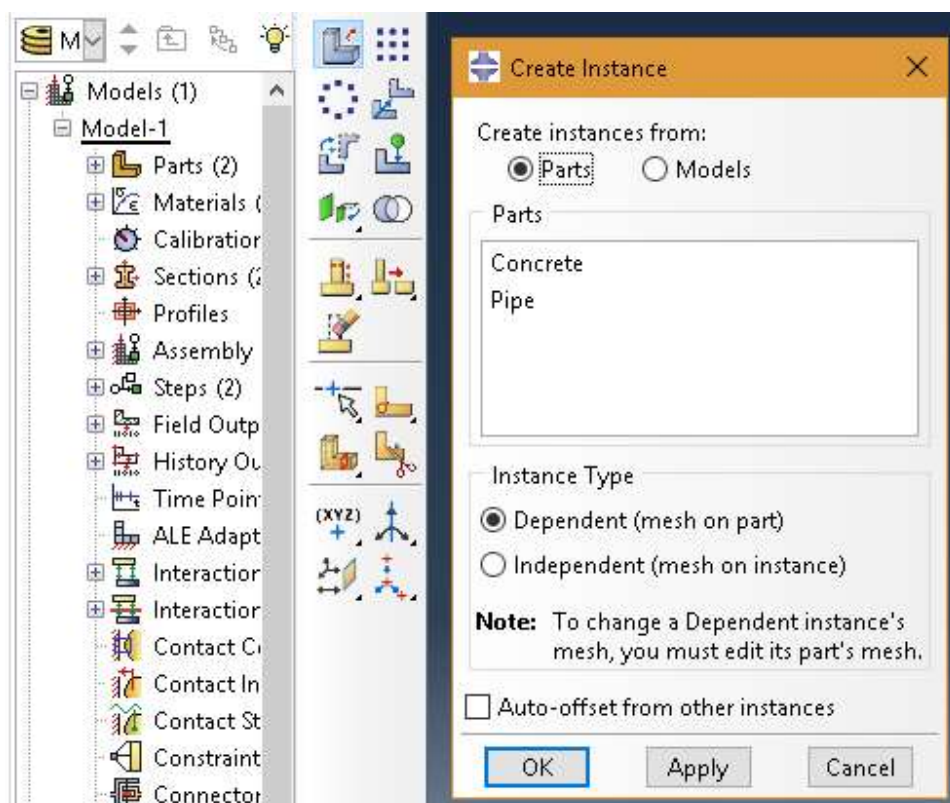


Fuente: Abaqus CAE, Autor.

13.4.4 Assembly

Luego de haber completado la malla y los modelos se hará el ensamblaje de estos, es decir, la asociación de las dos partes para que interactúen según los pasos de restricciones, cargas e interacciones según el material. Se seleccionan las partes previamente creadas

Figura 28. Menú Crear ensamblaje

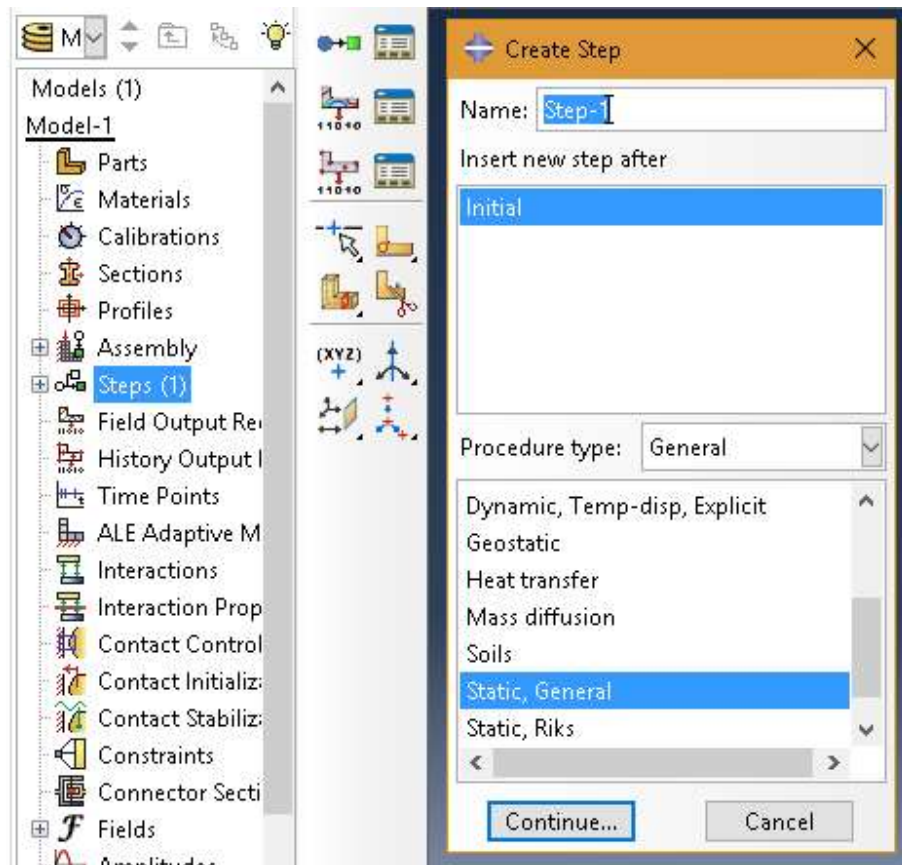


Fuente: Abaqus CAE, Autor.

13.4.5 Step

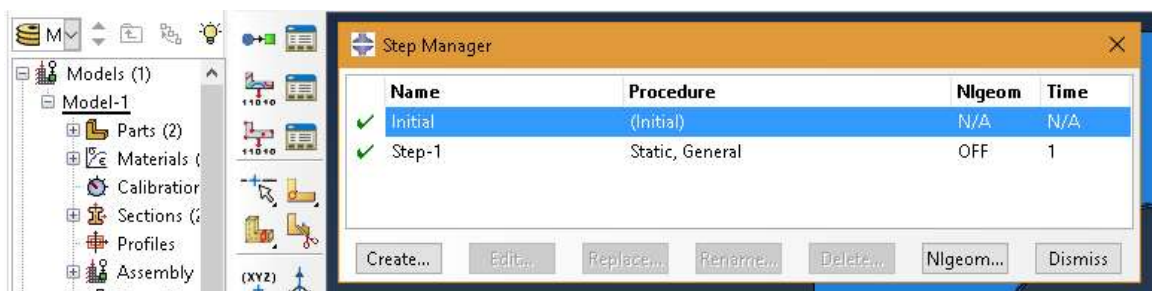
El programa opera los análisis de manera lógica de acuerdo a los pasos de que se creen y estos se propagaran de acuerdo al análisis que se requiera. El modelo por defecto crea un paso Inicial (Initial) en el cual deben ir las condiciones de frontera (Boundary), interacción (Interaction) mientras que los efectos de cargas, en este caso, la presión interna de la tubería ira en el paso 1 (Step 1), este se creara así:

Figura 29. Menú Crear paso



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 30. Menú Administrador de pasos

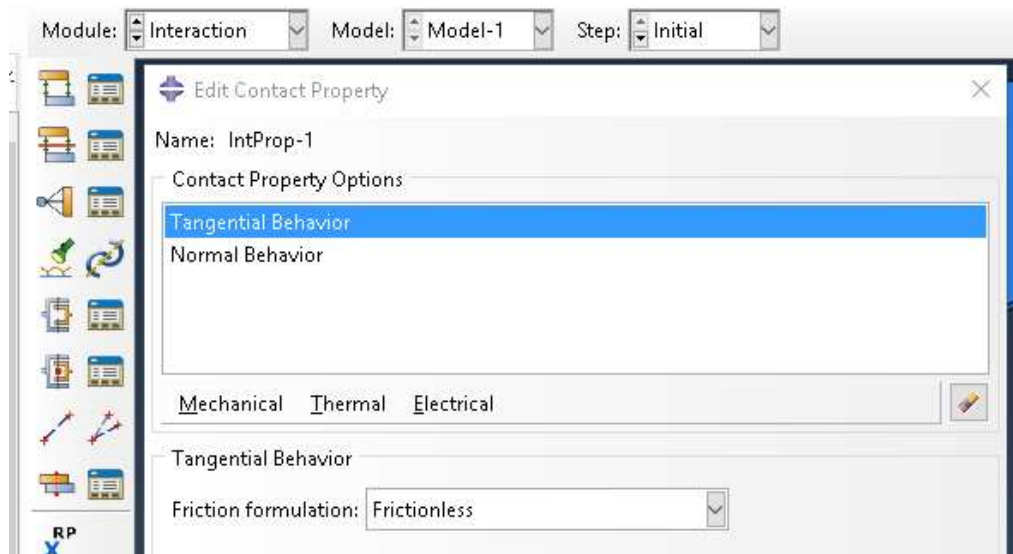


Fuente: Abaqus CAE, Autor.

13.4.6 Interaction

Primero se debe definir las propiedades que quiero tener en la interacción, se tomaran la Normal y la tangencial. Estas se seleccionarán de la opción Mechanical y se dejaran por defecto la configuración que trae el programa. En caso de conocerse el coeficiente de fricción de los elementos a interactuar se deberá adicionar.

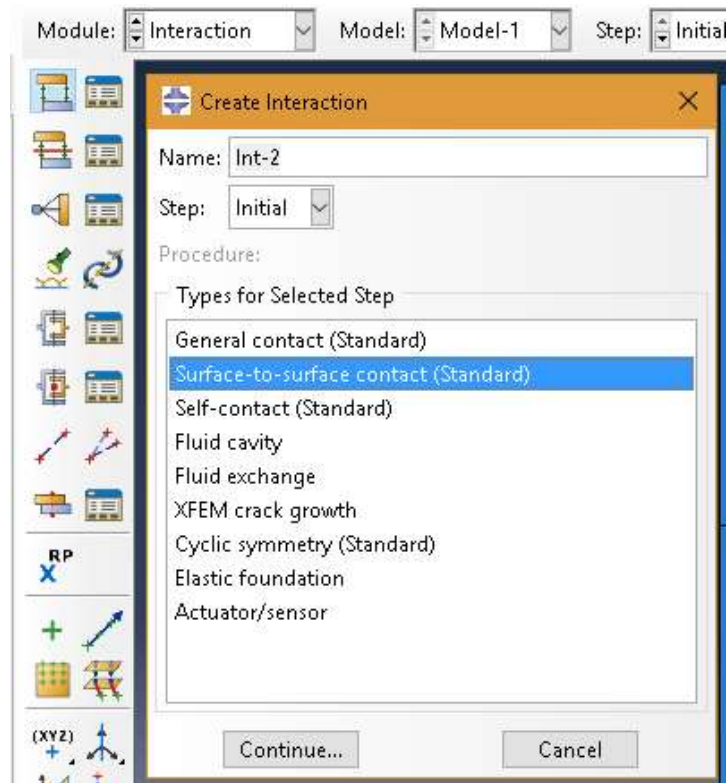
Figura 31. Edición de propiedades de contacto



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Luego se deberá crearla interacción (Create Interaction) en las superficies del modelo, para el caso de la tesis se realizara entre la pared externa de la tubería y el contacto del concreto que se encuentra alrededor, esta será Surface to surface contact.

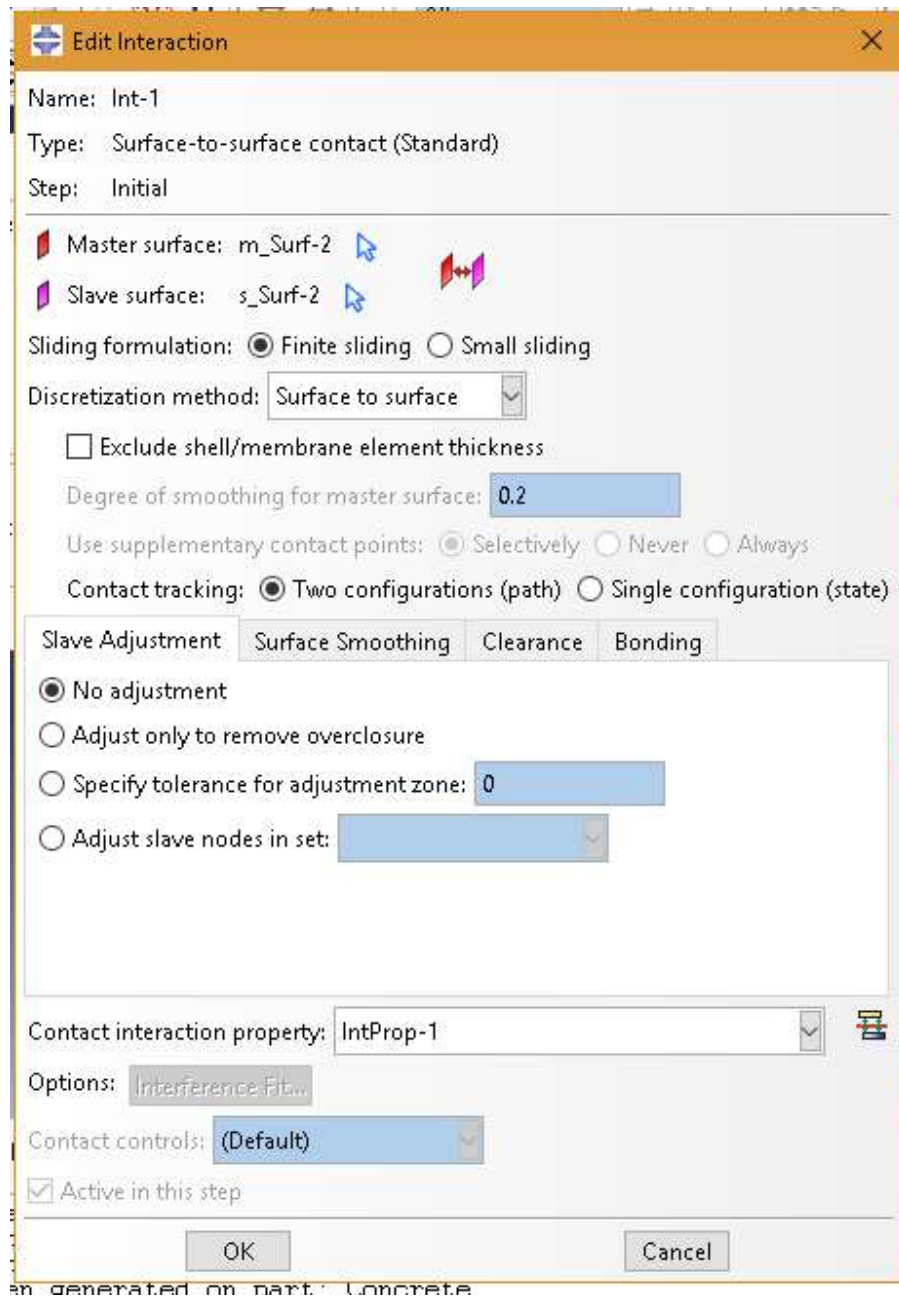
Figura 32. Menú Crear interacción



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Se seleccionara una superficie Master y una superficie Slave, la superficie master será el contorno de concreto alrededor de la tubería, mientras que la superficie Slave será la pared exterior de la tubería. Y se le asignara las propiedades de contacto anteriormente definidas.

Figura 33. Menú Edición de interacción

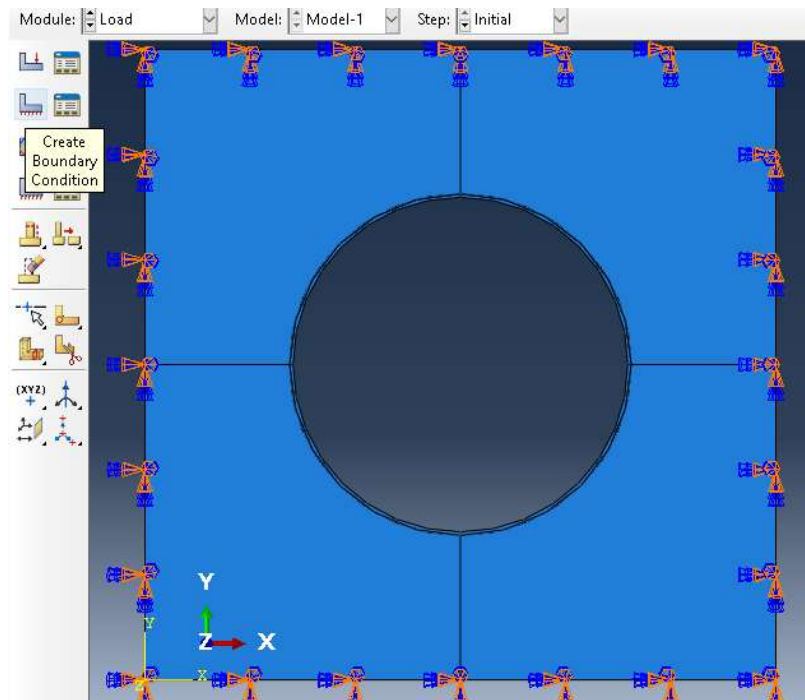


Fuente: Abaqus CAE, Autor.

13.4.7 Load

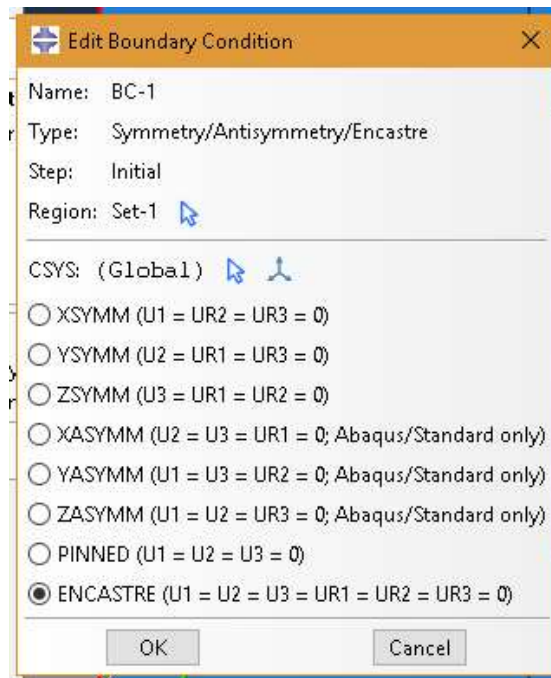
Este módulo se divide en condiciones de frontera y cargas, para la parte de frontera (Boundary) se restringirá el exterior del blindaje de concreto.

Figura 34. Ejemplo de Creación de condición de frontera



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

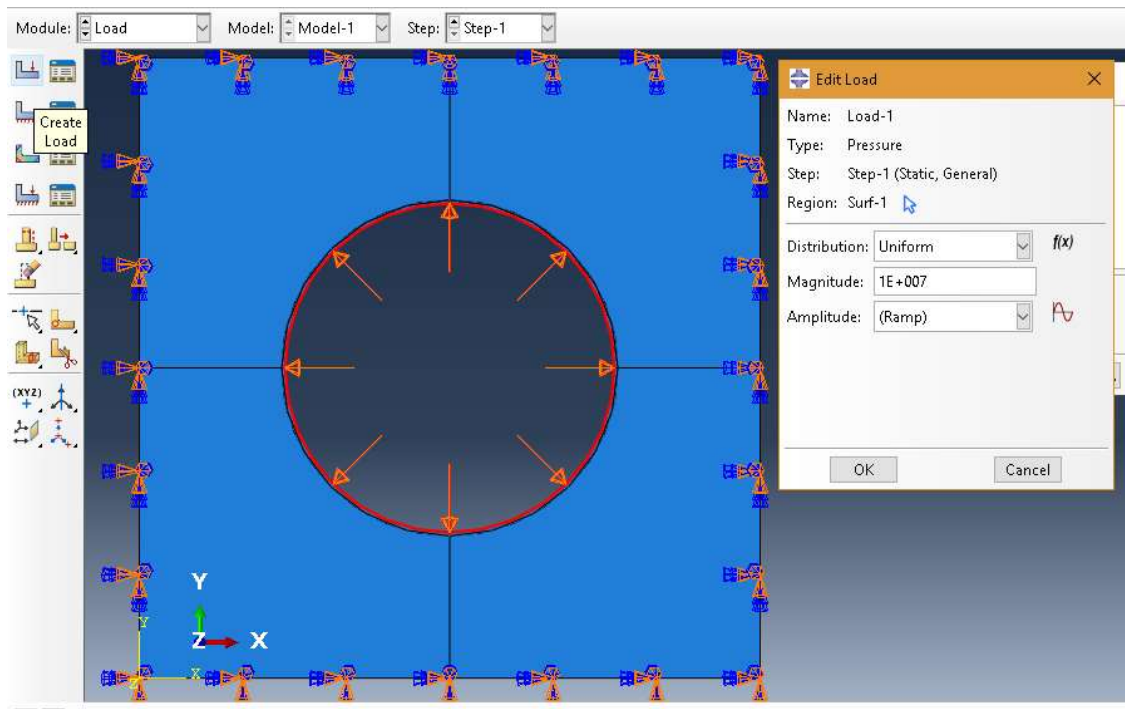
Figura 35. Menú Edición de condición de frontera



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Y en el caso de la tubería se creara la carga de presión (Pressure) en la superficie interna, estos datos varían de acuerdo a la Tabla 5. seran insertados en Magnitude y se dejara el resto de la configuración. La amplitud deberá ser Ramp para que esta sea distribuida linealmente alrededor de toda la superficie.

Figura 36. Menú de Edición de carga de presión

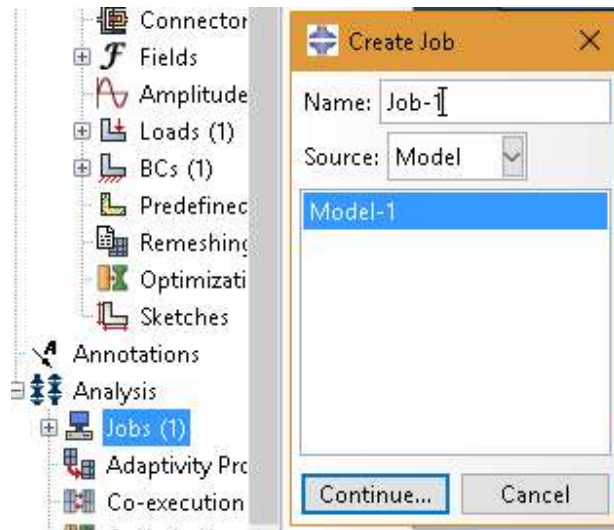


Fuente: Abaqus CAE, Autor.

13.4.8 Job

Una vez todas las condiciones anteriores estén completadas se procede a compilar las propiedades, es en este módulo del software Abaqus permite analizar en poco tiempo una estructura por medio de elementos finitos, trabajo que es gran utilidad para el desarrollo de los modelos planteados en esta tesis. Primero se crea una opción de trabajo en el cual van asociadas todas las entidades por modulo. Luego se verifica la escritura de los comandos, el éxito de compilar la información está en completar cada uno de los pasos anteriores para que no genere errores los cuales serán más tediosos de encontrar y corregir una vez se hayan ensamblado o asociado a superficies o materiales.

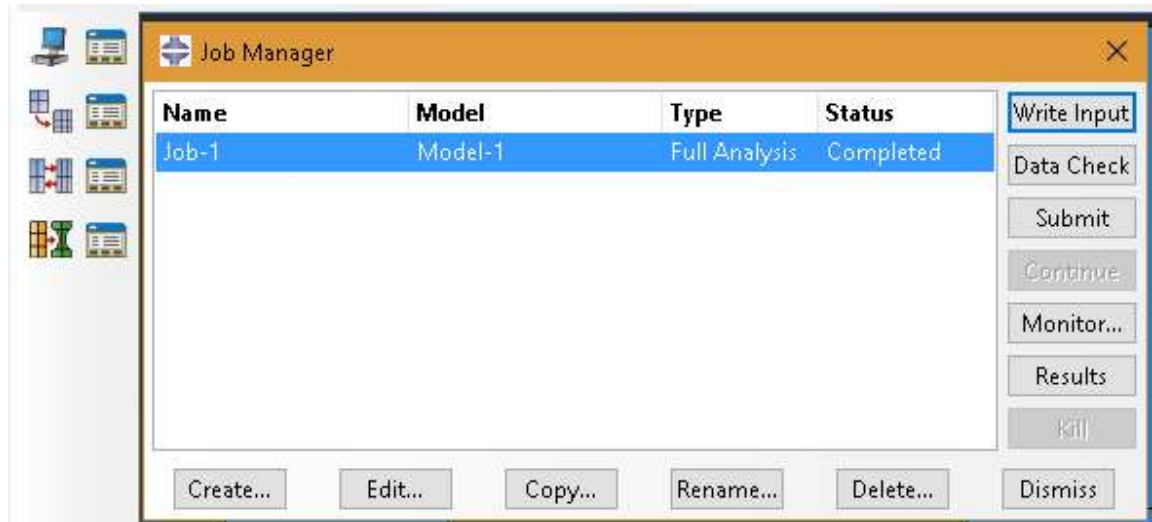
Figura 37. Menú Crear trabajo



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Se verifica en Data check, el empezara a verificar sintaxis, se indicara en el Status, cuando este en proceso aparecerá Running y cuando ya esté completo aparcera Completed. Si llegara a haber algún error aparecerá Aborted y se deberá ir a la opción Data Check en la cual mostrara la línea del proceso que está incompleta o incorrecta. Una vez terminado y si no aparece ningún error se enviara a compilar para visualizar los resultados, se dará click en la opción Submit (Enviar), tomara un poco de tiempo por lo cual es recomendable que no se manipule otra ventana del programa ya que esto podría entorpecer el proceso. Cuando este completado se dará click en la opción Results y pasara al módulo de Visualización (Visualization) de resultados en el cual se extrajeron las imágenes y datos que se mostraran en el capítulo 14

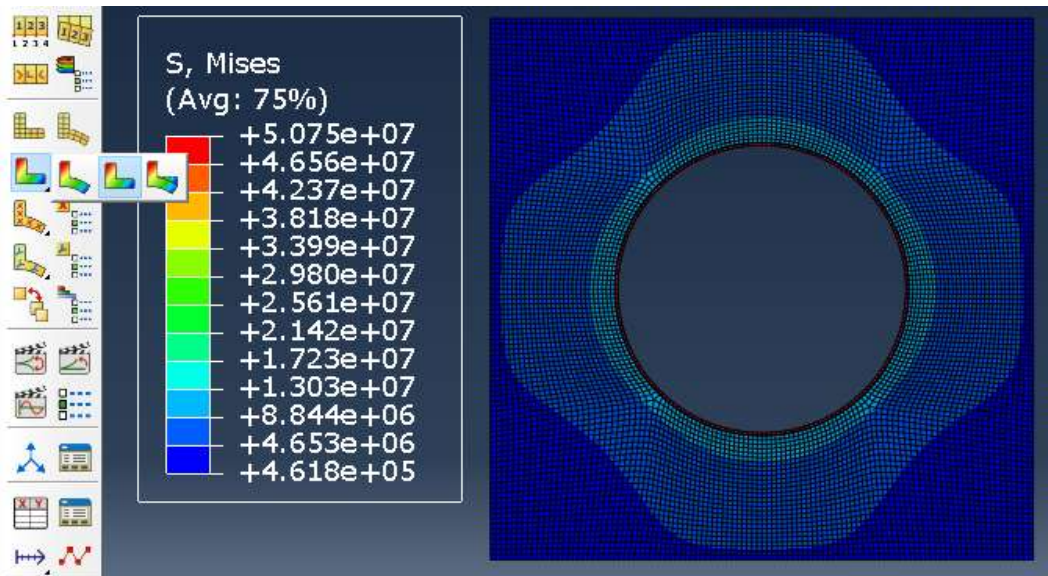
Figura 38. Menú Administrador de trabajos



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Para visualizar las reacciones se deberá seleccionar la opción de Plot Contour On Undeformed Shape como lo muestra la Figura 40, se deberá seleccionar el grafico que se requiera según el caso. El programa por defecto presenta un cuadro de datos asociados al color en la superficie

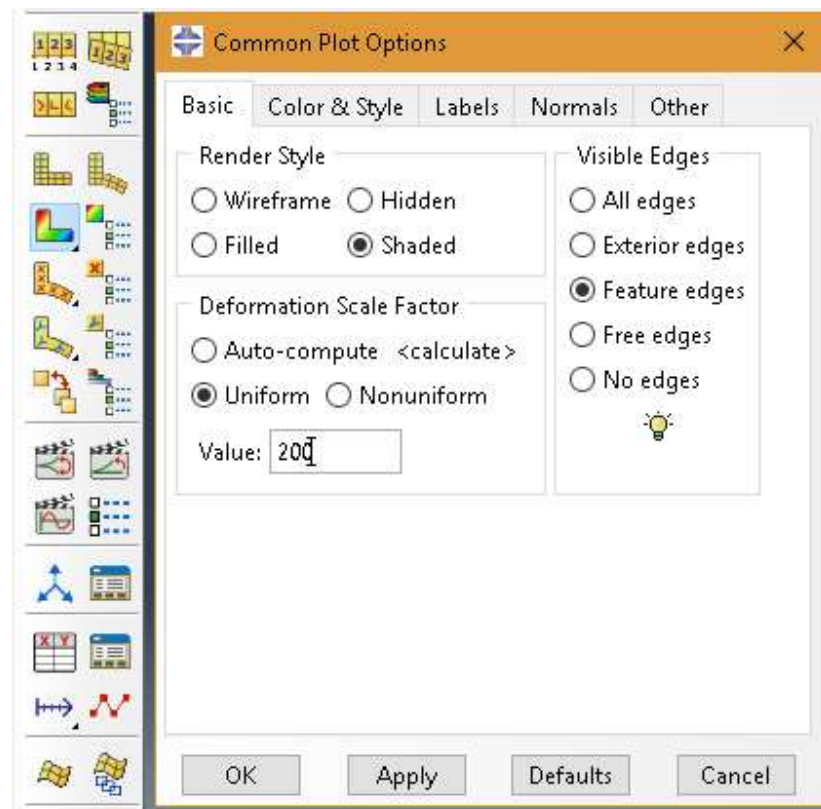
Figura 39. Menú de impresión de deformación de forma



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Y para visualizar la escala en la cual se realiza la deformación u ocultar los modos de la superficie se deberá seleccionar la siguiente opción y modificar según se requiera. Para mejor visualización de las gráficas del análisis se han ocultado los nodos.

Figura 40. Menú de opciones de impresión



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Según el tipo de característica a analizar se deberá seleccionar desde las opciones Field output.

Figura 41. Menú salida de datos



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Se debera apagar la superficie de tuberia para visualizar mejor las reacciones en el concreto. Aquí se selecciona la seccion de tuberia y luego Done.

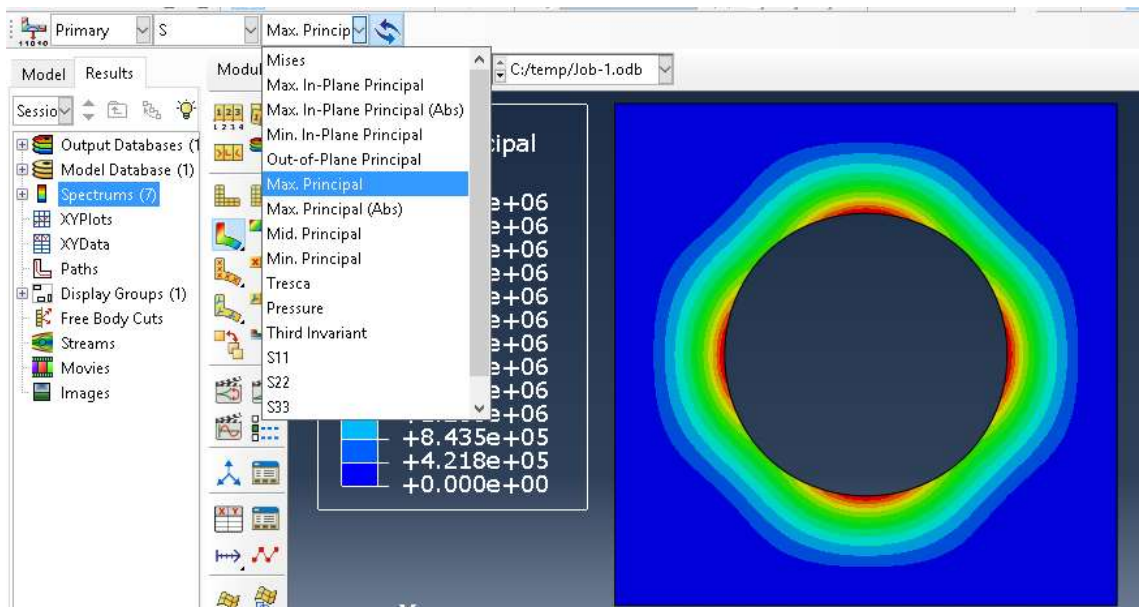
Figura 42. Menú manejo de visualización de superficies



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

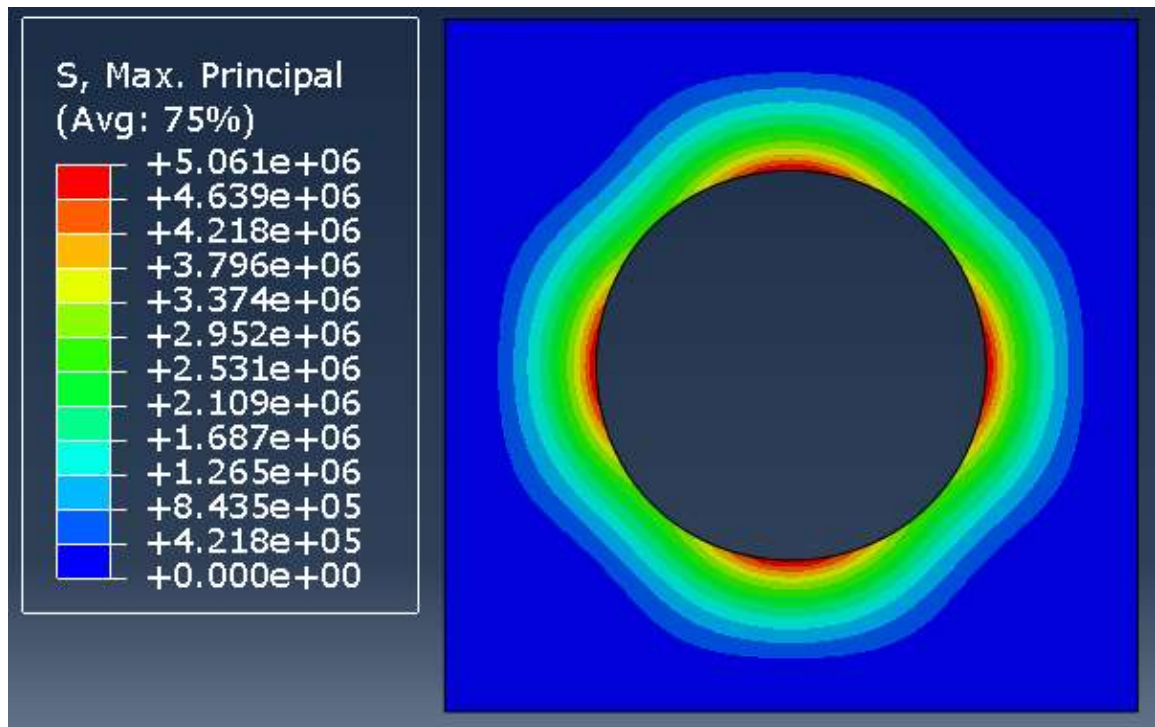
Para visualizar la distribución de esfuerzos en el modelo se selecciona las siguientes opciones en la figura

Figura 43. Ejemplo de menú selección de distribución esfuerzos de deformación en la estructura



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

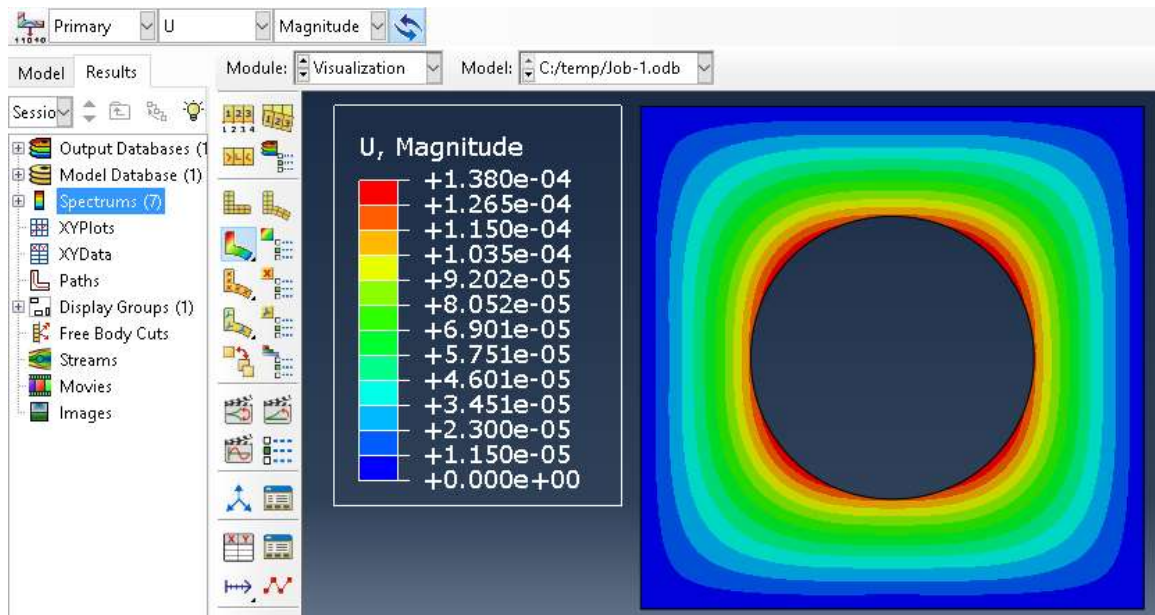
Figura 44. Ejemplo de datos de distribución de esfuerzos de deformación en la estructura de concreto



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Para visualizar la deformación de la pared de concreto respecto la carga de presión interna de la tubería se procede a seleccionar las opciones de la Figura en Field output.

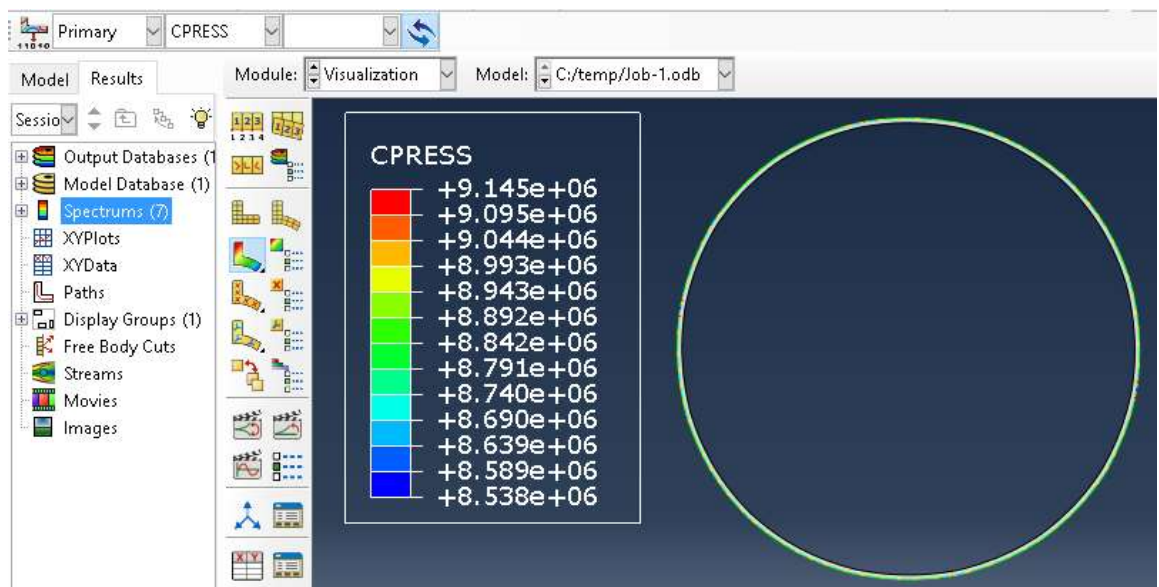
Figura 45. . Ejemplo de selección de deformación en la estructura de concreto



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Luego para conocer la presión de contacto ejecutada a la pared externa de la tubería que está en contacto con el concreto se deberá seleccionar la opción de Field output, pero en esta ocasión de apaga la sección de concreto y se deja solo la tubería.

Figura 46. Ejemplo de presión de contacto en pared exterior de tubería



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

El intervalo es la indicación de un cambio en el análisis, donde los colores más cálidos serán los valores más altos y los colores más fríos serán los valores más bajos o la ausencia de reacción según sea el caso, estos valores están dados en Pa.

El tiempo compilación varía dependiendo el tamaño de la superficie, la cantidad de nodos de la malla, y los pasos que se requieran para analizar. Para los modelos realizados en esta tesis el tiempo de compilación estuvo entre los 5 a 10 min; esto también está asociado a las características de hardware en las cuales se realice la modelación.

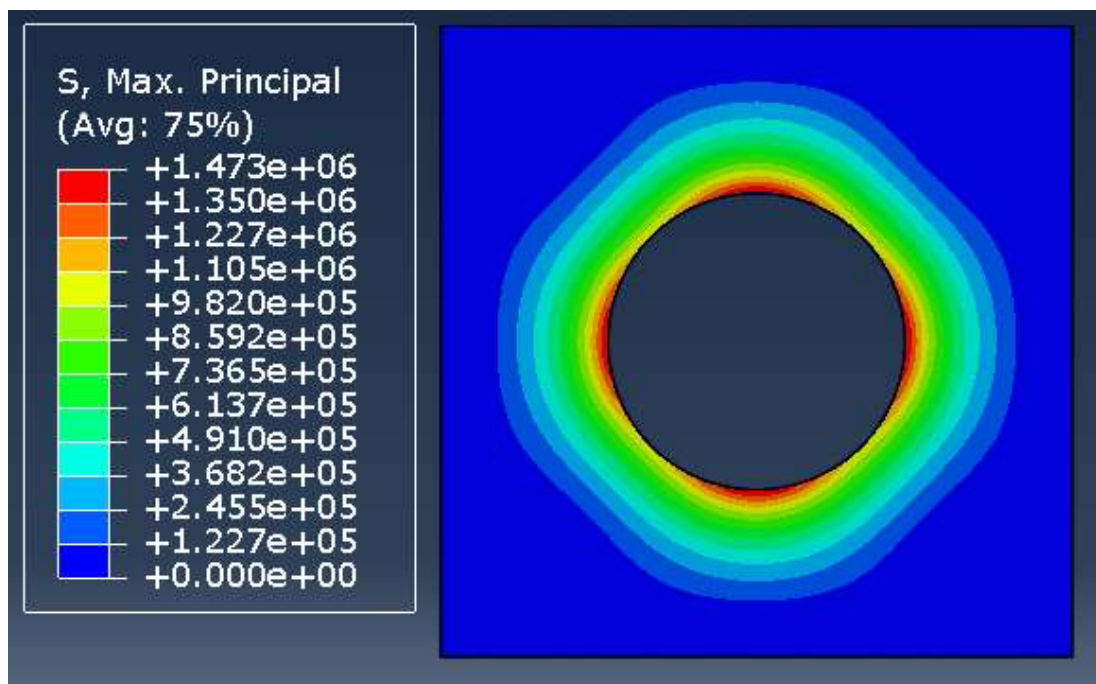
El archivo final se deberá guardar como .cae para éste caso estarán versión 2017 y se encontraran en el Anexo 2. Cada uno nombrado como Modelo #.cae.

14 RESULTADOS

Los modelos elaborados están de acuerdo a la información inicial en las hojas de cálculo de los Anexos 1. Los archivos .cae de cada modelo se encuentran en el Anexo 2, estos están guardados como .cae y deben ser abiertos y trabajados en una versión de Abaqus CAE 2017 o superior. El resultado de los modelos 1 al 12 se muestra a continuación.

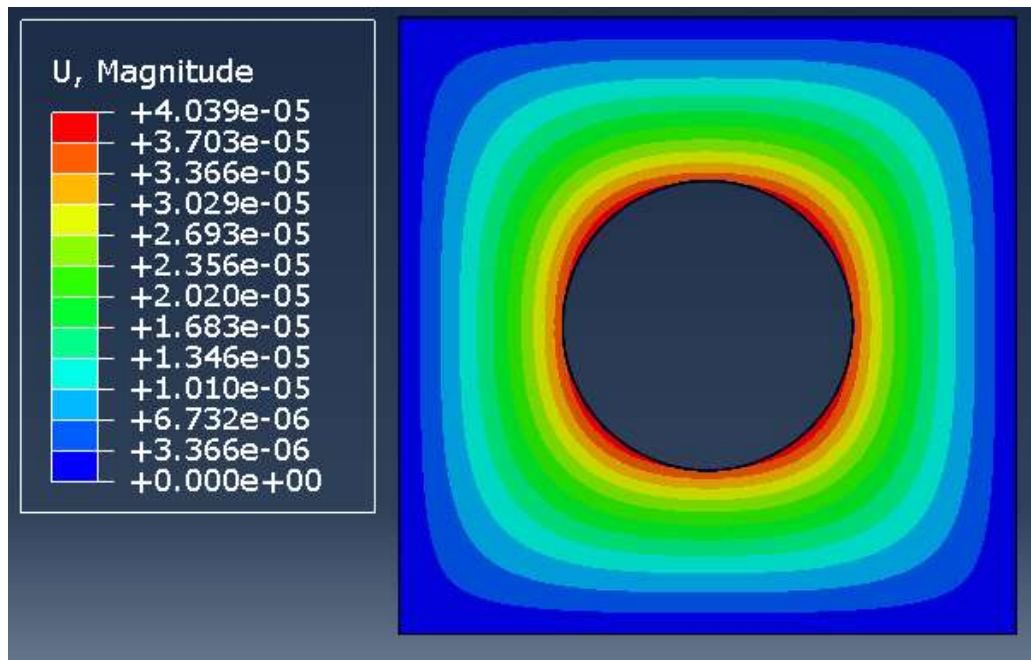
14.1 MODELO 1

Figura 47. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 1



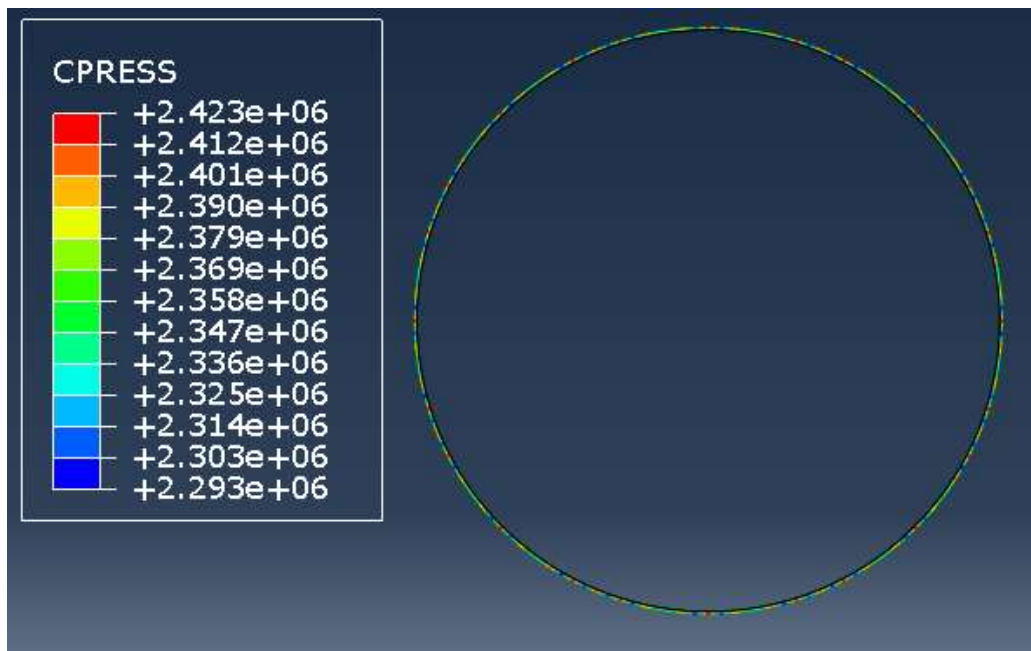
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 48. Deformación en blindaje de concreto para modelo 1



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

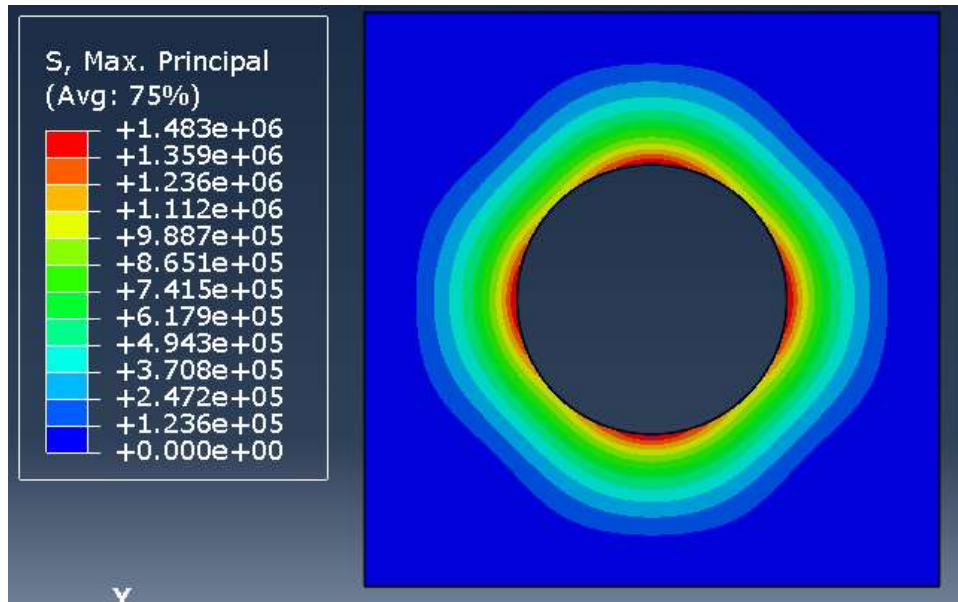
Figura 49. Presión de contacto en tubería para modelo 1



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

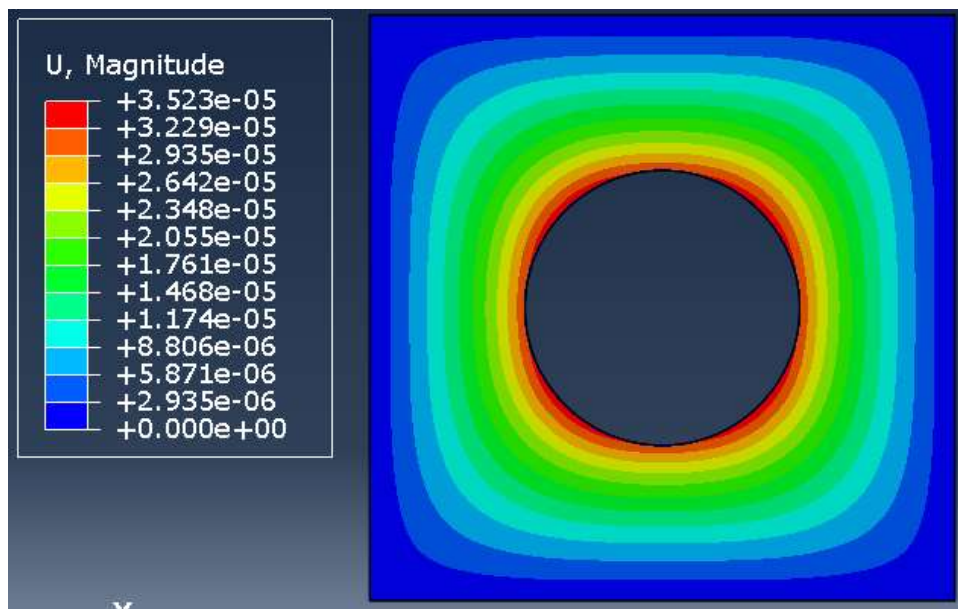
14.2 MODELO 2

Figura 50. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 2



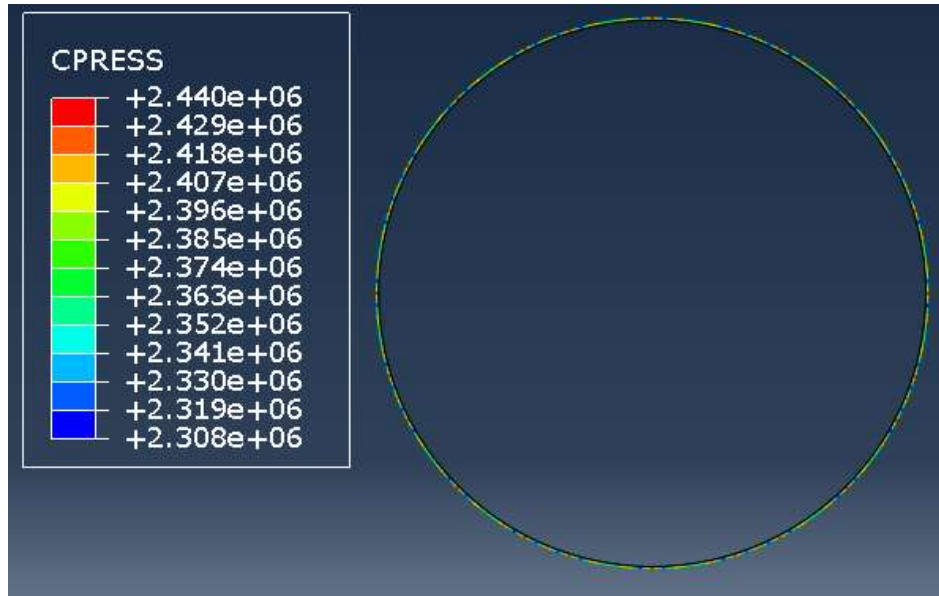
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 51. Deformación en blindaje de concreto para modelo 2



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

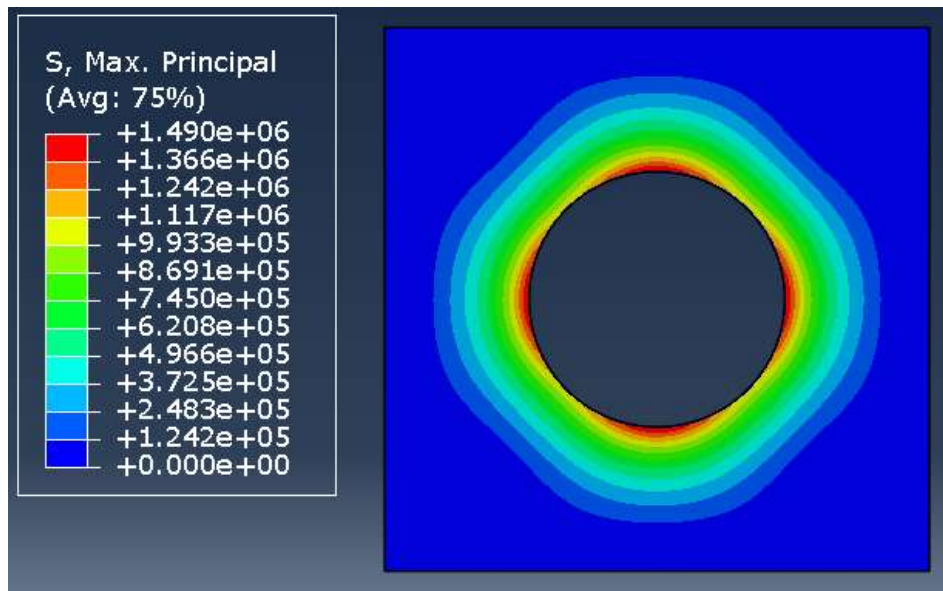
Figura 52. Presión de contacto en tubería para modelo 2



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

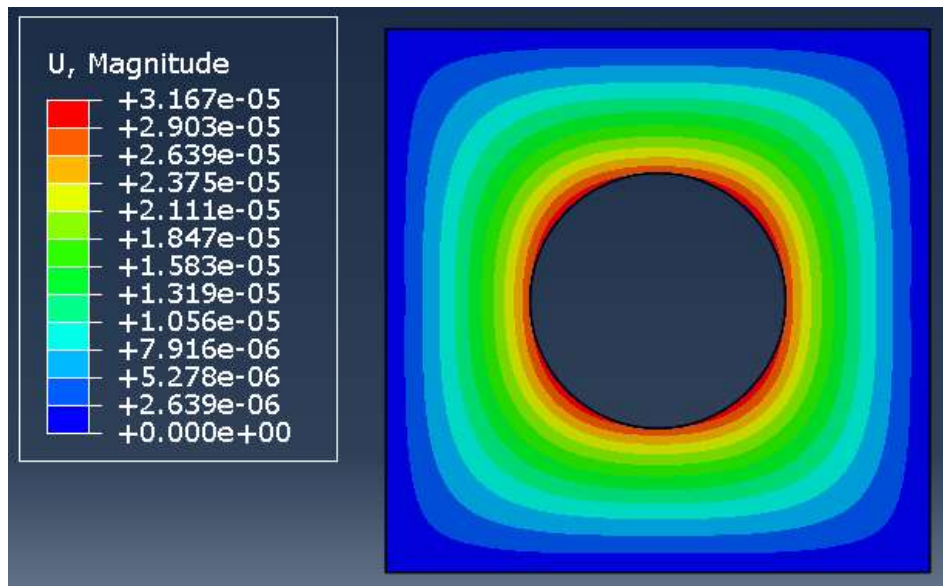
14.3 MODELO 3

Figura 53. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 3



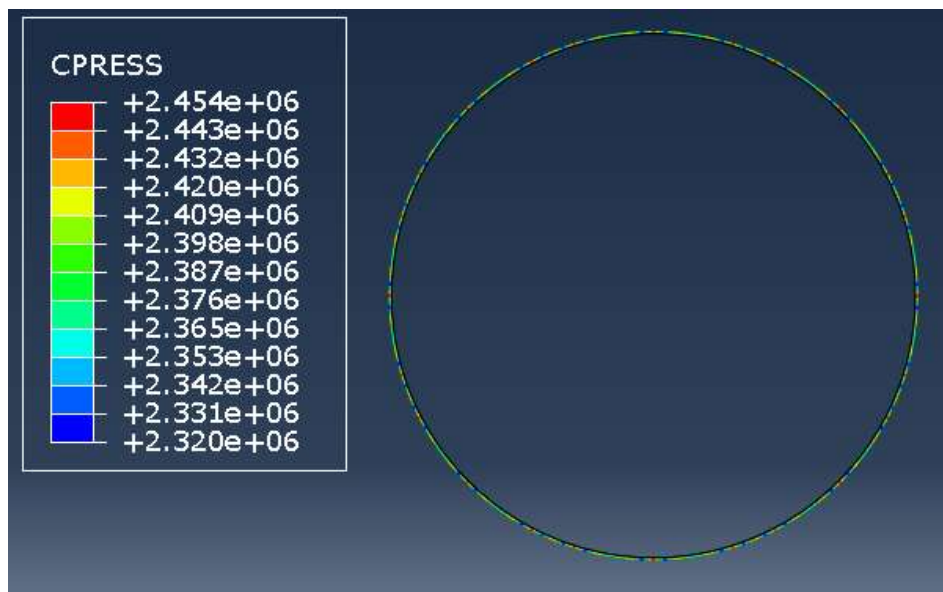
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 54. Deformación en blindaje de concreto para modelo 3



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

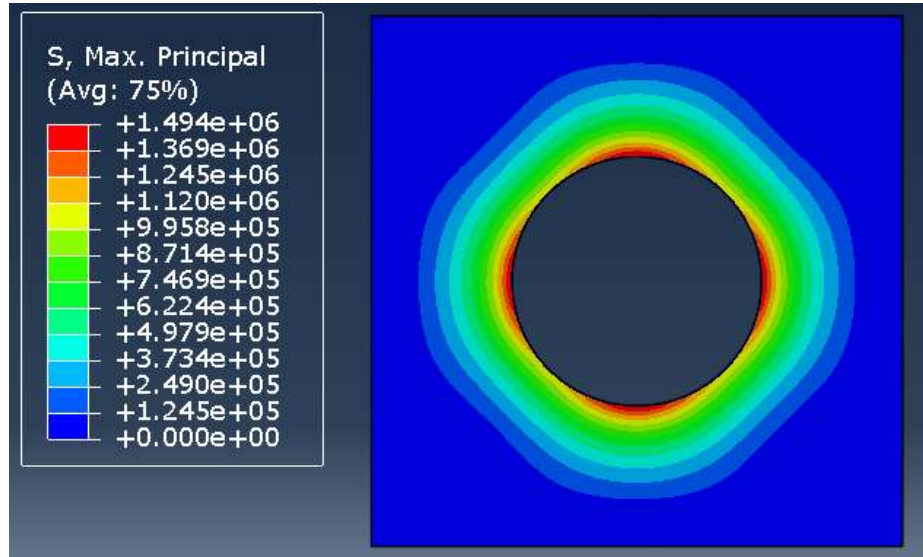
Figura 55. Presión de contacto en tubería para modelo 3



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

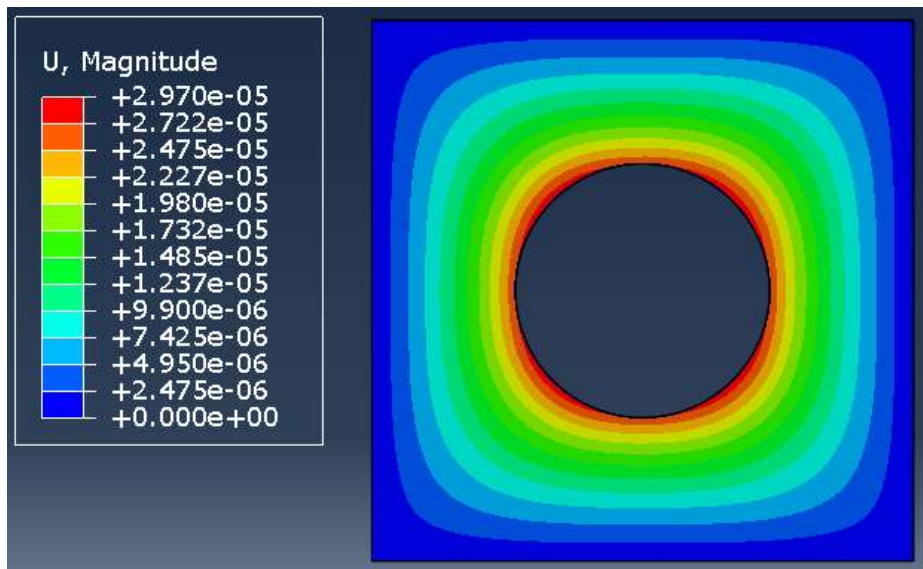
14.4 MODELO 4

Figura 56. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 4



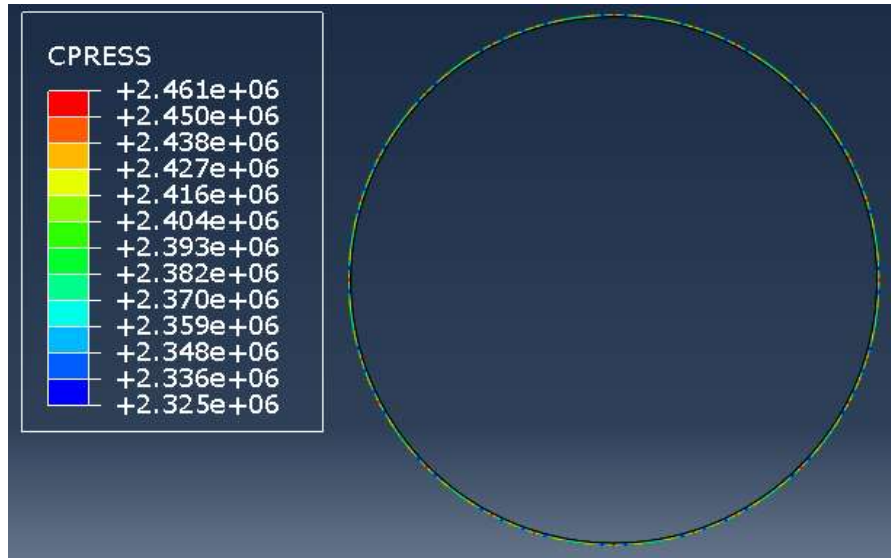
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 57. Deformación en blindaje de concreto para modelo 4



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

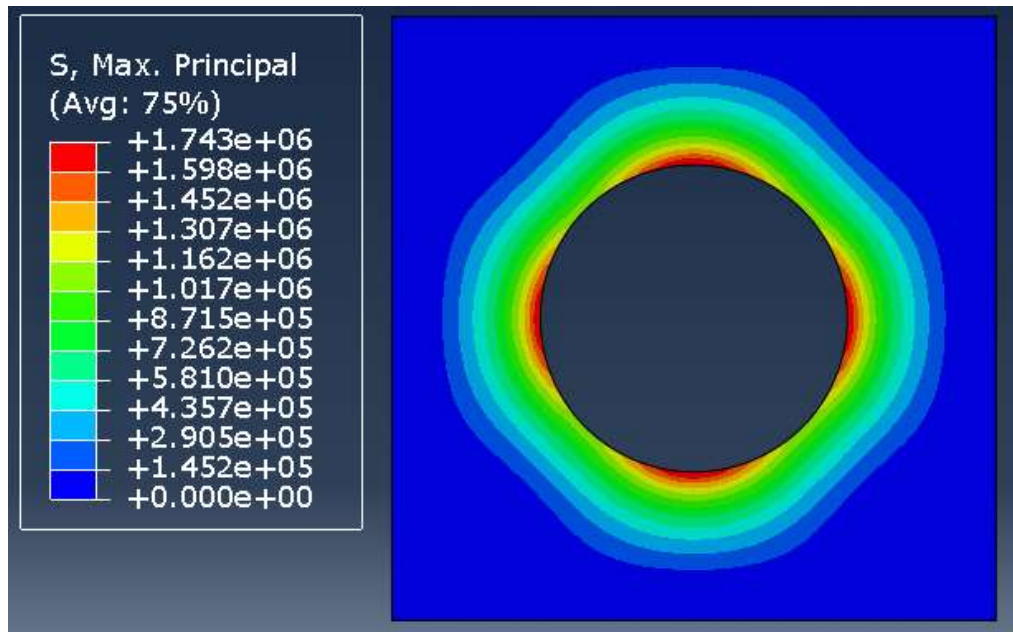
Figura 58. Presión de contacto en tubería para modelo 4



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

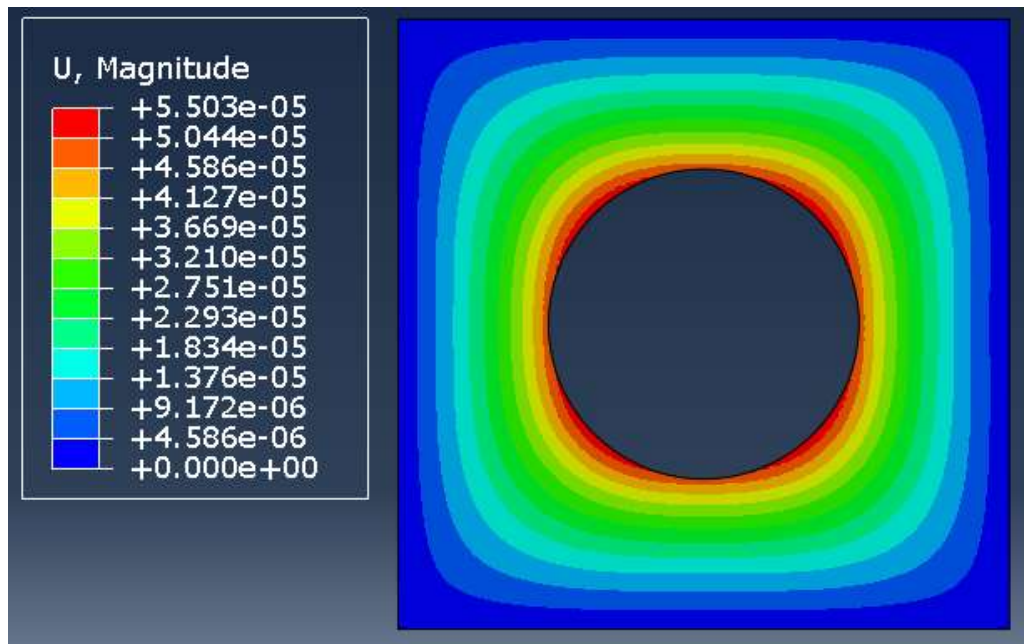
14.5 MODELO 5

Figura 59. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 5



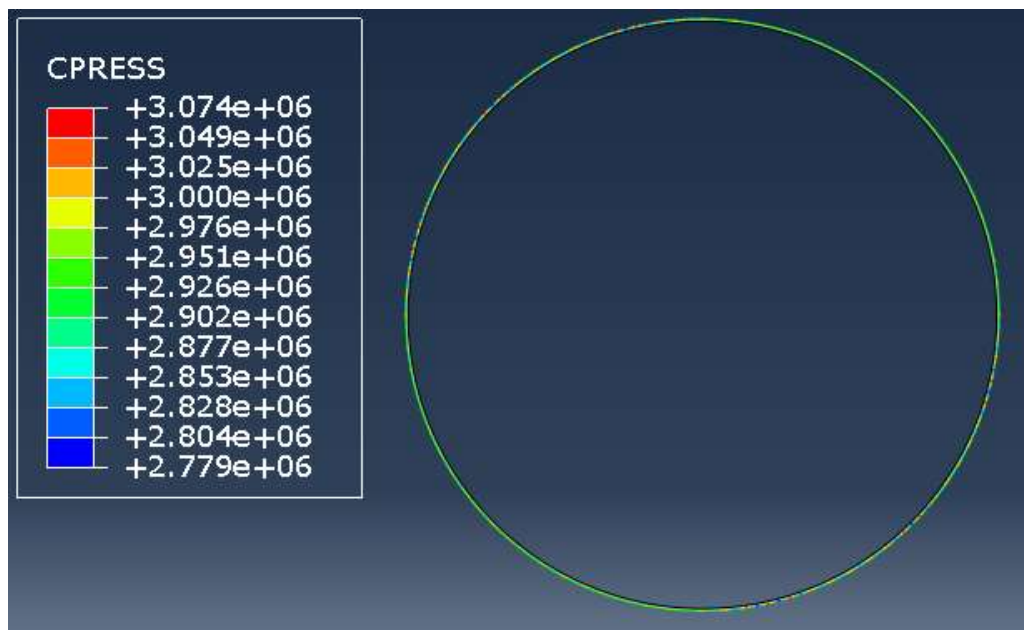
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 60. Deformación en blindaje de concreto para modelo 5



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

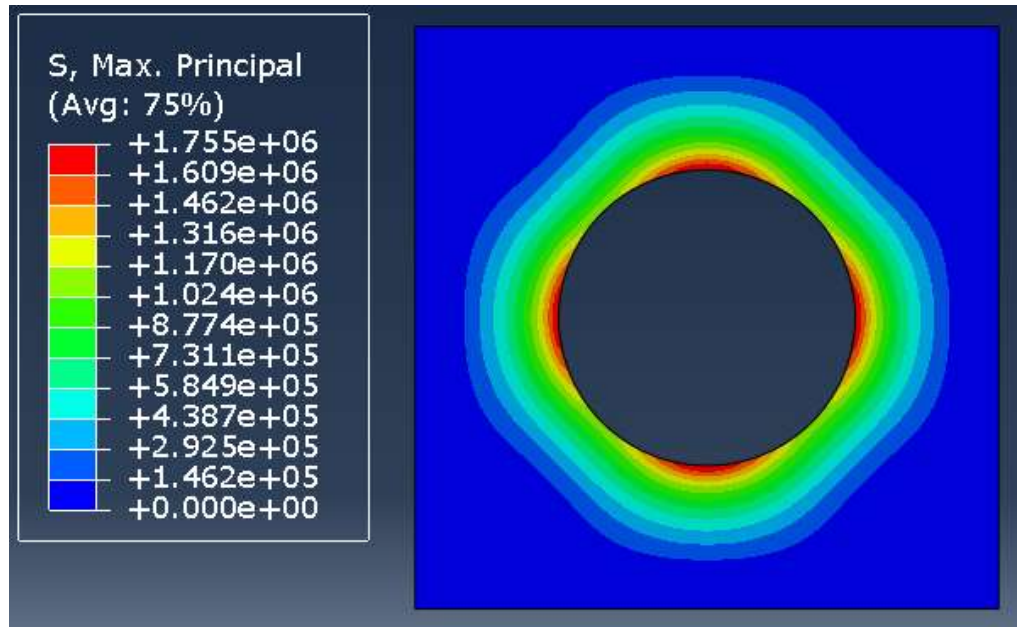
Figura 61. Presión de contacto en tubería para modelo 5



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

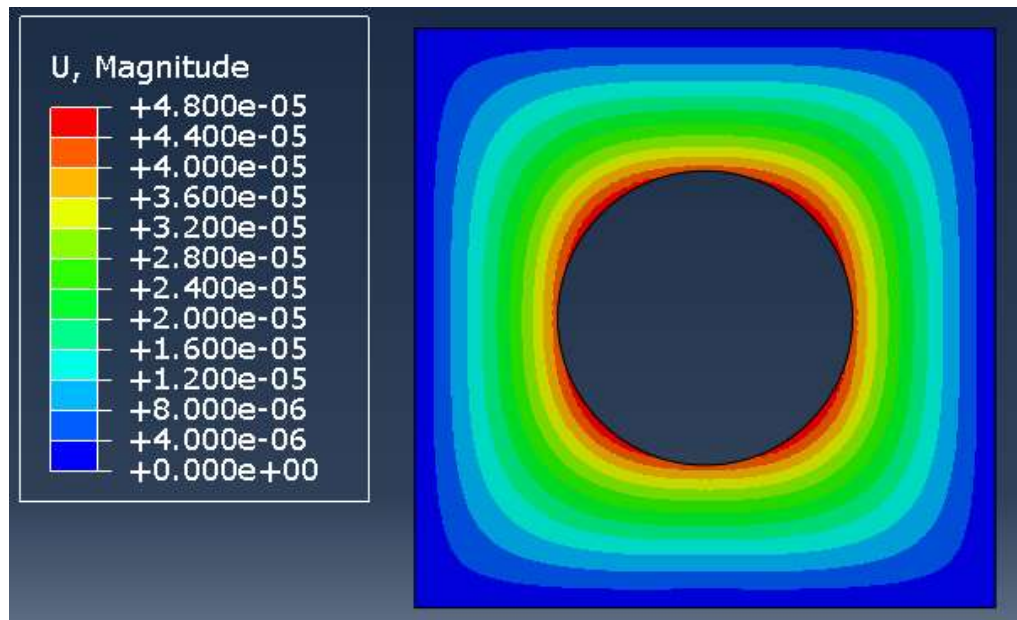
14.6 MODELO 6

Figura 62. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 6



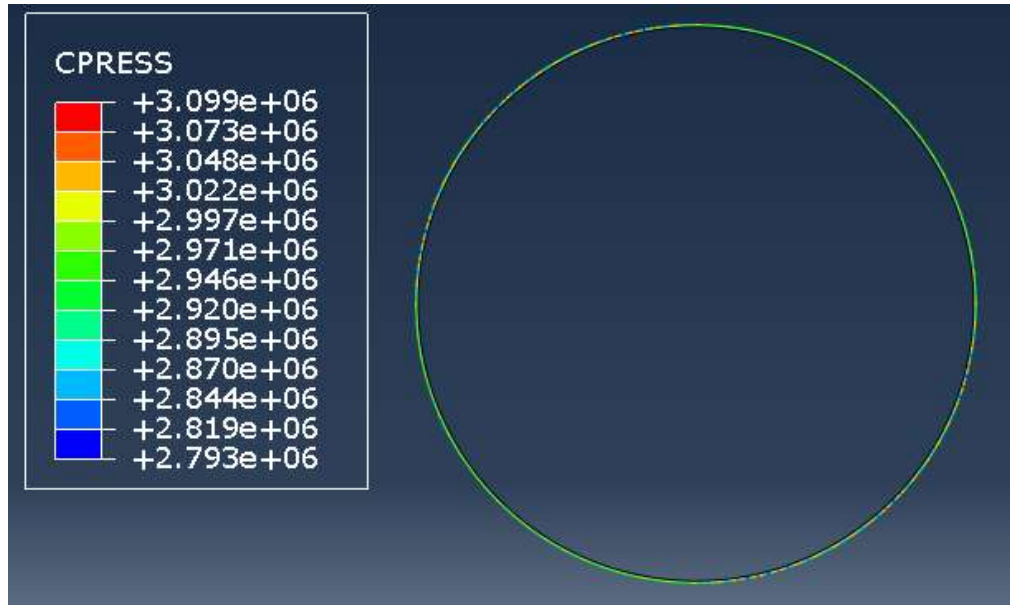
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 63. Deformación en blindaje de concreto para modelo 6



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

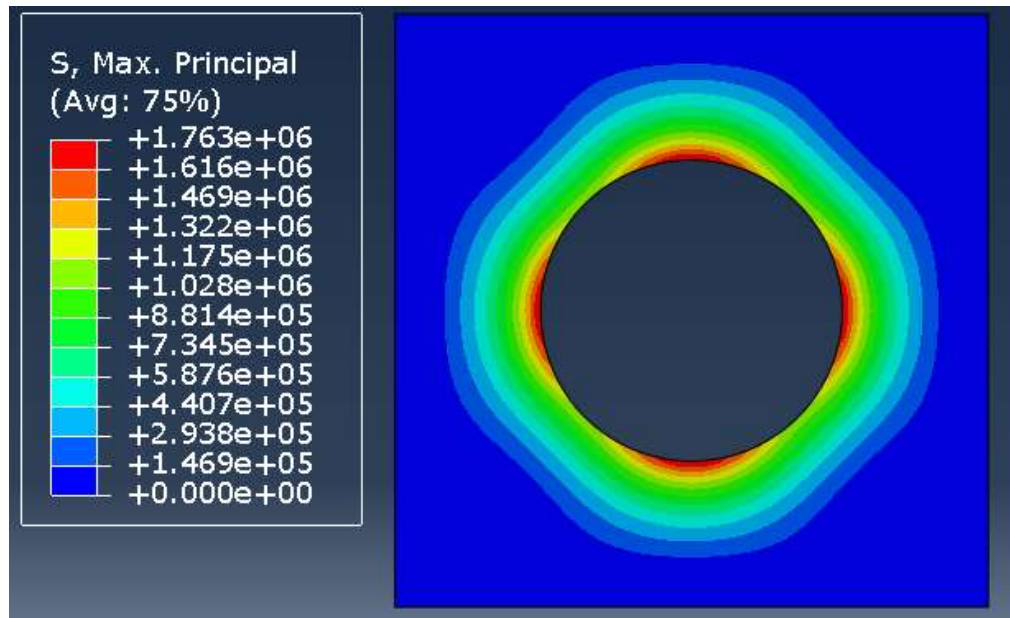
Figura 64. Presión de contacto en tubería para modelo 6



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

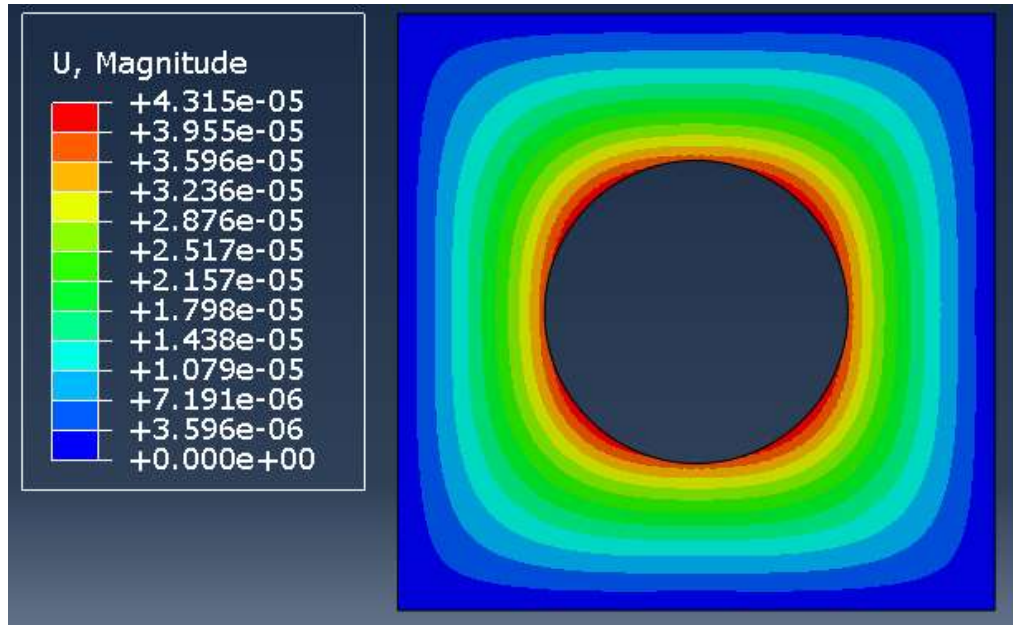
14.7 MODELO 7

Figura 65. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 7



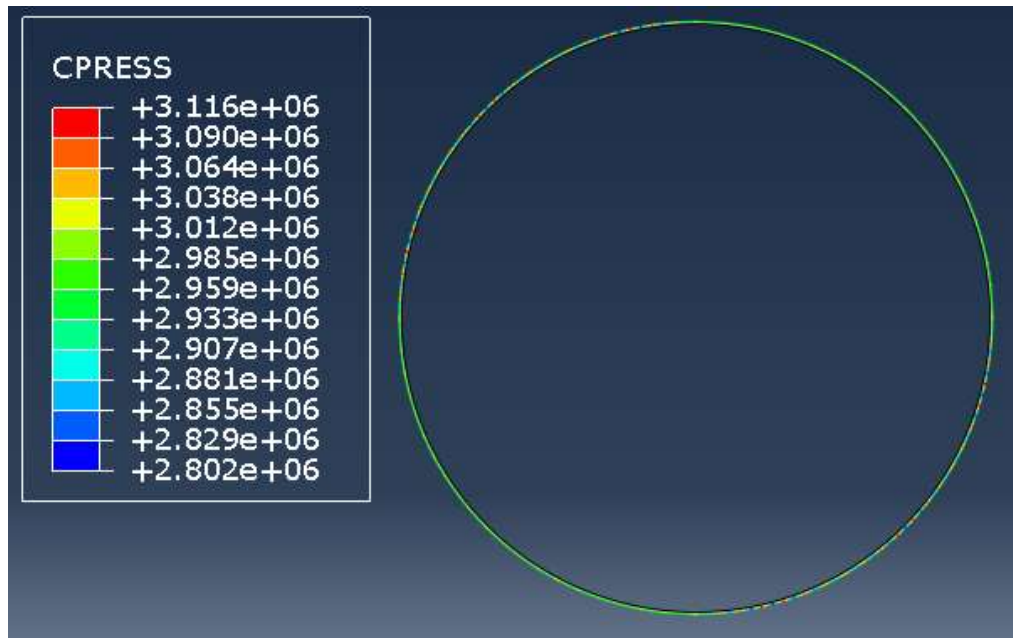
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 66. Deformación en blindaje de concreto para modelo 7



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

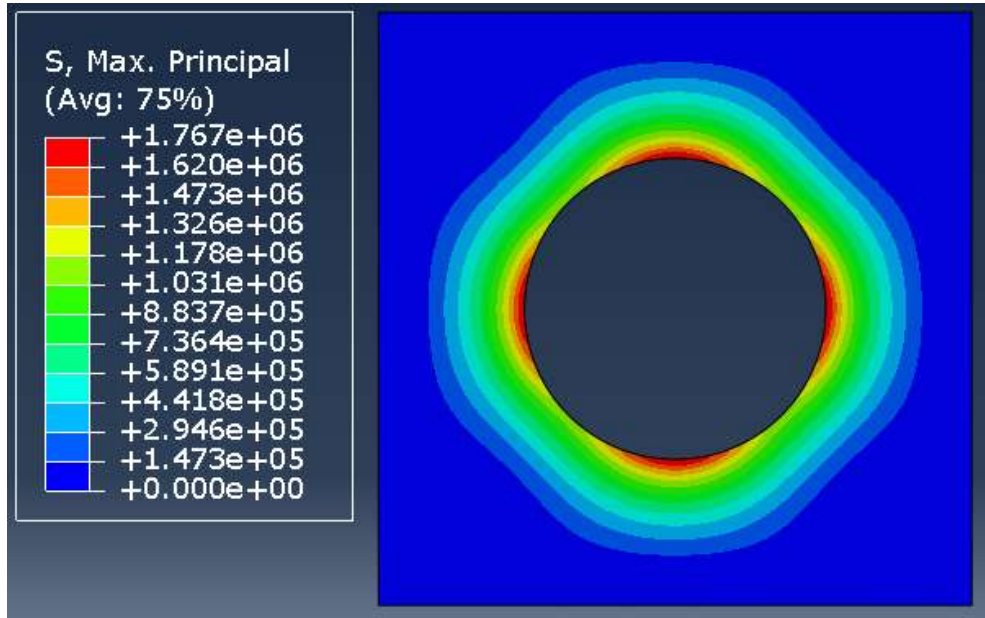
Figura 67. Presión de contacto en tubería para modelo 7



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

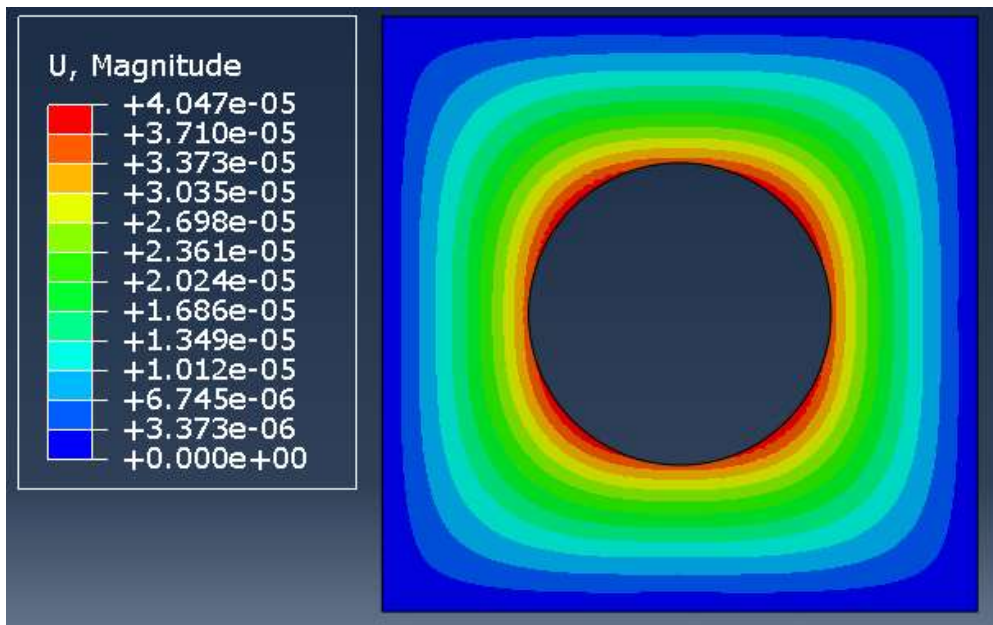
14.8 MODELO 8

Figura 68. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 8



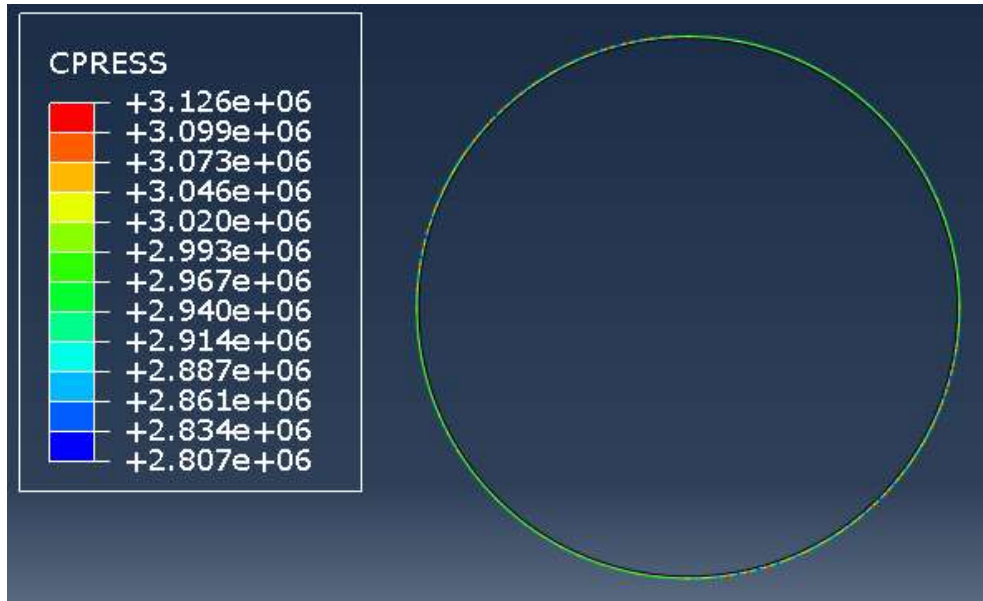
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 69. Deformación en blindaje de concreto para modelo 8



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

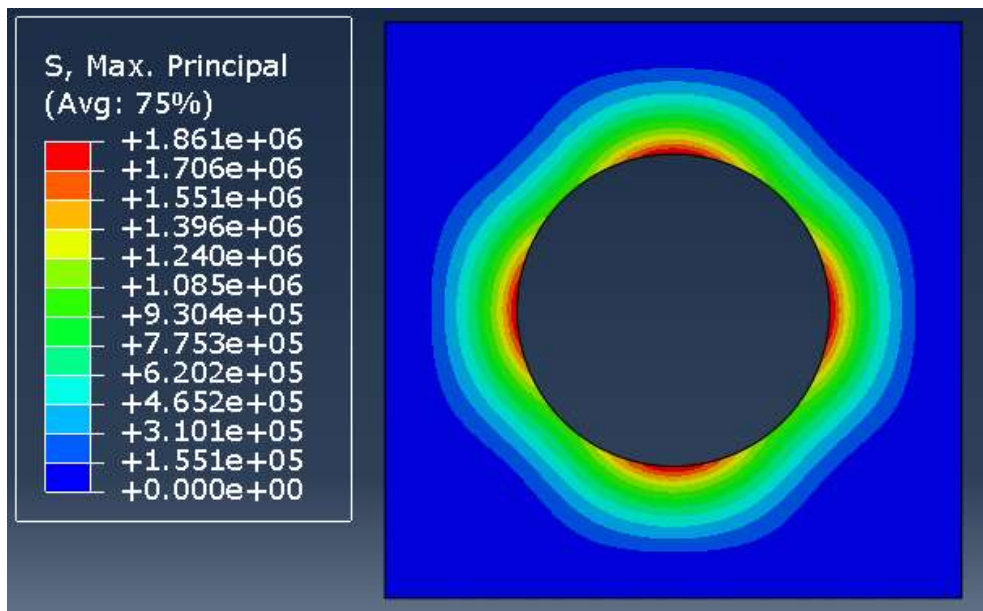
Figura 70. Presión de contacto en tubería para modelo 8



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

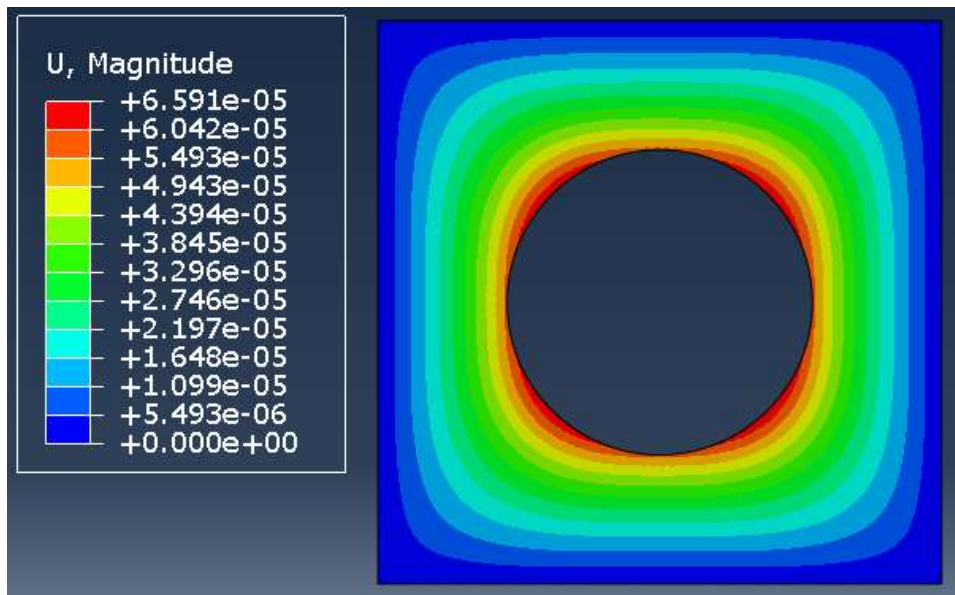
14.9 MODELO 9

Figura 71. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 9



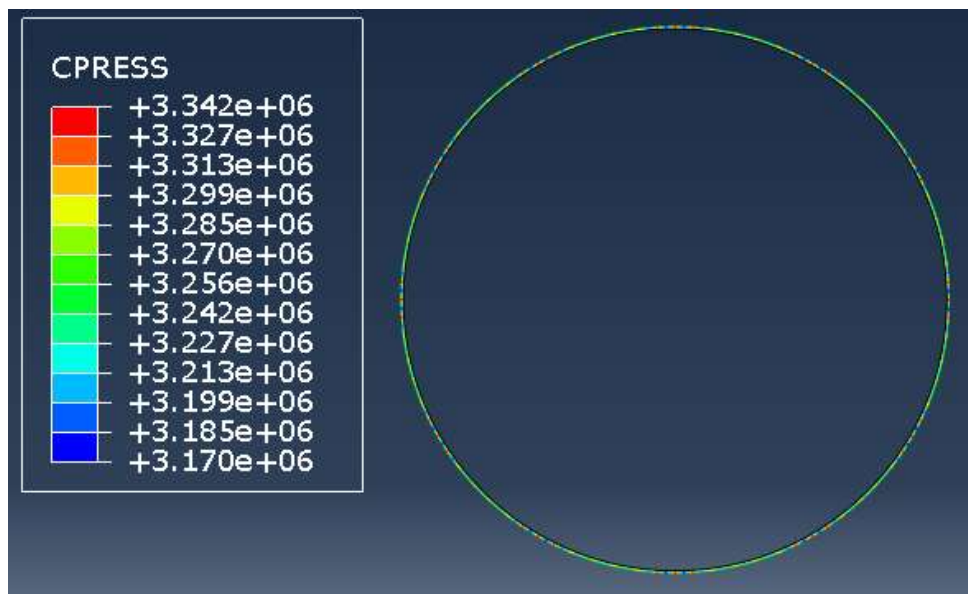
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 72. Deformación en blindaje de concreto para modelo 9



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

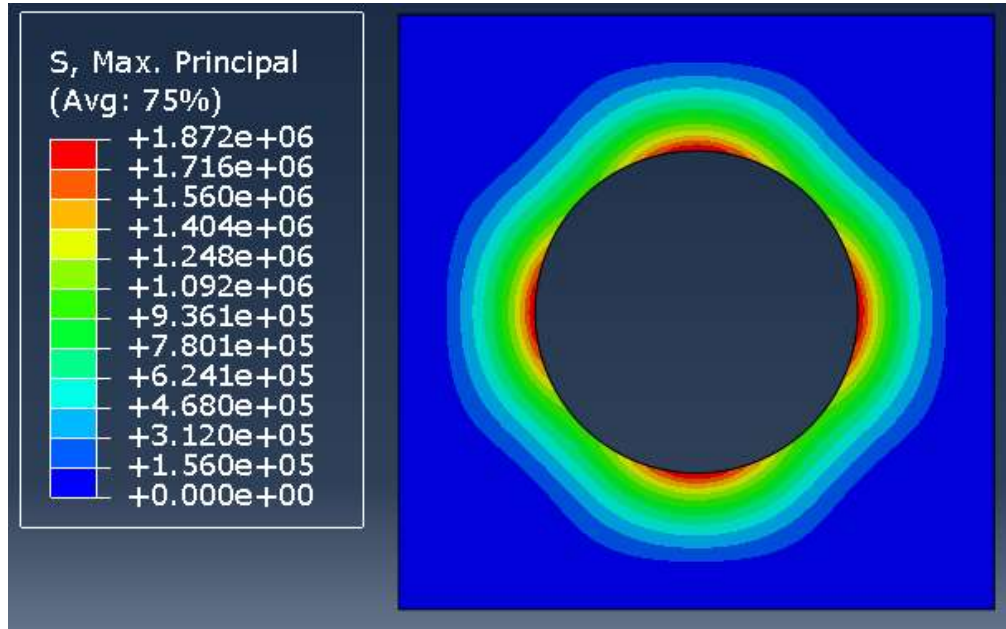
Figura 73. Presión de contacto en tubería para modelo 9



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

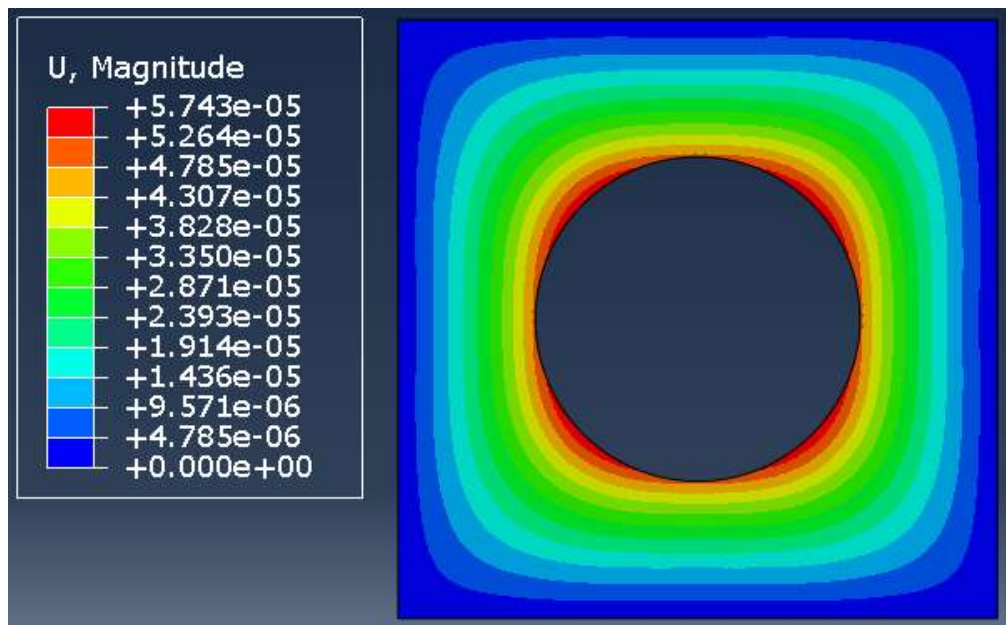
14.10 MODELO 10

Figura 74. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 10



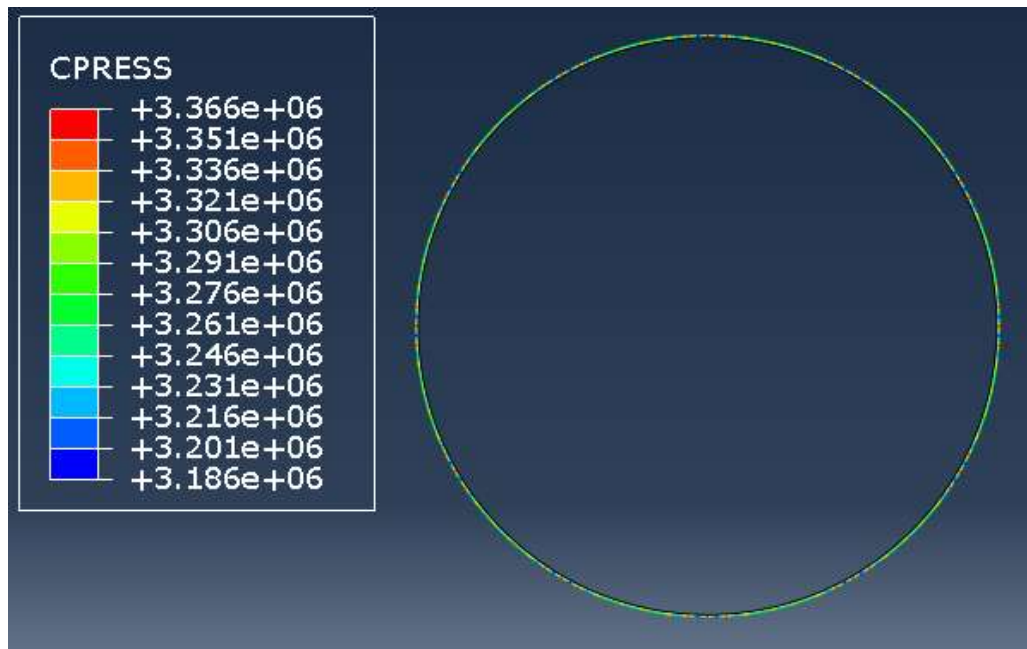
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 75. Deformación en blindaje de concreto para modelo 10



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

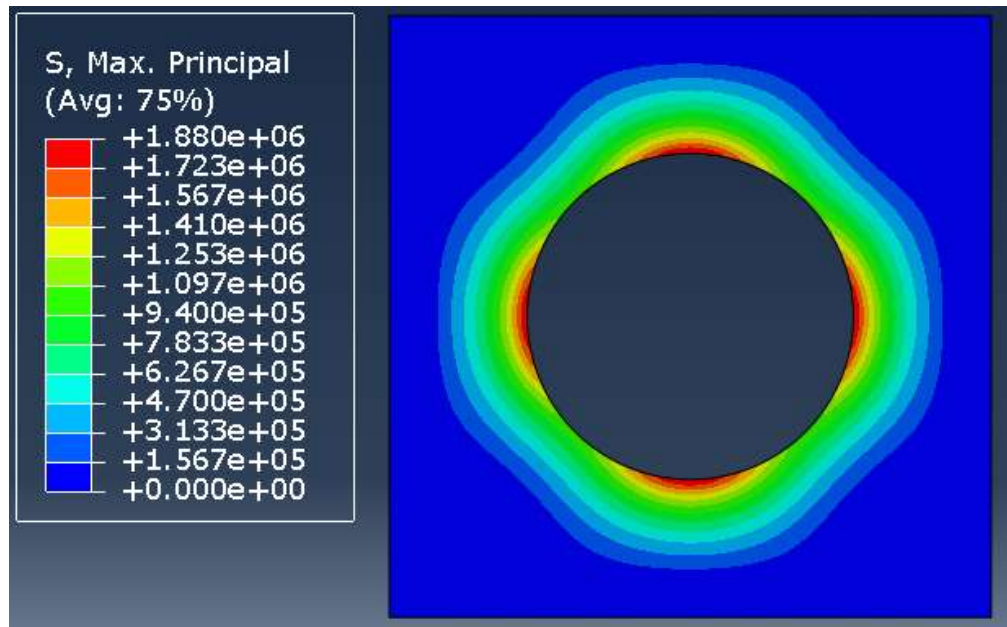
Figura 76. Presión de contacto en tubería para modelo 10



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

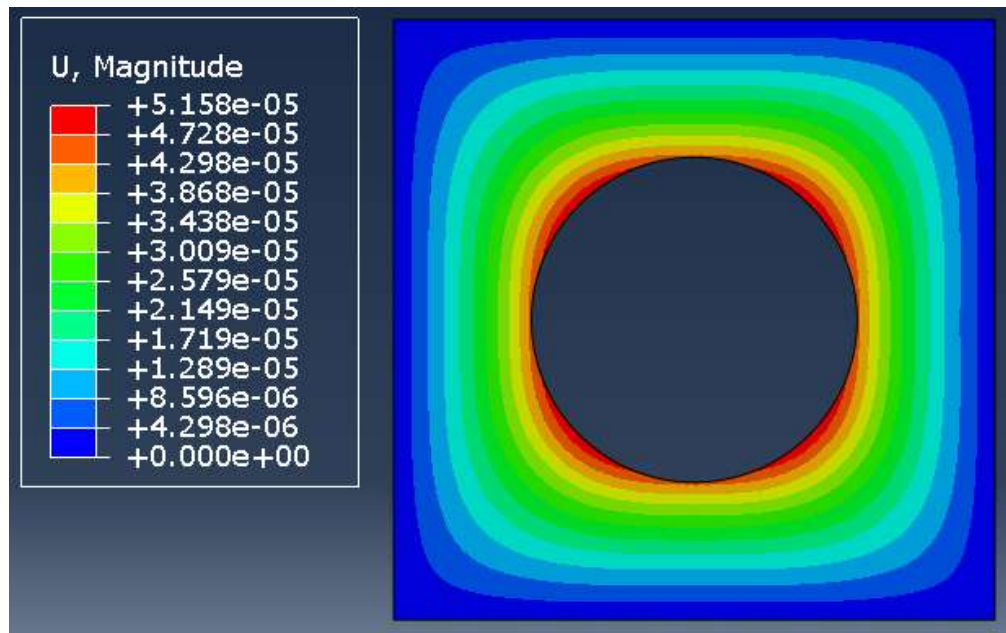
14.11 MODELO 11

Figura 77. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 11



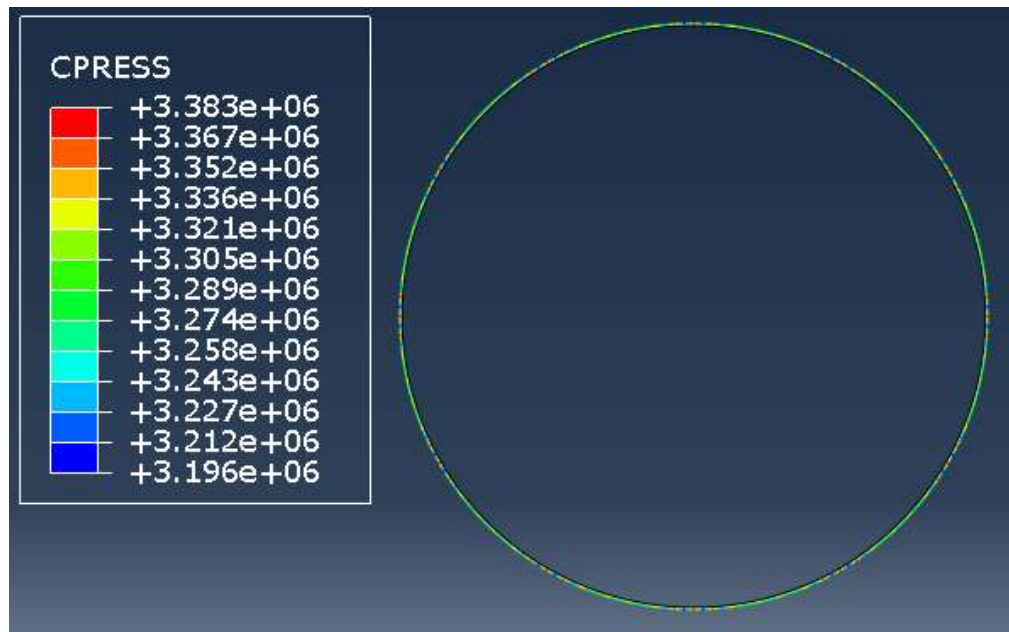
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 78. Deformación en blindaje de concreto para modelo 11



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

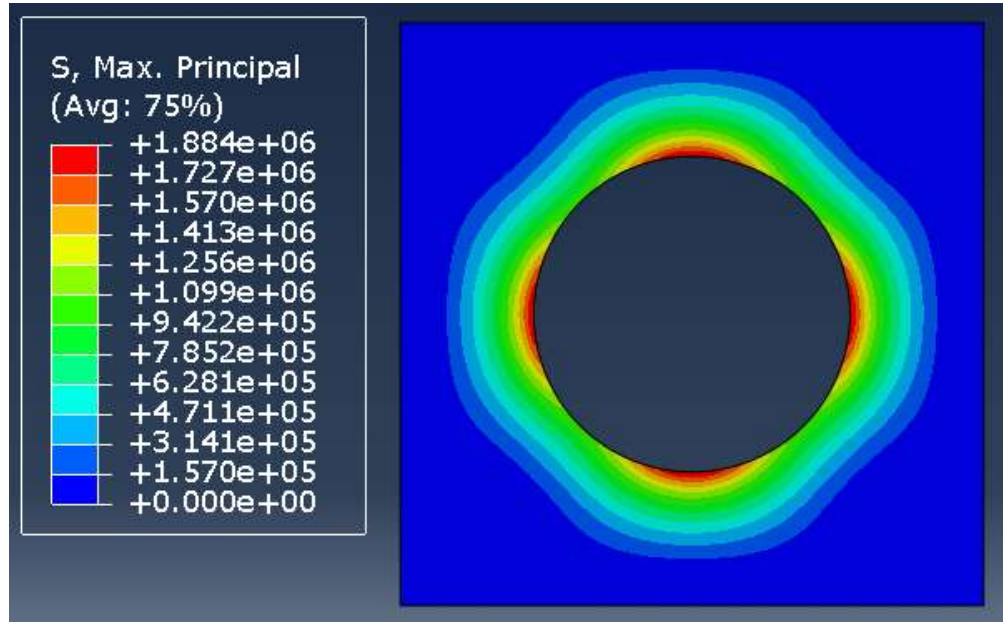
Figura 79. Presión de contacto en tubería para modelo 11



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

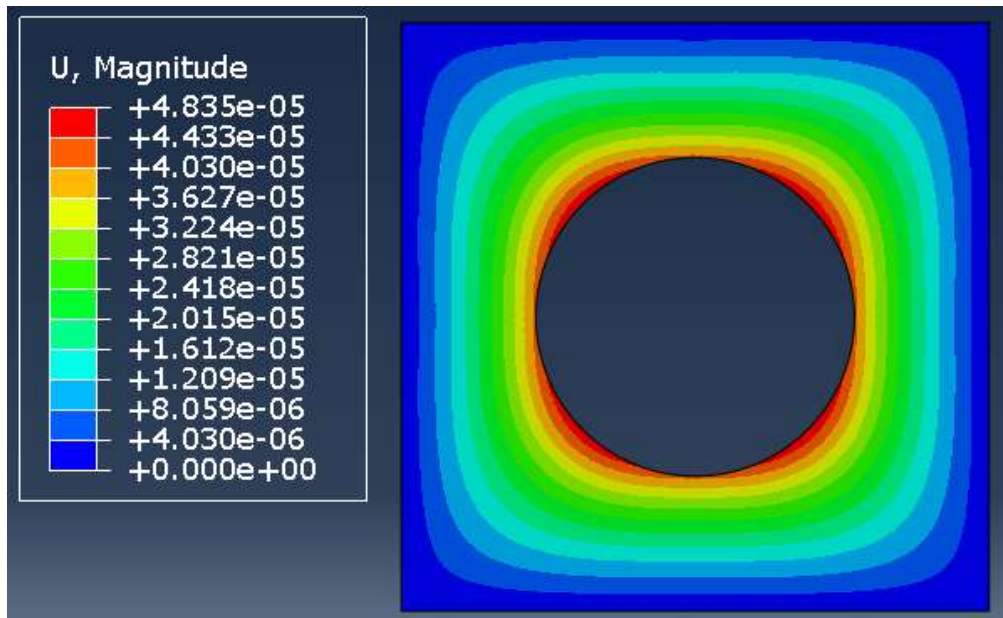
14.12 MODELO 12

Figura 80. Esfuerzos máximos en blindaje de concreto para modelo 12



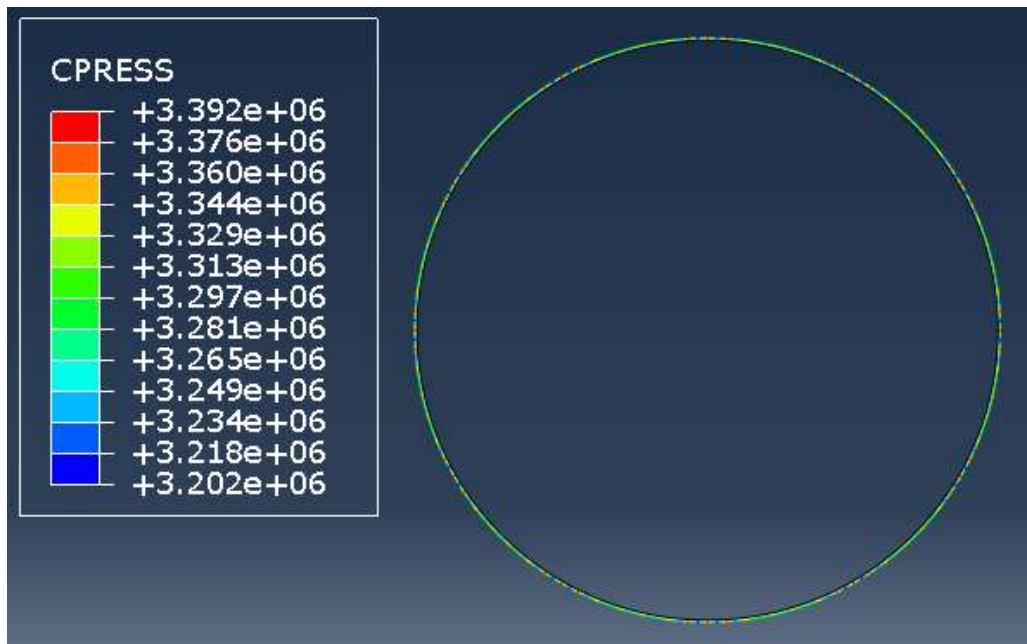
Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 81. Deformación en blindaje de concreto para modelo 12



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

Figura 82. Presión de contacto en tubería para modelo 12



Fuente: Abaqus CAE, Autor.

15 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los modelos analizados en este trabajo presentan comportamientos similares del modelo 1 al 12, por lo cual, su análisis se dará evaluando los valores máximos para cada caso de distribución de esfuerzos, deformaciones y presión de contacto del Título 14, por lo cual a continuación se muestran los resultados obtenidos en cada modelo y procederán a relacionar dichos valores máximos. La información de tablas y graficas se encuentran también relacionadas en el Anexo 3.

15.1 ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS

Se evalúa la distribución de esfuerzo en el concreto, Abaqus ha denominado este esfuerzo como S, Max Principal, este ocurre desde la pared interna del concreto y se extiende de forma axial y lineal alrededor del blindaje en concreto.

El borde la pared exterior no presenta afectaciones de esfuerzos debido a que estos se disipan en un área cercana a la tubería y tampoco presenta distribución de esfuerzos negativos, es decir, a compresión desde parte exterior del blindaje hacia el interior.

Estos modelos no presentan falla por fatiga o rotura al ejecutar con la presión hidrostática máxima dada para cada modelo, por lo cual, es una estructura óptima en cuanto a estabilidad y está en el rango elástico de los concretos.

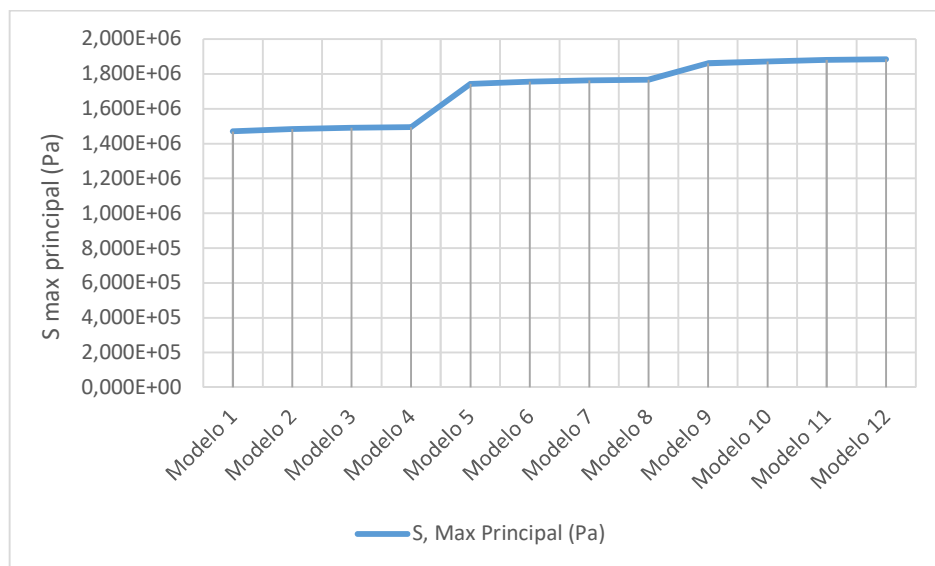
Las interacciones entre el acero y el concreto presentaron esfuerzos similares a en cada grupo de modelos similares, es decir, a los modelos que comparten características similares respecto a diámetro de tubería y presión hidrostática interna, estos permiten analizar el comportamiento de la estructura y evidencian variaciones bajas entre la condición de concreto de menor resistencia (21 MPa) a la de mayor resistencia (40 MPa) estando por debajo de la resistencia mínima a tracción y compresión en todos los casos. Estos datos de esfuerzo máximo se extraen del programa Abaqus mediante la opción de esfuerzos (S) principales (Max. Principal), se han seleccionado en valor mayor de esfuerzo en cada modelo y se evidencia un comportamiento así:

Tabla 11. Relación de Modelos y esfuerzo máximo.

MODELO	S, Max Principal (Pa)
Modelo 1	1,470E+06
Modelo 2	1,483E+06
Modelo 3	1,490E+06
Modelo 4	1,494E+06
Modelo 5	1,743E+06
Modelo 6	1,755E+06
Modelo 7	1,763E+06
Modelo 8	1,767E+06
Modelo 9	1,861E+06
Modelo 10	1,872E+06
Modelo 11	1,880E+06
Modelo 12	1,884E+06

Fuente: Autor

Gráfica 1. Relación de Modelos y esfuerzo máximo



Fuente: Autor.

Se presenta una distribución ascendente de los esfuerzos eso también pasa para cada modelo en el cual el esfuerzo se da de forma axial y el mayor esfuerzo se da en el borde de concreto que esta alrededor de la tubería, donde las fuerzas de presión se distribuyen.

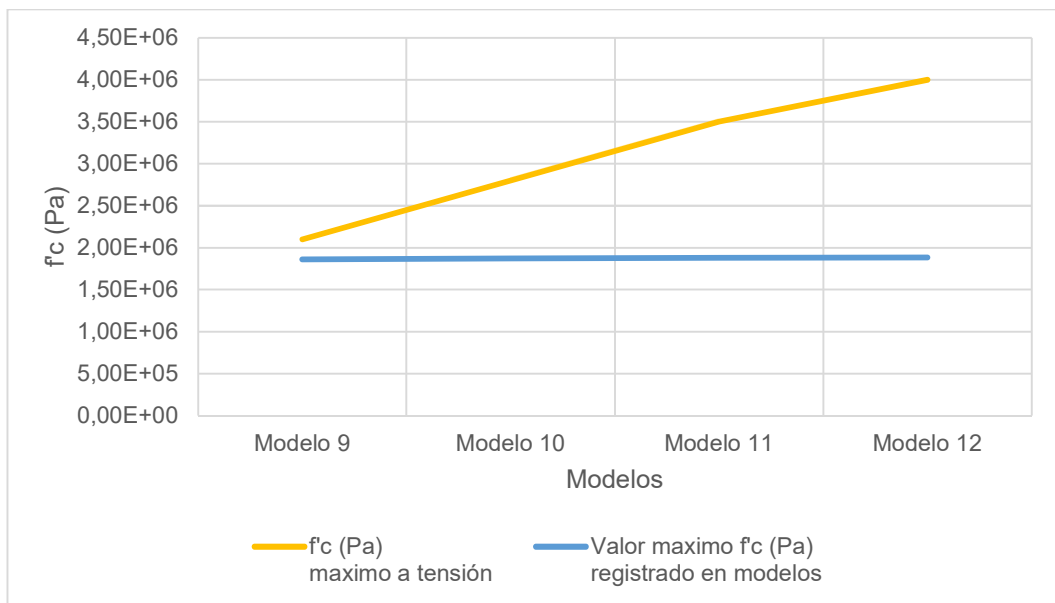
Para los datos obtenidos en las gráficas de distribución de esfuerzos se evidencian valores que no superan el máximo permitido a flexión que es un 10% del f_c utilizado, para los valores de resistencia de concreto son:

Tabla 12. Resistencia máxima a tensión registrada en modelos

f_c (MPa)	f_c (Pa)	f_c (Pa) máximo a tensión	Valor máximo f_c registrado en modelos	Diámetro	Modelo
21	2,10E+07	2,10E+06	1,860E+06	48"	Modelo 9
28	2,80E+07	2,80E+06	1,872E+06	48"	Modelo 10
35	3,50E+07	3,50E+06	1,880E+06	48"	Modelo 11
40	4,00E+07	4,00E+06	1,884E+06	48"	Modelo 12

Fuente: Autor.

Gráfica 2. Relación entre modelo y f_c máximo a tensión



Fuente: Autor.

En la resistencia de distribución de esfuerzos en todos los modelos se comportaron dentro de los valores permitidos por debajo del f_c máximo a tensión y su incremento es bajo entre un modelo y el otro teniendo en cuenta que va de menor resistencia de concreto, menor presión interna, menor diámetro e incrementa a mayor diámetro, mayor resistencia de concreto y mayor presión.

15.2 ANÁLISIS DE DEFORMACIONES

Para el modelo de deformación, se presenta una leve deformación del material alrededor de la pared interna del blindaje en concreto que esta alrededor de la tubería, esto debido a la fuerza que ejerce la presión en los materiales de la estructura, esta deformación se da en milésima de milímetro por lo que será imperceptible y mantendrá su estado estático.

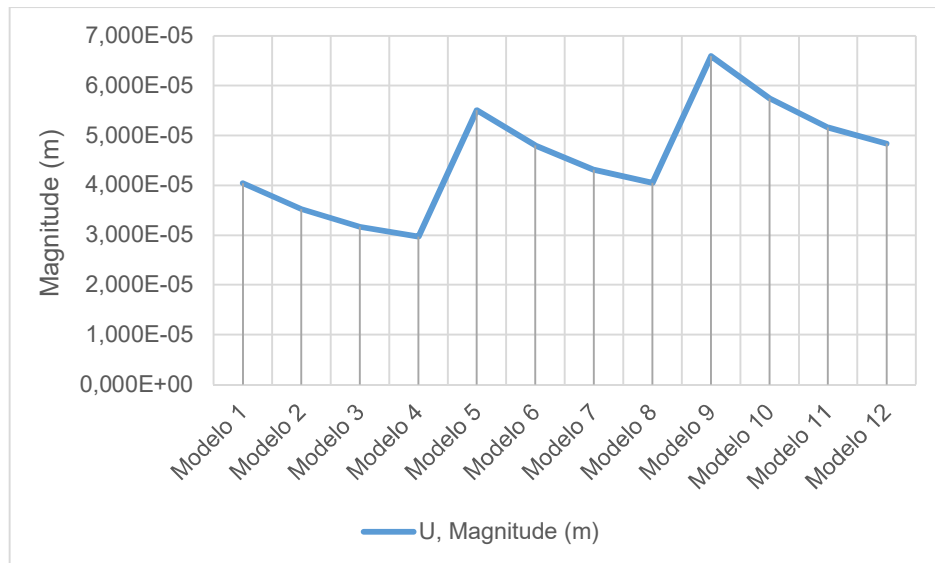
Las deformaciones en los modelos de dan a partir del módulo de visualización U, Magnitud donde se evidencia cuanto a la deformación del concreto que está en contacto con la tubería, para este análisis se seleccionaron los datos mayores de deformaciones como lo muestra la Tabla 13 y la Gráfica 3.

Tabla 13. Relación de modelos y deformación máxima.

MODELO	U, Magnitude (m)
Modelo 1	4,039E-05
Modelo 2	3,523E-05
Modelo 3	3,167E-05
Modelo 4	2,970E-05
Modelo 5	5,503E-05
Modelo 6	4,800E-05
Modelo 7	4,310E-05
Modelo 8	4,047E-05
Modelo 9	6,591E-05
Modelo 10	5,743E-05
Modelo 11	5,158E-05
Modelo 12	4,835E-05

Fuente: Autor.

Gráfica 3. Relación de modelos y deformación máxima



Fuente: Autor.

15.3 ANÁLISIS DE PRESIONES DE CONTACTO

La presión de contacto se da entre la pared externa de la tubería y la estructura de concreto alrededor, esta presión es asumida por el acero de la tubería y se transmiten fuerzas de contacto en diferentes puntos del acero, no presenta una presión considerable ya que como se mencionó en los anteriores análisis de distribución de esfuerzo y deformación, ésta tampoco no sobrepasa los límites elásticos de la estructura.

Para estos modelos no se implementan condiciones de fricción entre acero y concreto, acero y fluido interno, por lo cual no se dan análisis de problemas de hidráulicos asociados a pérdidas de carga por tubería, rapidez de flujo de masa o caudales.

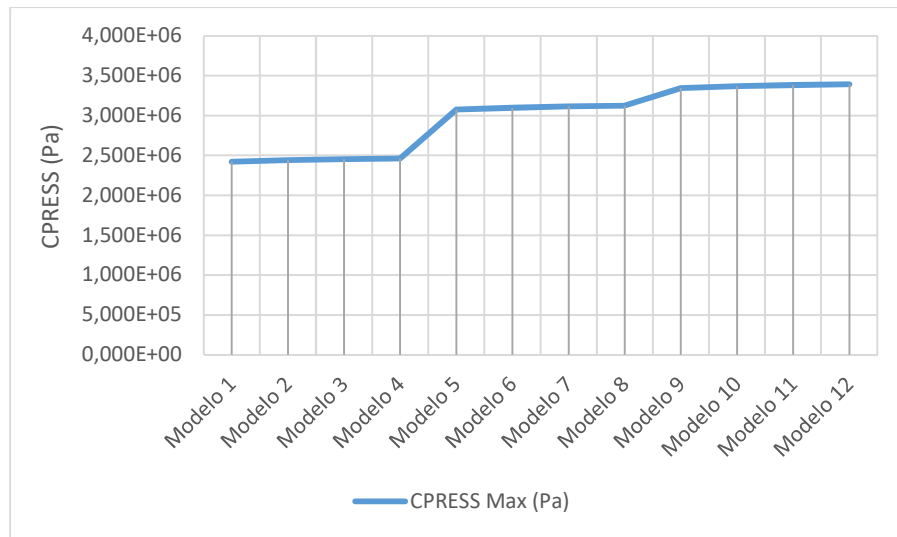
Las presiones de contacto en la tubería se desarrollaron teniendo en cuenta los parámetros de la normal y tangencial proporcionados por el software, a esos se les efectúa unas cargas de contacto alrededor de toda la estructura, se seleccionaron los valores máximos de este contacto y se relacionan en la Tabla 14 y Gráfica 4.

Tabla 14. Relación de modelos y presión de contacto.

MODELO	CPRESS (Pa)
Modelo 1	2,420E+06
Modelo 2	2,440E+06
Modelo 3	2,454E+06
Modelo 4	2,461E+06
Modelo 5	3,074E+06
Modelo 6	3,099E+06
Modelo 7	3,116E+06
Modelo 8	3,126E+06
Modelo 9	3,342E+06
Modelo 10	3,366E+06
Modelo 11	3,383E+06
Modelo 12	3,392E+06

Fuente: Autor.

Gráfica 4. Relación de modelos y presión de contacto.



Fuente: Autor.

16 CONCLUSIONES

- Las calidades de concreto que se están simulando resisten las solicitaciones de presión máxima de la tubería proporcionando a la estructura equilibrio en estado normal sin presentarse acortamiento o alargamiento considerables, tampoco presenta deformaciones a cortante, momento flector o torsor. Según los resultados del capítulo 14.
- Al incrementar la resistencia a la compresión del concreto el esfuerzo máximo desarrollado es mayor según los cálculos de la tabla 10, los análisis del capítulo 15, donde los resultados muestran mayor esfuerzo en el concreto de f_c : 40 MPa en los modelos 4, 8 y 12. Estos con el fin de evaluar comportamiento de esfuerzos iterando diámetros, espesores de tubería y presiones hidrostáticas.
- El incremento de la resistencia del concreto reduce la deformación de la tubería cuando sometida a la presión. Es una respuesta acorde a las características del material los cuales han sido seleccionados en la industria por su comportamiento ante estas solicitaciones.
- Los esfuerzos no varían en gran medida con el cambio considerable en la resistencia del concreto a compresión, teniendo una distribución de esfuerzos máxima (S max.) de 1.473×10^6 Pa con un concreto de 3000 psi y S max: 1.494×10^6 para un concreto de 6000 psi en una tubería de 36" con una presión de 2.52 mca.

Esfuerzos máximos S max: 1.743×10^6 Pa para un concreto de 3000 psi y S max: 1.767×10^6 Pa para un concreto de 6000 psi en una tubería de 42" a una presión de 3.12 mca.

Y los esfuerzos máximos S max: 1.861×10^6 Pa para un concreto de 3000 psi y S max: 1.884×10^6 Pa para un concreto de 6000 psi en una tubería de 48" a una presión de 3.44 mca.

En dichos casos, a mayor resistencia del concreto no afecta los esfuerzos máximos significativamente, como lo muestra el capítulo 15.1.

- En ninguno de los casos el esfuerzo principal máximo supero el esfuerzo admisible de concreto a tensión (2.8 MPa) y compresión (28 MPa) según el análisis de la gráfica 2 en el capítulo 15.1.

- La resistencia a tensión para el caso del concreto, a pesar que éste material no posee muy buenas características en este esfuerzo mecánico, no presenta distribución de esfuerzos hacia las paredes externas del blindaje por lo cual se determina mediante el análisis que la estructura no tendrá posible agrietamiento ante la sollicitación de cargas dadas en el presente trabajo.
- Las deformaciones del capítulo 15.2. son similares en los modelos 1 y 8 con valores de deformación de $1,039 \times 10^{-5}$ m y $1,047 \times 10^{-5}$ m respectivamente, a pesar que estos tienen diferencias de geometría, presión hidrostática y resistencia del concreto, para el caso de 36" con $f'c$ de 28 MPa (Modelo 1) y 48" con $f'c$ de 40 MPa (Modelo 8)w lo cual nos permite inferir que la resistencia del concreto para este caso de estudio no proporciona mayor protección ante la deformación.
- Las deformaciones para todos los modelos no superaron el 50% del espesor de concreto que se utilizó en el recubrimiento como lo indican las figuras de deformaciones del capítulo 14, el cual nos indica que se puede diseñar con un recubrimiento menor previendo únicamente la presión hidrostática como única carga.
- La presión de contacto no varía por el cambio de la resistencia del concreto, pero si varia al cambiar la geometría de la tubería, para este caso el incremento del diámetro genera una mayor presión de contacto al concreto, como lo muestra el análisis del capítulo 15.3. en su grafica 4 donde la presión más alta se presenta en la tubería de 48" de los modelos 9 al 12.
- Los esfuerzos máximos se generan en cercanías a la tubería mientras que los esfuerzos se disipan hacia los extremos del anclaje. Este puede servir como criterio para el dimensionamiento de los anclajes, ya que pueden ser menores a los planteados en la Tabla 8 y 9.
- La distribución de los esfuerzos según el tipo de enmallado seleccionado en el capítulo 13.4.3. da resultados simétricos y lineales, permitiendo una correcta ejecución y análisis de los datos provenientes de los modelos 1 a 12 de los resultados del capítulo 14.
- Esta tesis puede dirigirse a personas que estén interesadas en conocer la distribución de los esfuerzos, distribución de presiones de contacto entre las tuberías de acero embebidas en concreto que fueron analizados por medio del software Abaqus, el cual responde a las necesidades laborales de la actualidad.

- La tesis también se dirige a aquellas personas que están interesadas en conocer más sobre el tema de elementos finitos, modelamiento y análisis; esta investigación puede servir como punto de referencia para futuros modelos desarrollados en el software Abaqus el cual es primera vez que se desarrolla en una línea investigativa de trabajos de grado de pregrado en la universidad.

17 RECOMENDACIONES

- El presente trabajo tiene relevancia en el desarrollo de ingeniería ya que permite una alternativa metodológica racional para el análisis adecuado de este tipo de estructuras el cual puede ser aplicado en la industria que trabajen estas estructuras.
- Este trabajo es información que puede servir de entrada para otras líneas de investigación relacionadas con el análisis por elementos finitos y resistencia de materiales las cuales puedan ser implementadas en futuros trabajos de grado.
- La simulación del concreto en esta tesis se tomó como un material elástico e isotrópico, como el concreto es un material poroso, frágil se deben realizar consideraciones adicionales para mejorar el modelo del material del concreto.
- Los bloques de anclaje de tubería generalmente son realizados con refuerzo en acero, estos refuerzos también pueden ser considerados en próximas simulaciones.
- El diseño de anclajes no se realiza únicamente teniendo en cuenta la presión interna de la tubería, deben considerarse cargas adicionales como: las cargas axiales, los efectos de temperatura, los efectos de juntas de expansión y otros, para el correcto dimensionamiento de los anclajes.
- Se debe tener en cuenta que en el fraguado del concreto se produzca un espacio entre la tubería y el blindaje, en futuras simulaciones sería oportuno evaluar cuanto se contrae el concreto y cómo será su interacción con la tubería.
- Para próximos análisis se propone el estudio en una sección del blindaje donde se de la unión por soldadura de la tubería para analizar los efectos de las cargas en esta sección.
- Se utilizó una definición de contacto simple sin fricción entre el blindaje de concreto y la tubería, también un contacto normal simple; para futuras simulaciones se puede considerar una definición de contacto más específica.
- Para próximos modelos de análisis de estudio se propone realizar un modelo en 3D de un tramo de blindaje considerando condiciones de frontera, cargas e interacciones que apliquen en situaciones de la vida real asociando el modelo a datos de aplicaciones en proyectos actuales.

- Los análisis de estructuras por medio de elementos finitos son alternativas de diseño que aporta confiabilidad y precisión en los resultados permitiendo soluciones de ingeniería acordes con las necesidades de la actualidad, por eso se recomienda continuar con el desarrollo del software Abaqus, un programa muy completo con el cual se puede realizar cualquier tipo de estructura de ingeniería.
- En la universidad para trabajos de grado no se han desarrollado tesis con un software como Abaqus, por lo cual este trabajo aporta investigación relevante para futuros trabajos de grado similares; en éste trabajo se puede aportar conocimientos de investigación, manejo del programa, análisis y extracción de datos.

18 BIBLIOGRAFÍA

- 4REALISM. General Contact Vs Contact Pairs En Abaqus Standard. [En línea]. 2019. Disponible en: <https://www.4realsim.com/es/general-contact-contact-pair-abaqus>
- ALGECIRAS, Sede D E. Horarios Curso 2012/ 2013. 2013, p 19–21.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. AWWA C-200 EE UU: American Water Works Association. 1997.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Steel Pipe - Design and Installation. 2017.
- AOKI, ken-ichiro, y MINAMI Masayuki. Construction of Steel Penstocks Using HT100 at Kannagawa Hydropower Plant.Pdf. Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants. 2004, p 1–8.
- ARRIETA ARRIETA, Mikel. Proyecto Presa de Castrovido. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2012.
- ASCE. Steel Penstocks New York: American Society of Civil Engineers. 1993.
- BENSON, R P. Design of Unlined and Lines Pressure Tunnels. Tunneling and Underground Space Technology, 1989, p 1–4.
- CALDERÓN, Wilson Rodríguez, and PALLARES MUÑOZ, Myriam Rocío, Modelo Numérico Del Golpe de Ariete Con Scilab. Ingeniería e Investigación. [En línea]. 2007. p 98–105. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092007000300011&lang=pt
- CELIGÜETA LIZARZA, Juan Tomás. Método de Los Elementos Finitos Para El Análisis Estructural. Madrid: UNICOPIA C.B., 2008.
- CERVANTES, José Francisco. Ensayos de Hidrogateo En La Determinación de La Longitud Del Blindaje de Un Túnel a Presión Con Baja Cobertura. Portal de Revistas Académicas 1994. p 1.
- CONTAIN, S.A., TUBO DE ACERO SIN SOLDADURA TUBO DE ACERO SIN SOLDADURA. p 5–43.

COTACALLAPA LOPEZ, Carmen. Tipos de tubería. Lima. Monografía para el curso de abastecimiento de agua y alcantarillado (Ingeniero civil). Universidad privada Telesup. Facultad de ingeniería. 2014, p 39.

DASSAULT SISTEMES, ABAQUS UNIFIED FEA. [En línea]. 2009 Disponible en: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/multiphysics/coupled-eulerian-lagrangian/>

GARCIA DIAZ, Rafael. Manual de fórmulas de ingeniería. Ciudad de México: limusa, 2005. 121p.

GARCIA DIAZ, Rafael. Manual de fórmulas de ingeniería. Ciudad de México: limusa, 2005. 121p

GARCIA GARINO, Carlos, y LOPÉZ TRIACA, Rubén. Análisis de Tuberías Blindadas Sometidas a Presión Exterior Bajo Condiciones de Vínculo Unilateral. IMPSA. 1993.

GARCIA VALDEOLIVAS, José Luis. Comportamiento Estructural De Tuberías Forzadas Y Blindajes En Saltos Hidroeléctricos. Propuestas De Diseño Y Cálculo. Universidad Politécnica de Madrid. 2013.

GUILLEN MARTINEZ, Juan Francisco Concepto de esfuerzo: [En línea]. 28 Abril de 2019 Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/79610753/CONCEPTO-DE-ESFUERZO>.

GUINEA TORTUERO, Gustavo Víctor. Medida de La Energía de Fractura Del Hormigón. [En línea] .1990, p 1–361. Disponible en: <http://oa.upm.es/983>

GUZMÁN SÁNCHEZ, Diego. Tecnología Del Concreto y Del Mortero Bogotá D.C.: Biblioteca de la construcción. 2001.

INTRINSYS. Introduction to Contact Analysis US: Youtube. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=6l0aKFo0i4Y>

JULIO, I N G, y Cesar MOLINA. Análisis Estructural Con Elementos Finitos (México: Universidad Autónoma de Nuevo León. [En línea]. 1992. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/1926/1/1020070633.PDF>

KELLER, Inyecciones de Galerías y Cavernas Subterráneas. [En línea]. 2019 Disponible en: <https://www.keller-cimentaciones.com/tratamientos-en-presas/inyecciones-galerias-cavernas-subterraneas/>

LIU, M B, and G R; LIU, Smoothed Particle Hydrodynamics a Meshfree Particle Method. Singapore: World Scientific Publishing Co. 2003.

LÓPEZ LANCHEROS, Pedro Augusto. Simulación Numérica de Vigas En Concreto Reforzado Con Barras Longitudinales, Transversales y Fibras Cortas de Acero Mediante El Método de Los Elementos Finitos. Universidad Nacional de Colombia. 2012.

LÓPEZ VILLAYZÁN, Silvia Lorena. Diseño Hidráulico de Tubería Forzada de La Central Hidroeléctrica de Yuracyacu. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2014.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, NSR-10 Norma Sismo Resistente Colombiana, Segunda. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS. 2010

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. NSR-10 Norma Sismo Resistente Colombiana, Segunda ac. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS. 2010.

MOBLEY, R Keith, y WIKOFF, Darrin J, Maintenance Engineering Handbook 7th Edition. New York: McGraw-Hill Education. 2008.

OXFORD UNIVERSITY PRESS. Diccionario Oxford –Complutense, Física. Segunda edición. Madrid. COMPLUTENSE, 2007

PALMSTROM, Arild. Norwegian Design and Construction Experiences of Unlined Pressure Shafts and Tunnels, Design. 1987.

PINILLA ESTUPIÑAN, Diego Simón. Modelación Numérica de Túneles Profundos. Universidad de los Andes. 2016.

POZOS-ESTRADA, O., FUENTES A., SÁNCHEZ, RODAL, E. A., y DE LUNA, F. Análisis de Los Efectos Del Aire Atrapado En Transitorios Hidráulicos En Acueductos a Bombeo', Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Calculo y Diseño En Ingeniería. [En línea]. 2017. p 79–89. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.11.002>

PRIETO RUIZ y GARZON VARGAS, José Esteban y Cristian Felipe. Análisis numérico por el método de elementos finitos de una conexión de un perfil de alma llena embebido en un elemento de concreto. Bogotá, 2018, 89p. (Trabajo De Grado

Para Optar al Título De Ingenieros Civiles). Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería.

RED, DIRECCIÓN, EMPRESA D E ACUEDUCTO, AND ALCANTARILLADO Y ASEO D E BOGOTÁ, ALCANTARILLADO EAB – ESP. 2017. p 1–36

REDDY, J N. Introduction to the Finite Element Method, Third Edition. New York: McGraw-Hill Education. 2006

RODRIGUEZ VELAZCO, Lucas. Estudio de La Presión Exterior Critica de Pandeo En Blindajes de Aceros Confinados. [En línea]. UPM. 2013. Disponible en: http://oa.upm.es/21370/1/Tesis_master_Lucas_Rodriguez_Velasco.pdf

ROLLERI, José. L. ¿Qué son los modelos físicos? En: Valenciana. No 11 (Ene-jun.2013); p. 271-288.

STRUCTURES, EUROPEAN COMMITE FOR BOILERMAKING AND KINDRED STEEL. Recomendations for Design, Manufacture and Erection of Steel Penstocks of Welded Construction for Hydro Electric Installations. United Kingdom: Janvier. 1979.

TORAL SANTANDER, José Ramón. Pandeo de Blindajes de Galerías Forzadas y Tuberías Embebidas En Presas de Hormigón. [En línea]. 2011, p 515–24 Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1965/1965_tomol_3002_06.pdf

UNIÓN DE EMPRESAS SIDERÚRGICAS. Que es el acero [en línea]. Madrid: La Empresa [citado 18 noviembre, 2017]. Disponible en <https://unesid.org/siderurgia-que-es-el-acero.php>

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION, Welded Steel Penstocks. Ed. by U.S. Government Printing Office. Washinton. 1977.

UZCÁTEGUI FLORÉS, Maylett.Y. ABAQUS Programa de Elementos Finitos. [En línea]. 2005. p 1–10. Disponible en: <https://doi.org/Venezuela>

VALLEJO URIBE, Maritza, VALENCIA CLEMENT, Gabriel F. Calificación de Una Conexión Rígida de Una Viga I y Una Columna Tubular Rellena de Concreto Bajo La Acción de Cargas Dinámicas. 2009. p 24–34.

VARGAS BENDECK, Andrés Alejandro. OLEODUCTOS ENTERRADAS EN SUELO. Universidad de los Andes. 2006.

ZIENKIEWICZ, Olgierd Ceci. El Método de Los Elementos Finitos. Vol 1.Pdf
Barcelona: Reverté S.A., 1992.

ANEXO 1

CALCULOS

ANEXO 2

MODELOS

ANEXO 3
ANALISIS DE RESULTADOS

Firma Estudiante

Nombre Estudiante: Andrés Eduardo Abril Ronderos

Codigo: 505713

Firma Asesor del Trabajo de Grado

Nombre: Marisol Nemocón

FECHA

(19/JUN/2019)