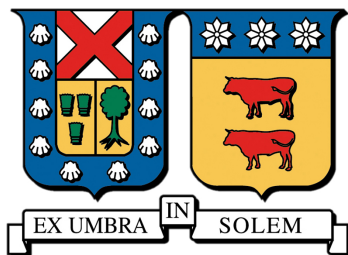


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS DEL
COMPORTAMIENTO DEL CAUCHO
RECICLADO SOMETIDO A IMPACTOS**

NICOLÁS IGNACIO VALDIVIA MORA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: ING. RAFAEL MENA YANSSEN
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. PEDRO SARIEGO PASTEN

JUNIO - 2021

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la
Institución

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, por sus enseñanzas, cariño y compañía, siempre enseñándome el lado positivo de la vida y a luchar por mis sueños.

Le quiero dar las gracias a Camila, por ser mi compañera de aventuras y de sonrisas, y por siempre darme ánimos cuando más lo necesitaba.

Quiero agradecer también a mis profesores, amigos y a la selección de natación, por estos años que estuvieron llenos de felicidad y de aprendizaje. Espero que este conocimiento sirva para poder impulsar mis sueños.

Por último, quiero agradecer a mi gatito Zizou, por el cariño y por acompañarme mientras trabajaba en esta tesis, fuiste realmente un regalo de Dios.

Dedicatoria

Dedicado con todo mi amor y cariño a mi Abuelita Violeta y a mi gatito Kyo, su amor
vivirá siempre en mis recuerdos.

*“Y de allí soy, de aquel
Parral de tierra temblorosa,
tierra cargada de uvas
que nacieron
desde mi madre muerta”*

Pablo Neruda

Resumen

En este trabajo de título se realiza un análisis y simulación mediante elementos finitos del comportamiento del caucho reciclado sometido a impactos, con el fin de promover el reciclaje de este material, dándole así nuevos usos, como por ejemplo: piso de gimnasios, piso de talleres industriales, parques para niños, entre otros. Esto, debido a sus propiedades mecánicas como material hiperelástico.

El modelo analizado es una modificación de la norma ACI 544 (Prueba de impacto con caída de peso), esta modificación fue realizada con el fin de simplificar la simulación en ANSYS, consistiendo en ubicar caucho reciclado sobre un testigo de hormigón y cambiando la energía potencial del martillo a cinética en la bola de acero. La metodología del presente trabajo considera el uso del software de elementos finitos ANSYS, para realizar un análisis explícito del caucho reciclado sometido a impactos, modelado como un material de Mooney-Rivlin de dos variables, además de la utilización de la norma ACI (Instituto Americano del Concreto) como guía para establecer el modelo.

En base a los resultados, se concluye que utilizar caucho reciclado disminuye significativamente el impacto que recibe el hormigón, estos se pueden modelar como una curva de decaimiento exponencial. Además, se determina que el impacto varía con la dureza y el espesor del caucho reciclado, disminuyendo cuando se aumenta el espesor y cuando se disminuye la dureza.

Palabras claves: Impacto, caucho, reciclaje, hiperelástico, Mooney-Rivlin, elementos finitos, análisis explícito, ANSYS, ACI.

Abstract

In this title work, an analysis and simulation are carried out using finite elements of the behavior of recycled rubber subjected to impacts, in order to promote the recycling of this material, thus giving it new uses, such as: gym floors, workshop floors, playgrounds, among others. This, due to its mechanical properties as a hyperelastic material.

The analyzed model is a modification of the ACI 544 standard (Impact test with weight drop), this modification was made in order to simplify the simulation in ANSYS, consisting of placing recycled rubber on a concrete core and changing the potential energy from the hammer to kinetics on the steel ball. The methodology of this work considers the use of the finite element software ANSYS, to carry out an explicit analysis of the recycled rubber subjected to impacts, modeled as a Mooney-Rivlin material with two variables, in addition to the use of the ACI standard (American Institute of Concrete) as a guide to establish the model.

Based on the results, it is concluded that using recycled rubber significantly reduces the impact received by the concrete, these can be modeled as an exponential decay curve. In addition, it is determined that the impact varies with the hardness and thickness of the recycled rubber, decreasing when the thickness is increased and when the hardness is decreased.

Keywords: Impact, rubber, recycling, hyperelastic, Mooney-Rivlin, finite elements, explicit analysis, ANSYS, ACI.

Glosario

- PIB: Producto interno bruto.
- NFU: Neumático fuera de uso.
- GCR: Grano de caucho reciclado.
- Ley REP: Ley de responsabilidad extendida del productor.
- MEF: Método de elementos finitos.
- Elementos finitos: Serie de elementos que están conectados por un número discreto de puntos nodales.
- Esfuerzo: intensidad de una fuerza aplicada sobre un determinado área.
- ACI: Instituto Americano del concreto.
- ANSYS: Software comercial para el análisis con elementos finitos.
- Ensayo de materiales: Pruebas para determinar las propiedades mecánicas de un material.

Índice General

Introducción	1
Objetivos	3
Objetivos generales	3
Objetivos específicos	3
1. Antecedentes	4
1.1. Residuos en el mundo	4
1.1.1. Generación de residuos	4
1.1.2. Recolección y tratamiento de residuos	6
1.2. Residuos en Chile	8
1.2.1. Generación de residuos	8
1.2.2. Recolección y tratamiento de residuos	10
1.2.3. Ley REP	13
2. Antecedentes complementarios y conceptuales	15
2.1. Caucho reciclado	15
2.1.1. Hiperelasticidad	16
2.2. Proceso de reciclaje	17
2.2.1. Procesos físicos	17
2.2.2. Procesos térmicos	18
2.3. Método de elementos finitos	18

2.3.1.	Anslys Explicit Dynamics	20
2.3.2.	Como crear un proyecto en Ansys Explicit Dynamics	21
2.3.3.	Calidad del mallado	26
2.3.4.	Número de Courant-Friedrichs-Levy	27
2.3.5.	Modelo de Mooney-Rivlin	28
2.3.6.	Teoría del esfuerzo máximo	30
3.	Metodología de trabajo	31
3.1.	Modelo a estudiar	31
3.1.1.	ACI 544	31
3.1.2.	Modificación ACI 544	32
3.2.	Modelación por Ansys	33
3.2.1.	Parámetros del material	34
3.2.2.	Malla	37
3.2.3.	Condiciones Iniciales	40
3.2.4.	Propiedades del análisis	41
3.2.5.	Parámetros requeridos del análisis	45
4.	Resultados y análisis	46
4.1.	Resultados de las simulaciones	46
4.2.	Gráficas de los resultados	47
4.2.1.	Gráficas considerando el testigo de hormigón recubierto	48
4.2.2.	Gráficas sin considerar el hormigón descubierto	49
4.3.	Análisis de los resultados	51
	Conclusiones	53
	Referencias	55
	Anexos	58
A.	Resultados de la Deformación Máxima	58

B.	Resultados de la Deformación Máxima Principal	63
C.	Resultados del Esfuerzo Máximo Principal	68

Índice de Figuras

1. Piso de caucho reciclado utilizado en plaza para niños y gimnasio. [2] [3] . . .	2
1.1. Proyección de los residuos generados en el mundo.	4
1.2. Proyección de los residuos generados en el mundo, según nivel de ingresos del país.	5
1.3. Composición de los residuos, según el nivel de ingresos del país.	5
1.4. Generación de residuos industriales y electrónicos, según ingresos del país. .	6
1.5. Recolección de residuos, según el nivel de ingresos.	7
1.6. Tratamiento de residuos, según el nivel de ingresos.	7
1.7. Generación por persona de residuos sólidos por región.	8
1.8. Generación de residuos sólidos por región.	9
1.9. Generación de residuos según origen y clasificación industrial.	9
1.10. Basural en la ruta U-55, Osorno. [5]	10
1.11. Ex Vertedero Santa Marta, actualmente transformado en relleno sanitario, Santiago. [6]	11
1.12. Relleno sanitario Hidronor, Copiulemu. [7]	11
1.13. Recolección y tratamiento de los residuos por región	12
1.14. Basura en Chiloé amenaza con contaminar las aguas subterráneas. [8]	12
1.15. Disposición de los residuos sólidos en Chile	13
1.16. Funcionamiento de la Ley Rep. [9]	14
2.1. Grano de caucho reciclado	15
2.2. Diagrama de esfuerzo-deformación para un material hiperelástico	16

2.3. Proceso de reciclaje de neumáticos [13]	17
2.4. Proceso de discretización	19
2.5. Ejemplo de un impacto analizado con “ANSYS explicit dynamics”. [14]	20
2.6. Ejemplo de la utilización de métodos implícitos y explícitos. [15]	20
2.7. Tipo de análisis. [14]	21
2.8. Biblioteca de materiales predefinidos ANSYS. [14]	21
2.9. Importación de geometría	22
2.10. Edición modelo. [14]	22
2.11. Asignación de material a las partes de la geometría. [14]	23
2.12. Asignación del tipo de interacción entre los cuerpos. [14]	23
2.13. Generación de la malla. [14]	24
2.14. Condiciones Iniciales. [14]	24
2.15. Configuración de análisis. [14]	25
2.16. Ingreso de resultados requeridos. [14]	25
2.17. Ejemplo de convergencia de una malla. [18]	27
2.18. Ejemplo del número de Courant	28
3.1. Plano Norma ACI 544	32
3.2. Plano del modelo a analizar	33
3.3. Modulo “Explicit Dynamics”.	33
3.4. Parámetros predefinidos por ANSYS, para un acero estructural no lineal.	34
3.5. Parámetros predefinidos por ANSYS, para el concreto no lineal.	34
3.6. Parámetros en ANSYS para el caucho reciclado de dureza 55 Shore-A (Mooney- Rivlin de dos variables).	36
3.7. Parámetros en ANSYS para el caucho reciclado de dureza 60 Shore-A (Mooney- Rivlin de dos variables).	36
3.8. Parámetros en ANSYS para el caucho reciclado de dureza 65 Shore-A (Mooney- Rivlin de dos variables).	36

3.9. Parámetros en ANSYS para el caucho reciclado de dureza 70 Shore-A (Mooney-Rivlin de dos variables).	37
3.10. Convergencia de la malla, geometría con caucho de 0,5 pulgadas.	37
3.11. Malla de 8 mm utilizada en la simulación, geometría con caucho de 0,5 pulgadas.	38
3.12. Malla de 8 mm utilizada en la simulación, geometría con caucho de 1,0 pulgadas.	38
3.13. Malla de 8 mm utilizada en la simulación, geometría con caucho de 1,5 pulgadas.	39
3.14. Malla de 8 mm utilizada en la simulación, geometría sin caucho reciclado. . .	39
3.15. Velocidad ingresada a ANSYS de la bola de acero antes del impacto.	40
3.16. Fijación en ANSYS de la cara inferior del hormigón.	41
3.17. Propiedades del análisis, geometría con caucho reciclado de 0,5 [inch].	43
3.18. Propiedades del análisis, geometría con caucho reciclado de 1,0 [inch].	43
3.19. Propiedades del análisis, geometría con caucho reciclado de 1,5 [inch].	44
3.20. Propiedades del análisis, geometría sin caucho reciclado.	44
3.21. Soluciones requeridas del análisis en ANSYS.	45
4.1. Gráfica comparativa de esfuerzo máximo principal contra espesor de caucho reciclado, considerando el hormigón al descubierto.	48
4.2. Gráfica comparativa de deformación máxima principal contra espesor de caucho reciclado, considerando el hormigón al descubierto.	49
4.3. Gráfica comparativa de deformación máxima principal contra espesor de caucho reciclado, considerando el hormigón al descubierto.	49
4.4. Gráfica comparativa de esfuerzo máximo principal contra espesor de caucho reciclado, sin considerar el hormigón al descubierto.	50
4.5. Gráfica comparativa de deformación máxima principal contra espesor de caucho reciclado, sin considerar el hormigón al descubierto.	50

4.6. Gráfica comparativa de deformación máxima contra espesor de caucho reciclado, sin considerar el hormigón al descubierto.	51
4.7. Ejemplo del impacto de la bola acero sobre el testigo de hormigón recubierto con caucho reciclado.	52
4.8. Ejemplo del impacto de la bola acero sobre el testigo de hormigón descubierto.	52

Índice de Tablas

3.1. Parámetros del modelo de Mooney-Rivlin de dos variables para el Caucho cercano a la incompresibilidad. [21]	35
3.2. Relación entre la energía potencial y cinética, para el cálculo de la velocidad de la bola de acero antes del impacto.	40
3.3. Velocidad de propagación de una onda mecánica longitudinal, para cada material utilizado.	41
3.4. Máximo tiempo entre iteración, para cada material utilizado, con una malla de 8 [mm].	42
3.5. Tiempo de análisis del impacto, para cada geometría analizada.	42
4.1. Resultados de las simulaciones.	47
4.2. Disminución en porcentaje de los resultados al utilizar caucho reciclado. . . .	47

Introducción

Hoy en día se vive en un mundo industrializado, que si bien ha traído muchos beneficios también ha repercutido negativamente en el planeta. Es por esto, que tanto las personas como empresas han comenzado a tomar conciencia del problema y están haciendo esfuerzos para buscar un desarrollo sostenible, que no afecte a las futuras generaciones. Es importante añadir, que en el último tiempo se han creado nuevas leyes que fomentan la protección del medio ambiente, presentado un desafío para las industrias que han tenido que renovarse y buscar ser más sustentables.

Recientemente, en Chile se promulgó la Ley de responsabilidad extendida del productor (Ley REP), que busca establecer una industria responsable de sus productos.

Los neumáticos, están elaborados de caucho, material que no es biodegradable, siendo estos considerados dentro de la lista de productos prioritarios de la Ley REP, obligando a sus productores a preocuparse de los residuos cuando terminen su vida útil. En este trabajo de título se espera promover la utilización del caucho reciclado, para que este no afecte al medio ambiente.



Figura 1: Piso de caucho reciclado utilizado en plaza para niños y gimnasio. [2] [3]

Además, en este trabajo se realiza un análisis explícito mediante elementos finitos, para determinar las propiedades mecánicas del caucho reciclado cuando es sometido a impactos. El modelo estudiado es una modificación de la norma ACI 544, que es una prueba de impacto con caída de peso. Este análisis se realiza por medio del software de elementos finitos ANSYS, para poder determinar el comportamiento que presenta el caucho reciclado sin la necesidad de realizar pruebas reales, siendo modelado como un material de Mooney-Rivlin de dos variables.

Como producto de este trabajo se espera determinar los esfuerzos máximos y la deformación máxima en un testigo de concreto ubicado por debajo del caucho reciclado, siendo estos resultados comparados con los del material al descubierto.

Objetivos

Objetivos generales

Realizar un estudio del caucho reciclado, que permita conocer el comportamiento de éste cuando es sometido a impactos, utilizando la metodología de análisis de elementos finitos, en términos de los parámetros del material.

Objetivos específicos

- Realizar un análisis de los residuos sólidos generados en el mundo y en Chile
- Investigar los procesos asociados al reciclaje de neumáticos en el marco de la Ley REP
- Modelar el comportamiento del material desde sus características
- Analizar y comparar los resultados obtenidos con lo informado para materiales existentes
- Generar conclusiones

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Residuos en el mundo

1.1.1. Generación de residuos

Actualmente el mundo genera aproximadamente 2.01 billones de toneladas de residuos sólidos, y se espera que éstos incrementen a 3.4 billones de toneladas para el 2050, lo cual se puede observar en la figura 1.1, donde se muestra el comportamiento asociado a la proyección de los residuos generados en el mundo.

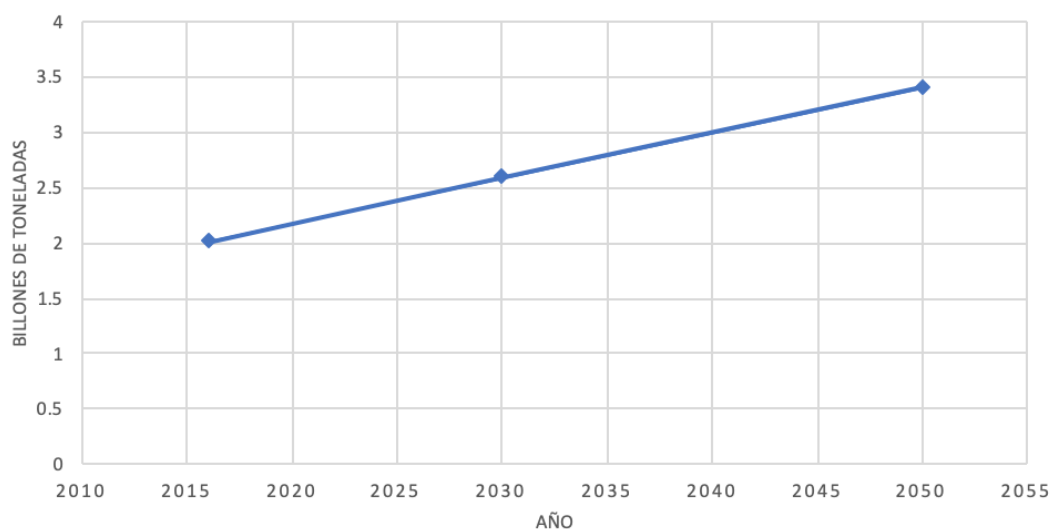


Figura 1.1: Proyección de los residuos generados en el mundo.

Actualmente como se aprecia en la figura 1.2 los países con mayores ingresos son los que tienen una mayor cantidad de residuos, pero se espera que dichos residuos no aumenten tanto en comparación a los países con menores ingresos. Esto se debe a que estos países alcanzaron un nivel económico en donde el consumo de materiales está menos relacionado al producto interno bruto del país.

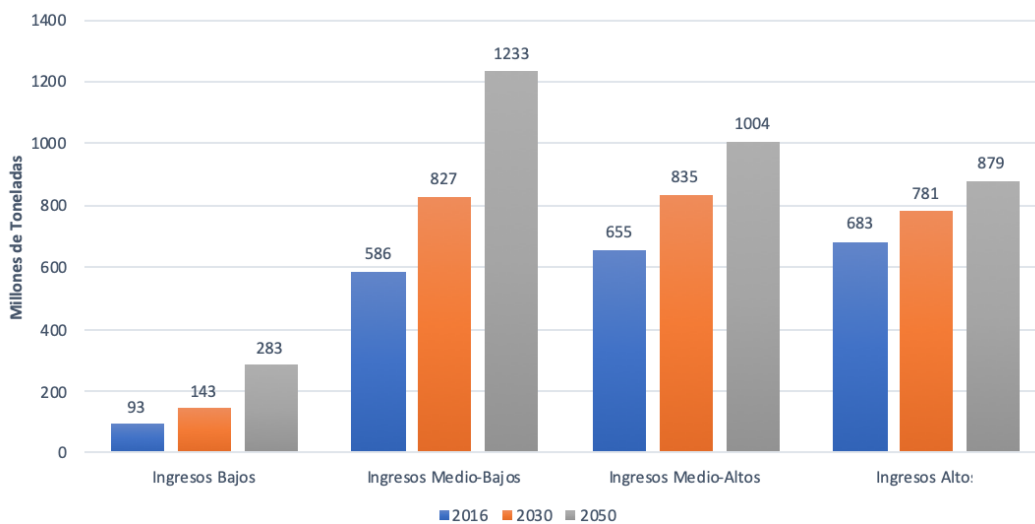


Figura 1.2: Proyección de los residuos generados en el mundo, según nivel de ingresos del país.

Este aumento en los residuos hace necesario mejorar los actuales modelos de gestión y adaptarlos a los nuevos requerimientos que serán necesarios, reduciendo así el impacto económico y ambiental que éstos generan.

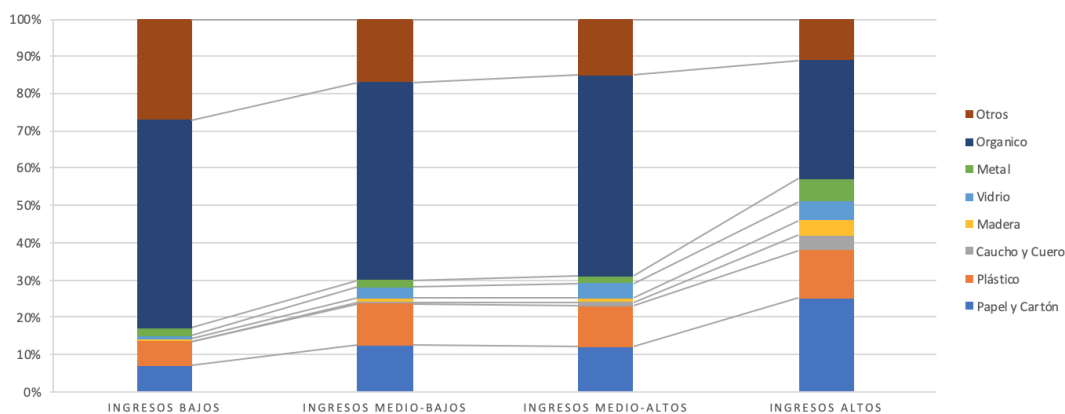


Figura 1.3: Composición de los residuos, según el nivel de ingresos del país.

En la figura 1.3 se muestra la distribución de los residuos en el mundo y cómo estos van cambiando según los ingresos del país. Dado lo anterior, se puede observar que los países con menores ingresos tienen en su mayoría residuos del tipo orgánicos y los países con un mayor ingreso tienen residuos del tipo sólidos. Algo similar ocurre con los residuos industriales y electrónicos, que también aumentan a medida que los países tienen mayores ingresos, como se muestra en la figura 1.4

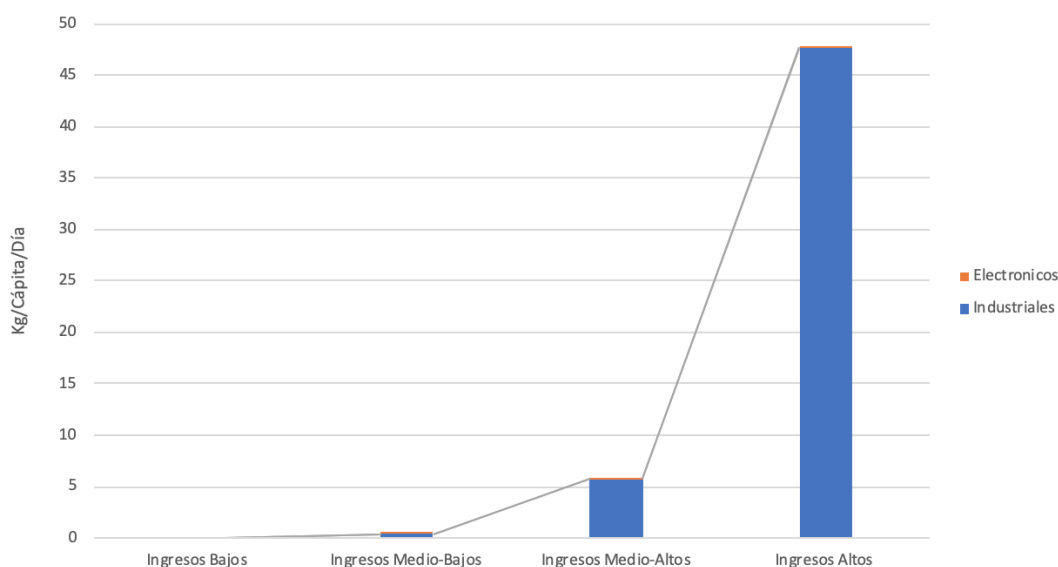


Figura 1.4: Generación de residuos industriales y electrónicos, según ingresos del país.

Los países que están aún en crecimiento económico, en un futuro contaminarán más, debido a que su PIB está altamente relacionado con el consumo de materiales. Es por esto, que sería ideal que todos los países tengan un desarrollo sostenible en el tiempo.

1.1.2. Recolección y tratamiento de residuos

Se puede observar en la figura 1.5, que la recolección de los residuos mejora según el nivel de ingresos del país, lo cual se debe a la necesidad de los países con mayores ingresos a invertir mucho más en la recolección y así no tener problemas sanitarios.

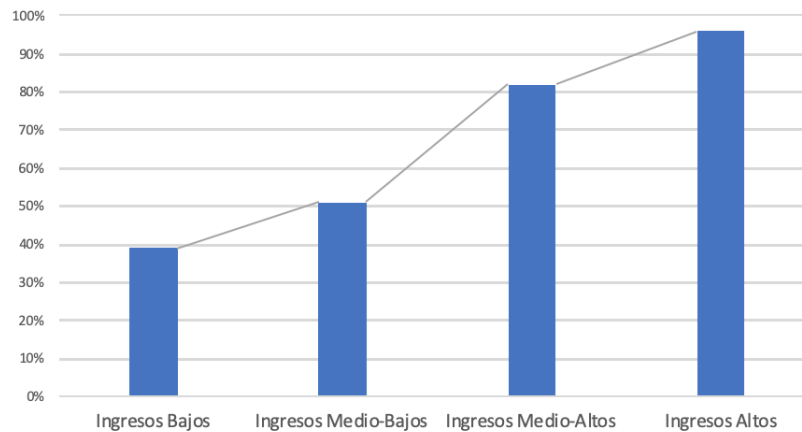


Figura 1.5: Recolección de residuos, según el nivel de ingresos.

En la figura 1.6 se puede ver, que no sólo aumenta la recolección de los residuos, sino que también mejora su tratamiento, aumentando considerablemente el reciclaje y disminuyendo los vertederos abiertos, que no tienen consideraciones medioambientales.

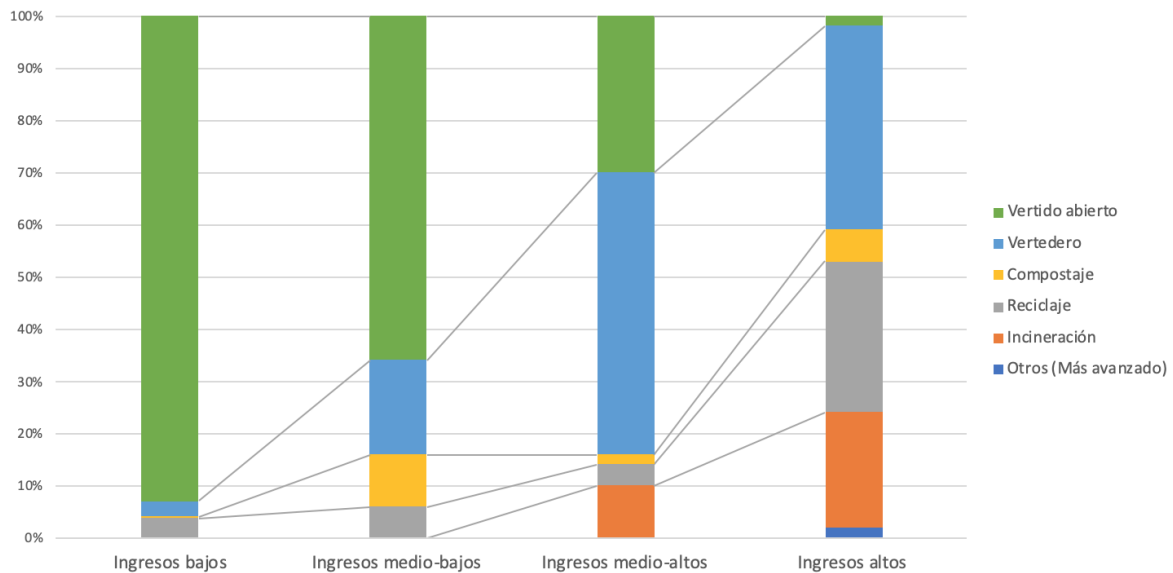


Figura 1.6: Tratamiento de residuos, según el nivel de ingresos.

Como se pudo observar anteriormente, los residuos aumentan y se hacen más complejos según el nivel de ingresos del país, por lo que es necesario mejorar su recolección y posterior tratamiento. Es decir, se debe evitar una crisis sanitaria, provocada por la falta de recolección,

disposición incorrecta y nulo tratamiento. Para mejorar el tratamiento, se necesita la ayuda de la comunidad en el ámbito del reciclaje, contribuyendo a generar menos residuos.

1.2. Residuos en Chile

1.2.1. Generación de residuos

Cada chileno genera unos 373 kilogramos de residuos domiciliarios al año, muy por encima de los 230 kilogramos en promedio de los países Latino Americanos. En la figura 1.7, se puede observar cuántos residuos genera una persona en promedio por región en Chile.

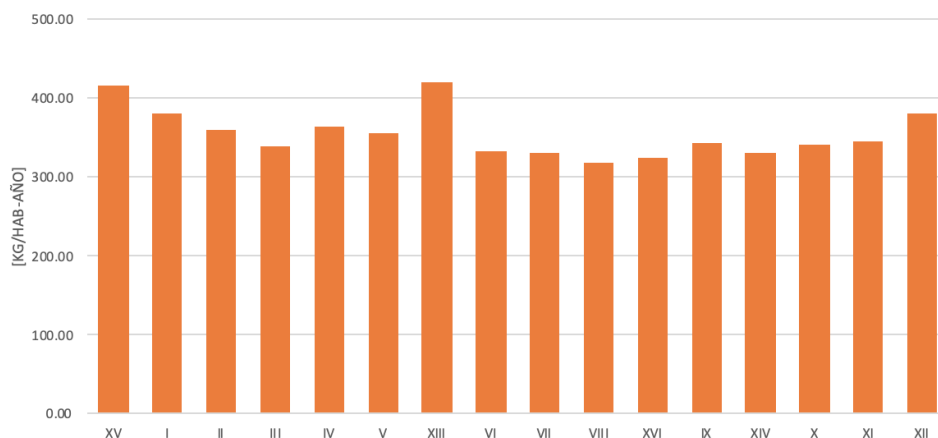


Figura 1.7: Generación por persona de residuos sólidos por región.

En general, se puede decir que no se aprecia una diferencia significativa, en la generación de residuos sólidos por persona en las distintas regiones.

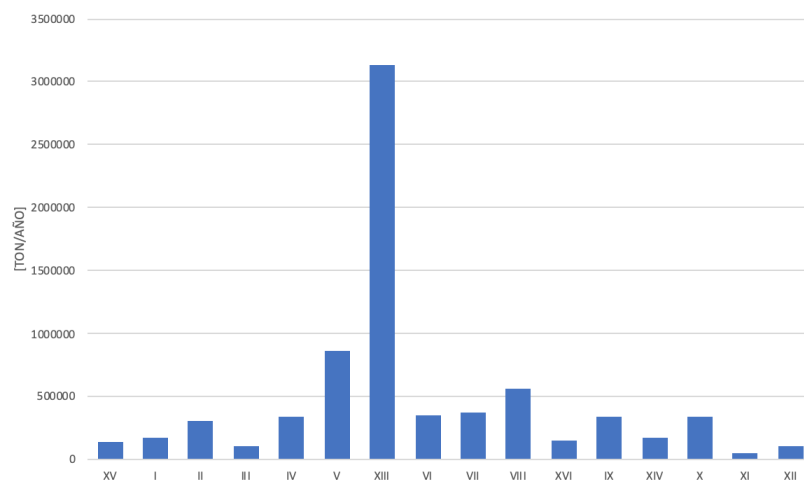


Figura 1.8: Generación de residuos sólidos por región.

Sin embargo, cuando se analiza la figura 1.8 se observa que hay regiones que generan mucha más basura que otras, lo cual se debe a la cantidad de habitantes que existen en dichas regiones. Un ejemplo claro de esto es la región metropolitana.

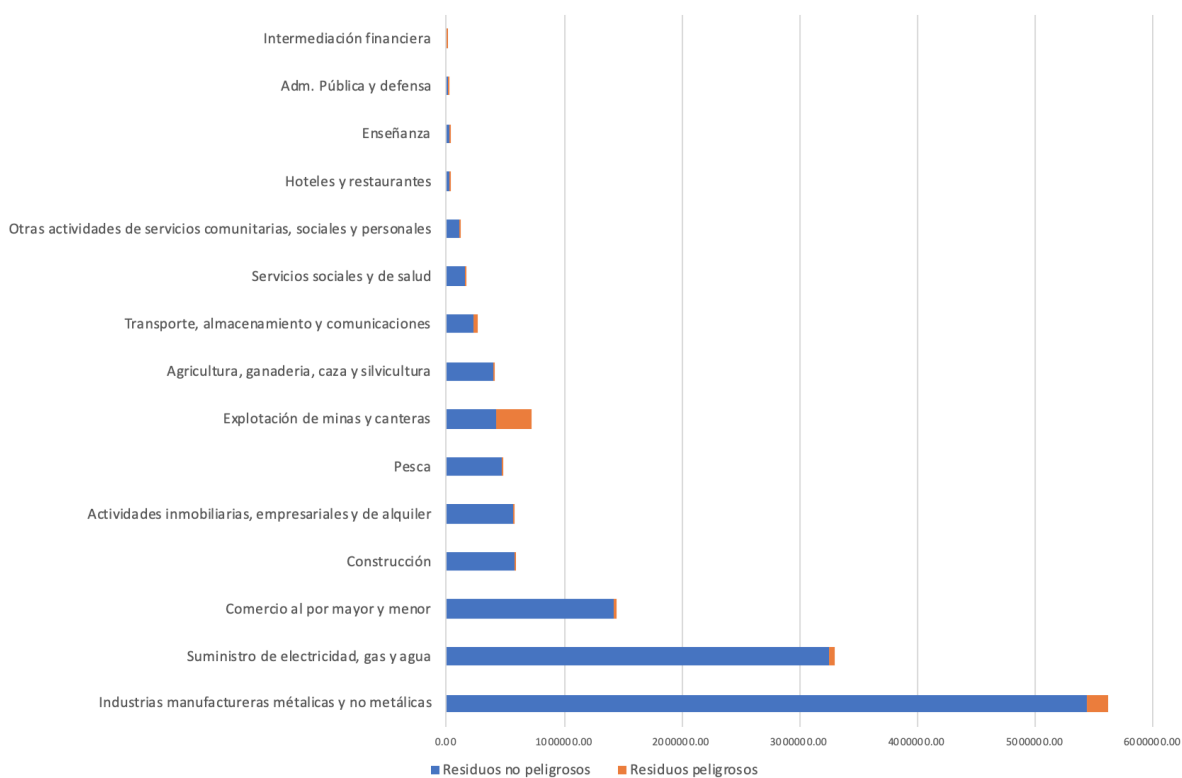


Figura 1.9: Generación de residuos según origen y clasificación industrial.

A las 7,49 millones de toneladas de residuos domiciliarios, hay que sumarle los 13,73 millones de toneladas de residuos industriales, dándonos un total de 21,22 millones de toneladas de residuos sólidos. Chile, al ser un país en crecimiento, realiza actividades económicas que generan muchos residuos sólidos, siendo principalmente la industria manufacturera la que genera la mayor cantidad de residuos no peligrosos, y la minería la que genera más residuos peligrosos.

Esto en un futuro, cuando el país alcance un desarrollo importante, las actividades económicas deberían estar menos ligadas a la producción y mas a los servicios, disminuyendo la cantidad de residuos generados. Tal como ha sucedido en otros países que ya alcanzaron un desarrollo económico, y como se espera que suceda en muchos más.

1.2.2. Recolección y tratamiento de residuos

Los residuos en Chile son llevados a sitios de disposición final, donde se reconocen tres tipos de sitios:

- Basural: es un lugar en el que se disponen residuos, ya sea en forma espontánea o programada, sin ningún tipo de control sanitario ni protección ambiental. Ejemplo en la figura 1.10



Figura 1.10: Basural en la ruta U-55, Osorno. [5]

- Vertedero: es un lugar de disposición final de residuos que fue planificado para ese uso, pero que no cuenta con las medidas sanitarias mínimas establecidas en el Decreto Supremo N° 189, y por esta razón, en general, es foco de problemas ambientales.



Figura 1.11: Ex Vertedero Santa Marta, actualmente transformado en relleno sanitario, Santiago. [6]

- Relleno sanitario: es una instalación de eliminación de residuos sólidos, en la cual se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables. Diseñada, construida y operada para minimizar molestias, riesgos para la salud y daños para el medio ambiente. En ella, los residuos son compactados en capas al mínimo volumen practicable y son cubiertas diariamente, cumpliendo con las disposiciones del DS N° 189 de 2008.



Figura 1.12: Relleno sanitario Hidronor, Copiulemu. [7]

Si bien, se observa en la figura 1.13 que la región metropolitana es la que más genera residuos, la mayoría de éstos son tratados como corresponden, en un relleno sanitario. Este gráfico, también nos muestra el déficit en el resto de las regiones, donde ya sea por falta de recursos o por poca preocupación, los residuos no se están tratando como corresponde.

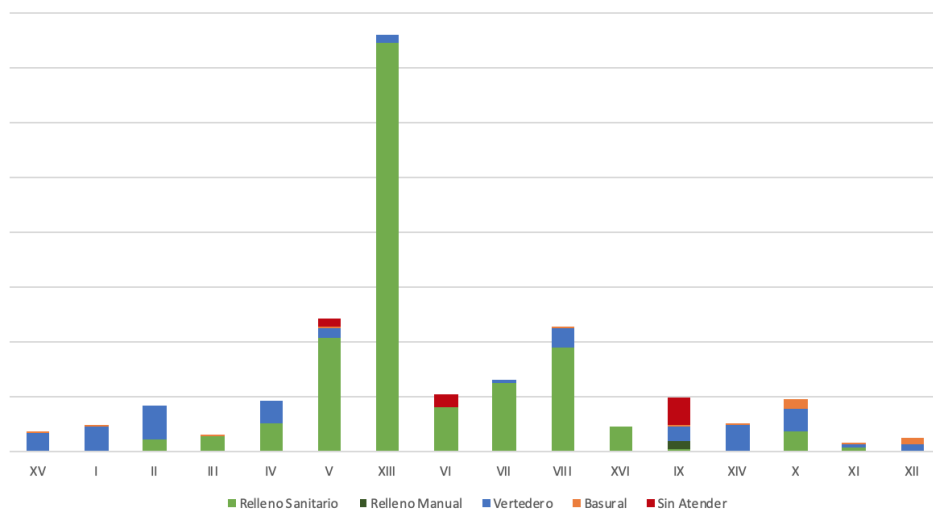


Figura 1.13: Recolección y tratamiento de los residuos por región

Esto, podría provocar un problema sanitario y/o un problema medioambiental, como es el ejemplo de Chiloé, figura 1.15 , en donde la basura no ha podido ser controlada por las autoridades.

La otra cara de Chiloé: basura desborda la isla y plan de emergencia amenaza con contaminar las aguas subterráneas

por José Olavarría

17 septiembre, 2019



Figura 1.14: Basura en Chiloé amenaza con contaminar las aguas subterráneas. [8]

Respecto a los residuos generados en el país, un 76 % fue eliminado y un 24 % fue valorizado, si bien, la mayoría de los residuos eliminados terminan en rellenos sanitarios, los cuales

cumplen las exigencias sanitarias y ambientales, esto aún no es suficiente desde el punto de vista ambiental. Si bien se deben evitar los basurales y vertederos, también, se debe disminuir la cantidad de rellenos sanitarios, por lo que el reciclaje es una medida clave.

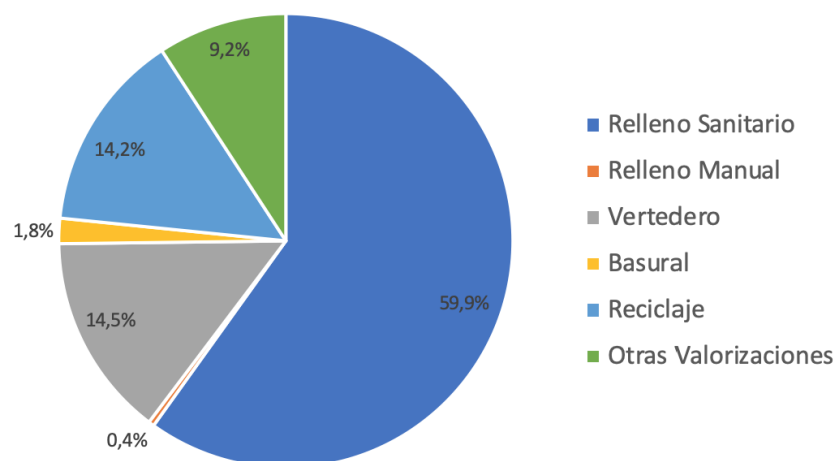


Figura 1.15: Disposición de los residuos sólidos en Chile

1.2.3. Ley REP

La ley de responsabilidad extendida del productor, fue creada para que los productores de ciertos productos prioritarios, promuevan la organización y gestionen los residuos derivados de sus productos.

Los productos prioritarios son: aceites lubricantes; aparatos eléctricos y electrónicos; baterías; pilas; envases y embalajes; y neumáticos

¿Qué deben hacer las empresas afectadas por esta Ley?

- Registrarse en un catastro público de empresarios y/o fabricantes.
- Organizar y financiar la recolección y tratamiento de productos recolectados a través de un sistema de gestión.
- Asegurar que el tratamiento de esos residuos se realice por personas autorizadas.
- Cumplir las metas de recolección y de valorización de estos productos.

¿Qué deben hacer los consumidores de estos productos?

Deben separar y entregar los residuos a un gestor del producto prioritario.

¿Qué beneficios obtendrán los recicladores de estos productos?

Contarán con una definición especial que les reconocerá como gestores para la Ley de Fomento al Reciclaje.

¿Qué rol tendrán los municipios?

Los municipios podrán hacer convenios con sistemas de gestión y con recicladores. La Ley, les permitirá pronunciarse sobre solicitudes de permiso para establecer la instalación y/u operación, de sitios de recepción y almacenamiento de productos. Además, tendrán la obligación de separar los residuos en el origen.

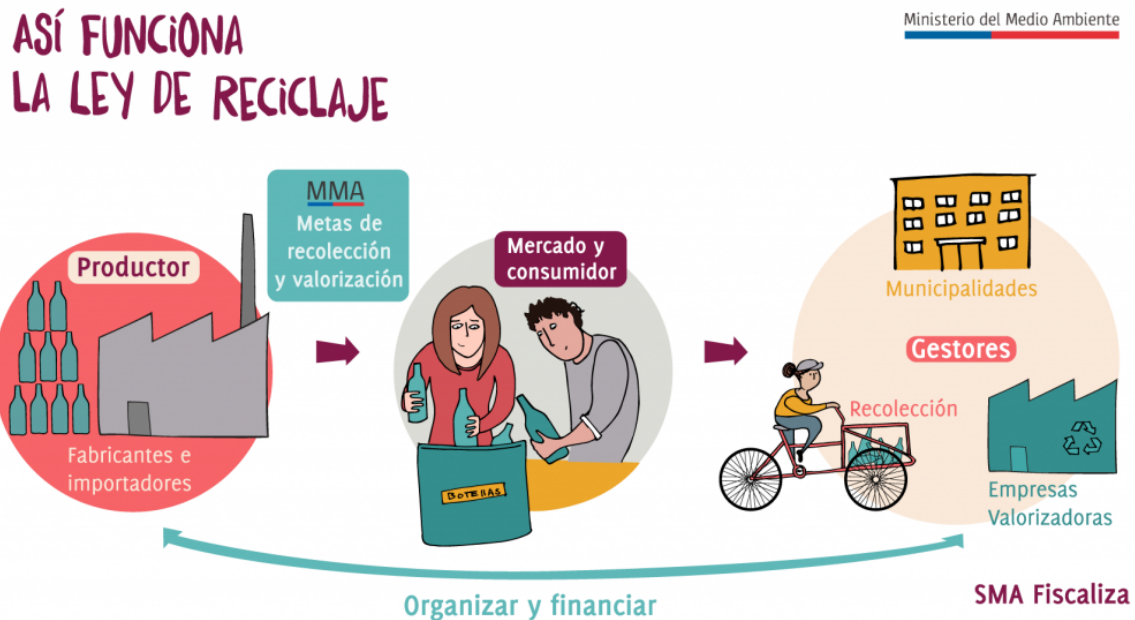


Figura 1.16: Funcionamiento de la Ley Rep. [9]

Capítulo 2

Antecedentes complementarios y conceptuales

2.1. Caucho reciclado

El caucho reciclado, es un material que se obtiene principalmente a través del proceso de reciclaje de neumáticos, los cuales ya no pueden seguir siendo utilizados debido a su desgaste o daños irreparables.

Una de las características principales de este material, es que es clasificado como un material hiperelástico, esto significa que puede ser sometido a grandes deformaciones sin presentar una deformación permanente.



Figura 2.1: Grano de caucho reciclado

2.1.1. Hiperelasticidad

La Hiperelasticidad es la capacidad de un material para experimentar grandes deformaciones sin perder sus propiedades originales. Es un material con un comportamiento no-lineal, lo cual significa que su respuesta a la carga no es directamente proporcional a la deformación, 2.2.

Las principales características de un material con un comportamiento no-lineal son:

- Grandes deformaciones
- No tiene deformaciones permanentes
- El esfuerzo y la deformación no son proporcionales

El comportamiento típico de un material hiperelástico se muestra en la 2.2, la cual consta de tres fases, en primer lugar, el material muestra una pequeña deformación lineal elástica debido a la deflexión de las paredes celulares, en segundo lugar, una pendiente de deformación con un rango relativamente pequeño de esfuerzo debido a la deformación elástica de las paredes celulares, y en tercer lugar, una región de densificación se produce a altos esfuerzos por el aplastamiento de las paredes celulares, dando lugar a un rápido aumento del esfuerzo.

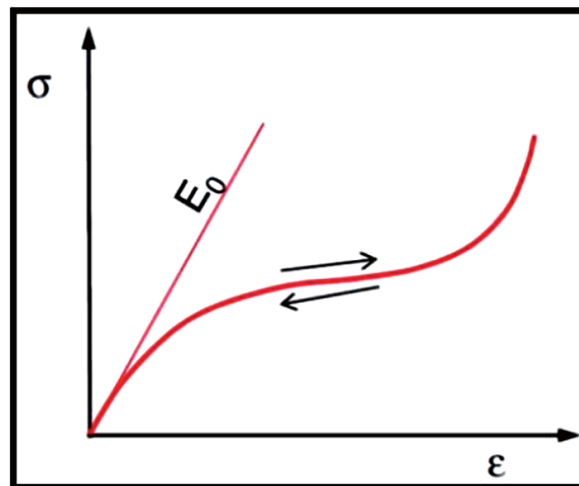


Figura 2.2: Diagrama de esfuerzo-deformación para un material hiperelástico

2.2. Proceso de reciclaje

Los neumáticos, al estar formados por caucho, material que no es biodegradable, su acumulación podría tener un gran impacto ambiental, por lo que fueron considerados dentro de la ley REP. Gracias a las nuevas tecnologías, es posible reciclarlo sin cambiar significativamente su microestructura, a pesar de ya estar vulcanizado.

A continuación, se muestra una clasificación de los procesos de tratamiento y reutilización de los neumáticos, que pueden ser de naturaleza física o química.



Figura 2.3: Proceso de reciclaje de neumáticos [13]

2.2.1. Procesos físicos

Se puede triturar o moler un neumático en distintos tamaños, según la aplicación final. No obstante, a menor tamaño, mayor será el costo del proceso de reducción. A continuación, se presentan dos tipos de procesos de triturado de NFU (Neumáticos fuera de uso) que permiten obtener GCR (grano de caucho reciclado), acero y fibras textiles.

- Triturado a temperatura ambiente: Los neumáticos pasan a través de múltiples etapas de reducción de tamaño, además, pasan por un proceso de clasificación y tamizado.
- Triturado criogénico: Los neumáticos pasan por un proceso similar al de la temperatura ambiente, pero, son enfriados a una temperatura inferior a -80°C utilizando nitrógeno

líquido, haciéndolo quebradizo y obteniendo una reducción de tamaño que requiere una menor demanda energética. Además, este tipo de reducción de tamaño, facilita el molido y la liberación de acero y la fibra, lo que se traduce en un producto final más limpio.

2.2.2. Procesos térmicos

- **Pirólisis:** Es un proceso de degradación térmica que ocurre en ausencia de oxígeno o en condiciones en que la concentración de oxígeno es suficientemente baja como para no generar combustión u otra reacción de oxidación.
- **Termólisis:** La termólisis es similar a la pirólisis, pero, en la termólisis las temperaturas son inferiores, haciendo que el contacto entre la fuente de calor y el producto a termolizar sea indirecto.
- **Incineración:** Es un proceso, en el que se produce la combustión de los materiales orgánicos del neumático a altas temperaturas y en hornos con materiales refractarios de alta calidad, esto debido al elevado poder calorífico del neumático. Lo anterior, presenta el inconveniente de que los efluentes gaseosos son muy perjudiciales para la salud humana y para el medio ambiente, por lo tanto, su aplicación es restringida.

2.3. Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF), es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas, siendo utilizado en problemas de ingeniería y física. Se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales. El requisito básico es que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema deben ser conocidas de antemano.

El MEF es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de partes, elementos, cuyo comportamiento

se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.

- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

Por tanto, el MEF se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, figura 2.4, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

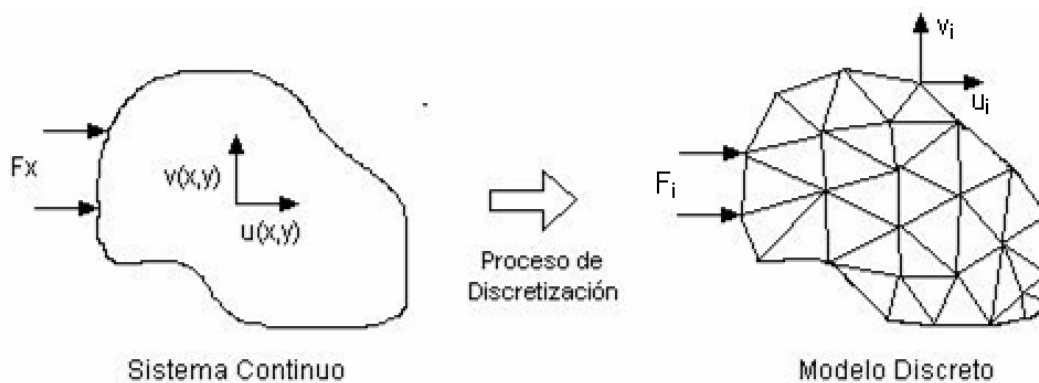


Figura 2.4: Proceso de discretización

2.3.1. Ansys Explicit Dynamics

Ansys es un software de simulación que permite el análisis y la simulación de partes por elementos finitos, mucho antes de su fabricación. El programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos, pudiendo resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas.

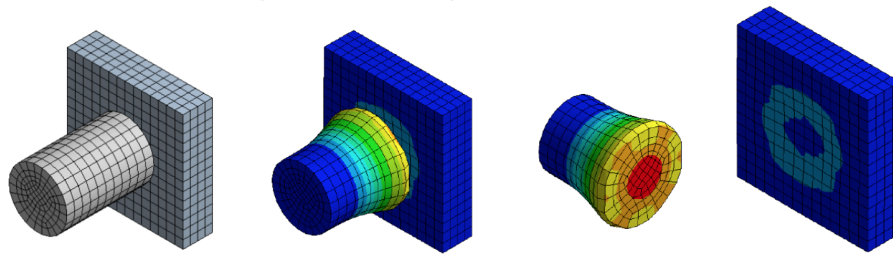


Figura 2.5: Ejemplo de un impacto analizado con “ANSYS explicit dynamics”. [14]

Los métodos implícitos y explícitos son los dos tipos de métodos de integración utilizados en las simulaciones de Ansys. El método explícito es mejor para simulaciones dinámicas que involucren impactos con propagación de onda, deformaciones grandes, presiones grandes, materiales no lineales, interacciones de contacto complejo, fragmentación y pandeo no lineal.

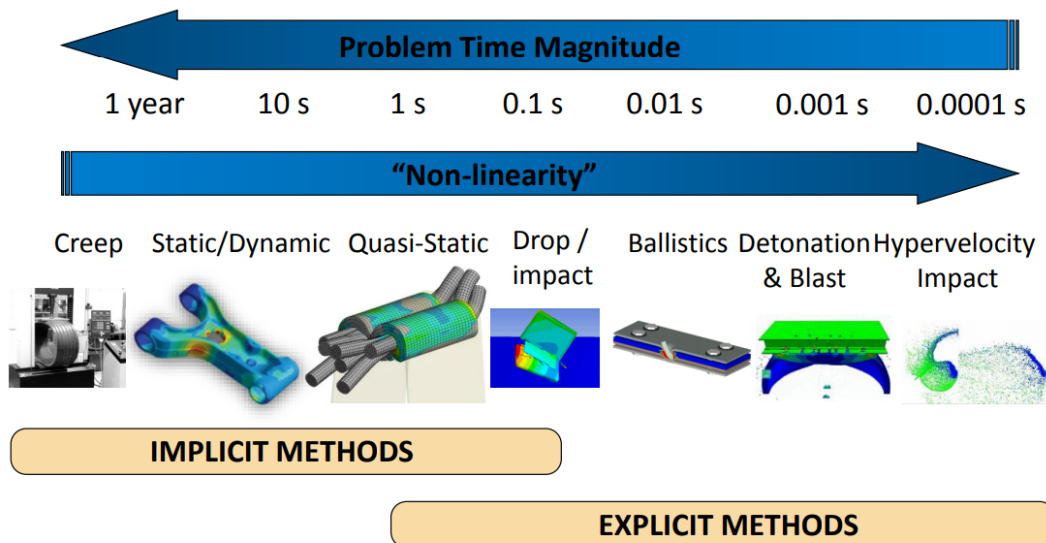


Figura 2.6: Ejemplo de la utilización de métodos implícitos y explícitos. [15]

2.3.2. Como crear un proyecto en Ansys Explicit Dynamics

- Lo primero es abrir ANSYS Workbench, una vez en el programa, a la izquierda se encuentra el menú de “toolbox”, desde el cual se debe arrastrar “Explicit Dynamics” a la sección de “project Schematic”, en donde aparecerá un nuevo recuadro.

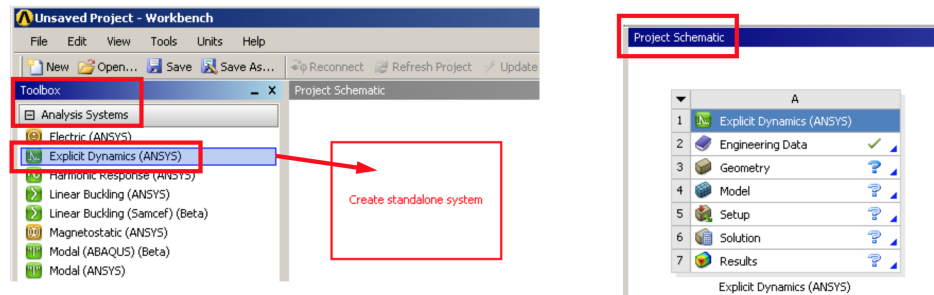


Figura 2.7: Tipo de análisis. [14]

- Al seleccionar “Engineering Data”, se pueden seleccionar los materiales que se desean utilizar de una lista de materiales predefinidos que posee la biblioteca de Ansys.
- La biblioteca “General Non-linear Materials” posee la suficiente información física de los materiales para poder ser utilizada tanto en análisis implícitos como explícitos.
- La biblioteca “Explicit Materials” posee información más complicada de los materiales y solo puede ser utilizada para análisis explícitos.

Engineering Data Sources				
	A	B	C	D
1	Data Source		Location	Description
2	★ Favorites			Quick access list and default items
3	General Materials	☐		General use material samples for use in various analyses.
4	General Non-linear Materials	☐		General use material samples for use in non-linear analyses.
5	Explicit Materials	☐		Material samples for use in an explicit analysis.
6	Hyperelastic Materials	☐		Material stress-strain data samples for curve fitting.
7	Magnetic B-H Curves	☐		B-H Curve samples specific for use in a magnetic analysis.
8	Thermal Materials	☐		Material samples specific for use in a thermal analysis.
9	Fluid Materials	☐		Material samples specific for use in a fluid analysis.
10	Composite Materials	☐		Material samples specific for composite structures.
*	Click here to add a new library			

Figura 2.8: Biblioteca de materiales predefinidos ANSYS. [14]

- En “Geometry” se debe importar la geometría del modelo que se desea analizar.

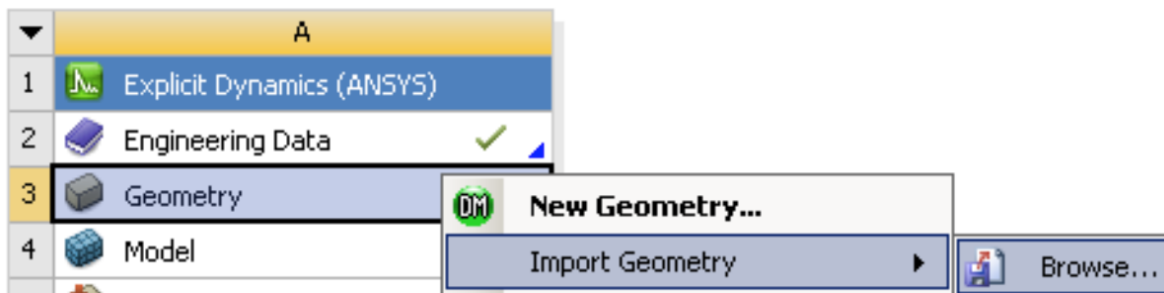


Figura 2.9: Importación de geometría

- Una vez se han realizado los pasos anteriores, en “Model” se puede editar el modelo analizado, abriéndose un nuevo programa, Ansys Workbench Mechanical.

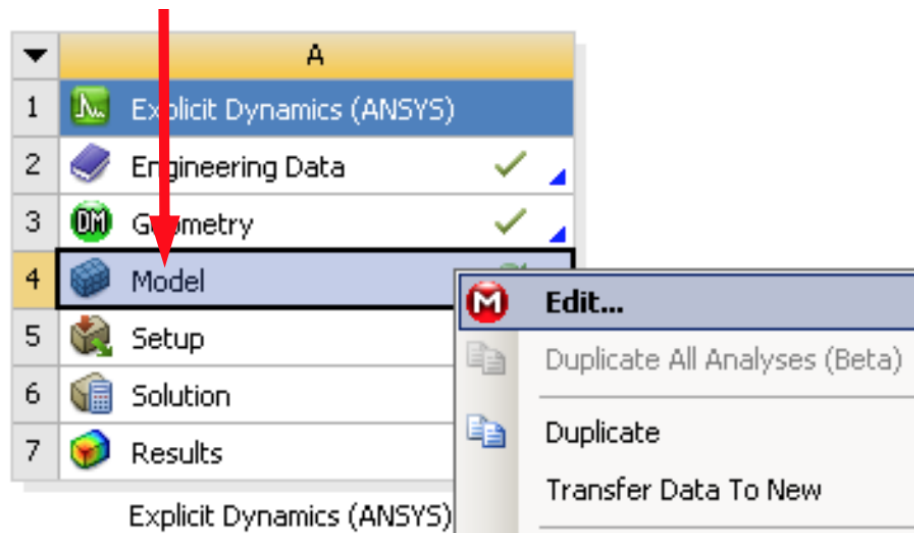


Figura 2.10: Edición modelo. [14]

- En “Geometry”, se asigna un material de los seleccionados anteriormente a cada una de las partes de la geometría importada.

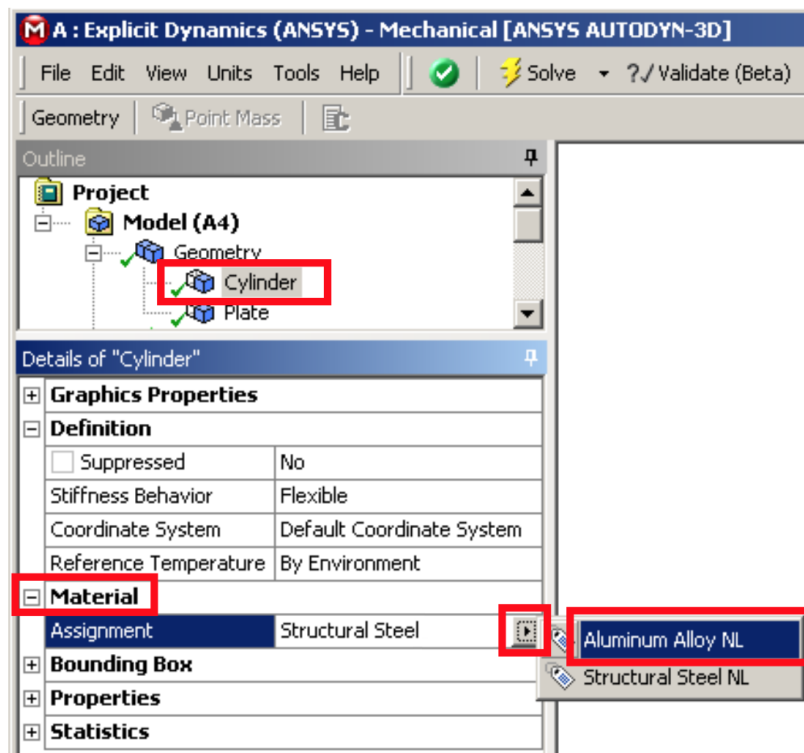


Figura 2.11: Asignación de material a las partes de la geometría. [14]

- En “Connections”, se debe seleccionar el tipo de interacción entre las partes de la geometría, desde “Frictionless” (sin fricción) hasta “Bonded” (Pegado).

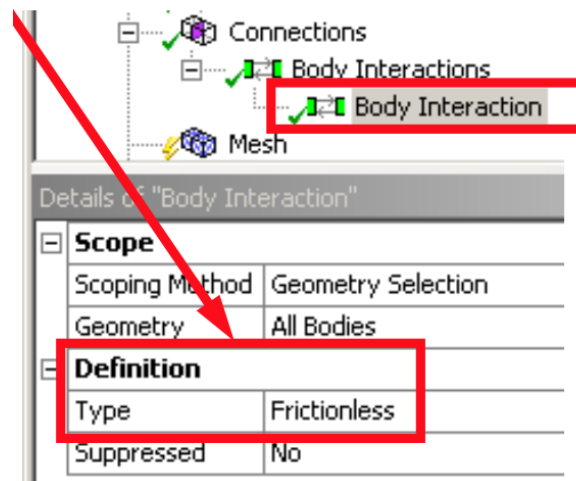


Figura 2.12: Asignación del tipo de interacción entre los cuerpos. [14]

- “Mesh” es una de las partes mas importante de una simulación, es donde se pasa de un modelo continuo a un modelo discreto y entre mejor sea la malla mejores serán los resultados obtenidos. Si bien, Ansys sugiere una malla predeterminada, no siempre es la mejor opción, por lo que algunas veces, es necesario cambiar el tamaño y forma de los elementos.

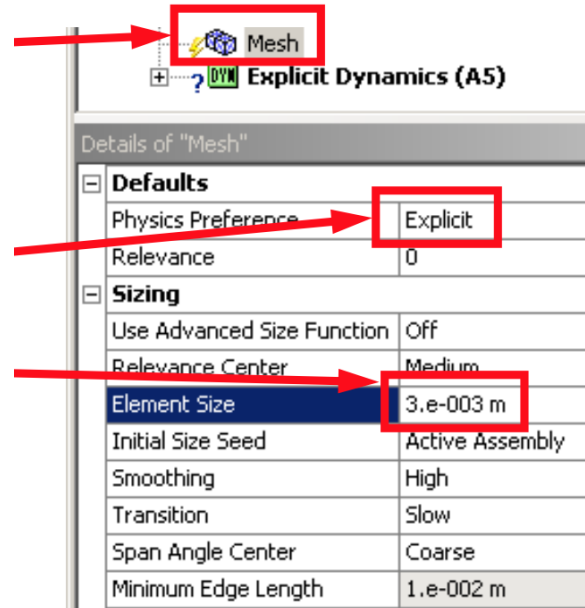


Figura 2.13: Generación de la malla. [14]

- La sección de “Initial Conditiong” es donde se debe ingresar las condiciones iniciales de la simulación, como la presión inicial, altura de caída o velocidad del objeto.

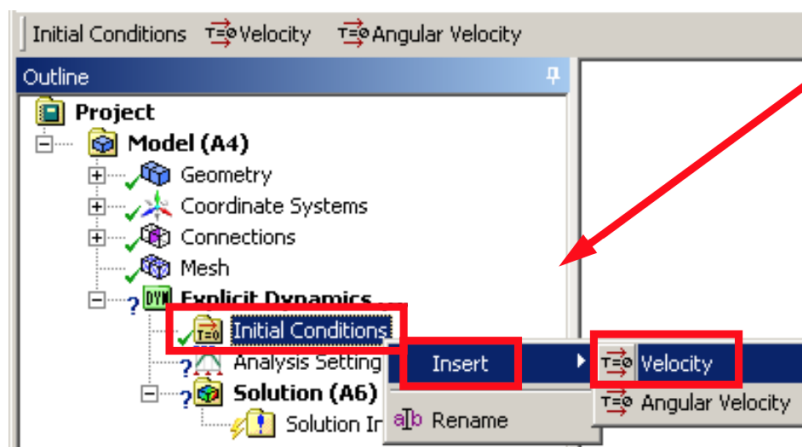


Figura 2.14: Condiciones Iniciales. [14]

- En “Analysis Settings” se debe ingresar el tiempo deseado de simulación (“End Time”), los errores máximos que se desean aceptar y el tiempo entre iteración (“Time Step”), si bien Ansys puede controlar éste, se puede inducir a un error si no se considera el Número de Courant.

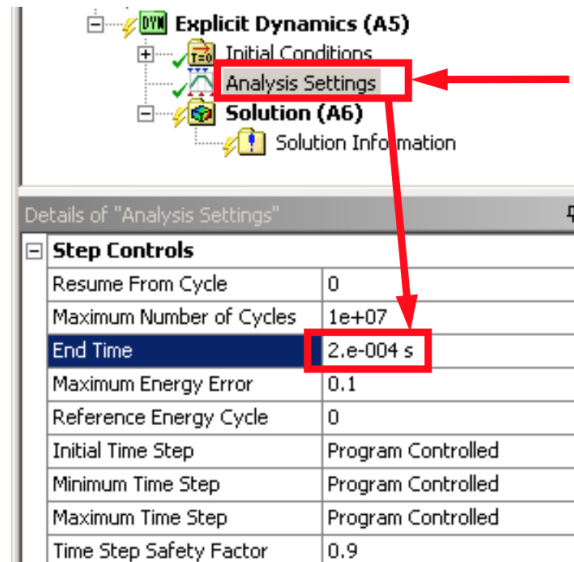


Figura 2.15: Configuración de análisis. [14]

- En “Solution” se debe ingresar qué tipo de resultado se desea, ya sea deformación, esfuerzo, energía, etc. Finalmente, se puede resolver (“Solve”), en donde la máquina calculará la simulación y si es que no se sobrepasan los errores máximos admitidos, entregará una solución aproximada del problema.

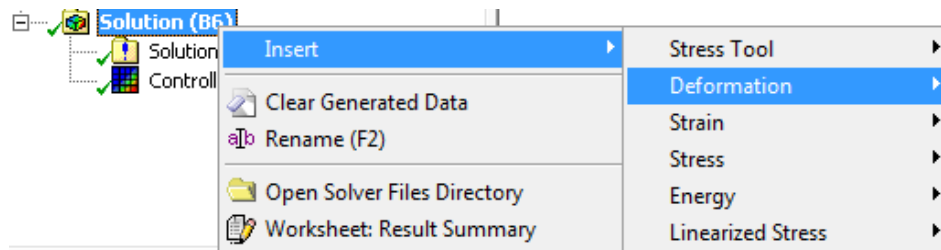


Figura 2.16: Ingreso de resultados requeridos. [14]

2.3.3. Calidad del mallado

La optimización puede ser un problema en los análisis de elementos finitos, ya que si bien un mallado muy denso producirá un resultado muy exacto, esto puede ser muy demandante para la computadora e implicar mucho tiempo en el análisis.

Por esto, existe “Mesh Metrics”, que es una característica que permite determinar la forma correcta y tamaño correcto de los elementos, siendo las más utilizadas “Aspect Ratio” y “Jacobian Ratio”.

Relación de Aspecto

”Aspect Ratio”, es una relación que cuantifica la calidad de los elementos, en donde 1 es un tetraedro perfecto y ésta va empeorando cuando mayor es el número.

Relación Jacobiana

“Jacobian Ratio”, por su parte, es una medida de desviación de un elemento de su forma ideal. El Jacobiano va desde -1 hasta 1, en donde 1 representaría un elemento perfectamente modelado.

Análisis convergente

El más fundamental y preciso método para evaluar la calidad de la malla es la realización de un análisis convergente, en donde se va refinando la malla y se analiza los resultados deseados, determinando a partir de qué tamaño de malla dejan de variar significativamente los resultados (converge).

El problema con este método es que requiere múltiples iteraciones, lo que puede ser muy demandante en tiempo.

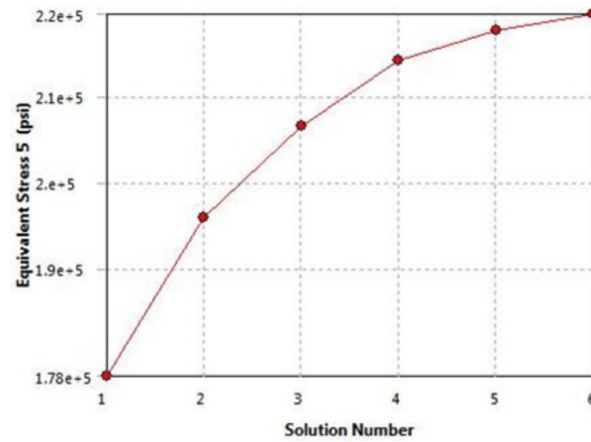


Figura 2.17: Ejemplo de convergencia de una malla. [18]

Básicamente, a medida que se incrementa la densidad de la malla se verifican los resultados, en la figura 2.17 se pueden ver cómo los resultados van convergiendo a medida que se incrementa la calidad en la malla.

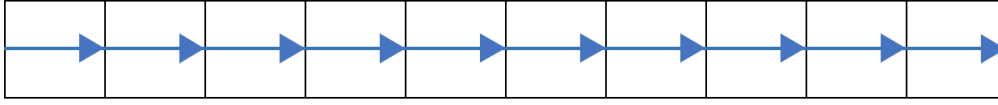
2.3.4. Número de Courant-Friedrichs-Levy

El número de Courant, es una medida de cuánta información (u) atraviesa una celda de cuadrícula computacional (Δx), en un intervalo de tiempo determinado (Δt).

$$C \equiv \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Entonces, en un método euleriano explícito, el número de Courant no puede ser mayor que uno, porque un número de Courant mayor que uno significa que la información se propaga a través de más de una celda de la cuadrícula en cada paso de tiempo. Esto significa que el integrador de tiempo no tiene el suficiente tiempo para interpretar correctamente lo que está sucediendo físicamente, lo que implica que la solución se volverá inestable y el modelo explotará.

Número de courant 1 -> El flujo atraviesa 1 celda por cada diferencial de tiempo



Número de courant 10 -> El flujo atraviesa 10 celdas por cada diferencial de tiempo



Figura 2.18: Ejemplo del número de Courant

Velocidad de propagación de una onda mecánica longitudinal en un sólido

Las ondas longitudinales, se propagan a través de diferentes medios con distinta velocidad, siendo influenciadas principalmente por las características del medio. La velocidad de una onda mecánica en un sólido puede ser simplificada por la expresión:

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.2)$$

En donde E es el modulo de elasticidad y ρ la densidad del material.

2.3.5. Modelo de Mooney-Rivlin

El modelo de Mooney-Rivlin es utilizado por ajustar bien el comportamiento no lineal de materiales incompresibles, como lo es el caucho. Se trata de un modelo de sólidos hiperelásticos. Para el modelado se utiliza la función densidad de energía de deformación, W , que viene dada por:

$$W = C_{10} \cdot (I_1 - 3) + C_{01} \cdot (I_2 - 3) \quad (2.3)$$

Donde C_{10} y C_{01} son constantes de cada material. Las constantes del material se pueden relacionar mediante el parámetro α :

$$\frac{C_{10}}{C_{01}} = \alpha \quad (2.4)$$

El valor clásico del modelo de Mooney-Rivlin establece que $\alpha=0.1$. La constante C_{10} puede definirse en función del parámetro anterior:

$$C_{10} = \frac{E}{6 \cdot (1 + \alpha)} \quad (2.5)$$

Siendo E el módulo de Young del material. I1 e I2 son el primer y segundo invariante, respectivamente, del tensor deformación Cauchy- Green:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.6)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 \quad (2.7)$$

Compresibilidad

La mayoría de los elastómeros (materiales sólidos similares al caucho) tienen muy poca compresibilidad en comparación con su módulo de corte y si el material no está muy confinado el grado de compresibilidad no es crucial. Sin embargo, la solución numérica puede ser bastante sensible al grado de compresibilidad del elemento en análisis, por lo que se debe modelar correctamente para obtener resultados precisos.

Se puede evaluar la compresibilidad relativa (D_1) de un material por la siguiente relación:

$$D_1 = \frac{2}{K_0} \quad (2.8)$$

$$v = \frac{(3 \cdot K_0/G) - 2}{(6 \cdot K_0/G) + 2} \quad (2.9)$$

En donde (G) es el módulo de corte, K_0 el módulo de compresibilidad y v la relación de Poisson.

Normalmente para materiales hiperelásticos incompresibles, se recomienda que se utilice

una relación de Poisson superior a 0.495, para así evitar problemas de convergencia.

2.3.6. Teoría del esfuerzo máximo

La teoría del esfuerzo principal máximo, atribuida a Rankine, es la mas utilizada para materiales frágiles (poca deformación plástica) o sometidos a esfuerzos de impacto.

Ésta, establece que la falla se producirá cuando el esfuerzo normal máximo en la pieza sea igual o mayor al esfuerzo límite en tensión o compresión, obtenido en ensayos de tensión o compresión.

Capítulo 3

Metodología de trabajo

La metodología de trabajo consiste en realizar una simulación de impactos, resuelta mediante elementos finitos con el software ANSYS. El modelo estudiado es una modificación de la norma ACI 544, el material estudiado es hormigón y hormigón recubierto en caucho reciclado (con una variación en su espesor y dureza). Posteriormente, los resultados son contrastados para determinar el comportamiento mecánico del caucho reciclado y como este se comporta sobre el hormigón.

3.1. Modelo a estudiar

El modelo a estudiar es una modificación de la norma ACI 544, siendo modificada principalmente para simplificar el problema a la computadora. La norma ACI 544 es un método de ensayo estándar para medir la resistencia al impacto en hormigón reforzado, permitiendo analizar la absorción de energía dinámica y los esfuerzos en el material.

3.1.1. ACI 544

El ensayo consiste en el impacto de un martillo (masa de 10 libras con una altura de 18 pulgadas) a una bola de acero (2,5 pulgadas de diámetro) que está ubicada sobre un testigo de hormigón (diámetro de 6 pulgadas con un espesor de 2,5 pulgadas), estos elementos están

(1 in. = 25.4 mm)

2-1/2 in. Dia. Hardened Steel Ball

Note: Free fit between ball and pipe

2-1/2 in. Dia. Steel Pipe

2 x 1/4 in. Steel Bar

2 x 3-3/8 x 1/4 in. Bar

2 x 2 x 1/2 in. Bar

Specimen

6 in. Dia.

12 in. Dia.

1-1/2"

1-1/4"

2-1/2"

1"

3"

3/16"

1/4"

Typ. 1/8"

Typ. 1/8"

3.1.2. Modificación ACI 544

- Se eliminan los elementos sujetadores, ya que en ANSYS se puede indicar la dirección deseada.
- Se transforma la energía potencial que tiene el martillo en un inicio del ensayo, a una energía cinética que tendrá la bola de acero, esto gracias a la ley de conservación de energías.

32

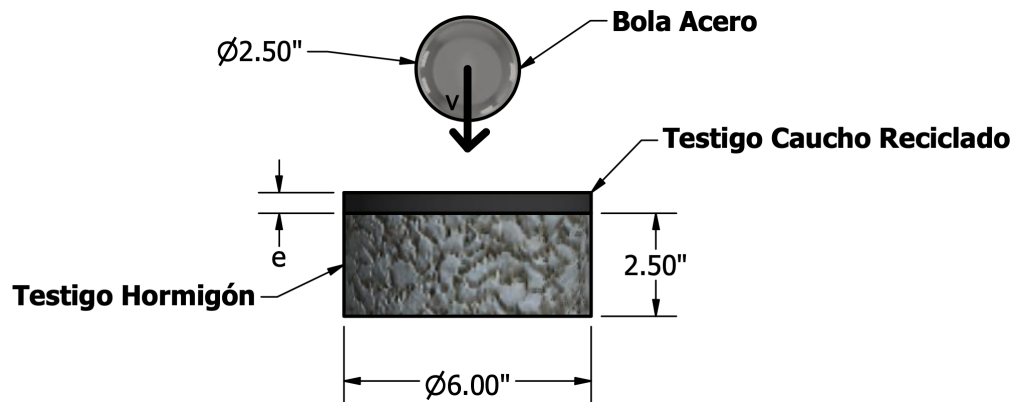


Figura 3.2: Plano del modelo a analizar

En donde velocidad de la bola de acero (v) será de 6,2178 metros por segundo. Además se realizarán múltiples ensayos, variando el espesor del caucho reciclado desde 0 pulgadas (sin caucho reciclado) hasta las 1,5 pulgadas y variando la dureza de éste, desde 55 Shore-A hasta 70 Shore-A.

3.2. Modelación por Ansys

En este trabajo se utiliza Ansys, específicamente “Explicit Dynamics”, que permite resolver el modelo a través de un análisis dinámico con la utilización de elementos finitos. Este análisis dinámico se utiliza para determinar la deformación y esfuerzos que es capaz de soportar el testigo de hormigón cuando es sometido a un impacto.

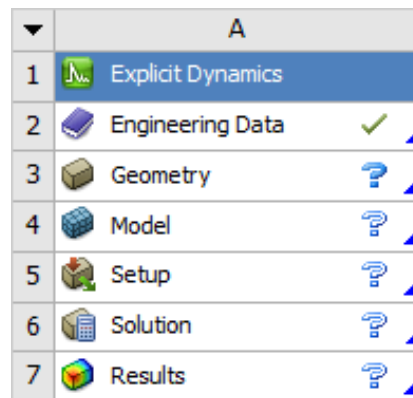


Figura 3.3: Modulo “Explicit Dynamics”.

3.2.1. Parámetros del material

Los parámetros del material son ingresados en “Engineering Data”, en donde se coloca el material para cada elemento utilizado.

Bola de acero

Para la bola de acero, se utilizan los parámetros predefinidos por ANSYS para un acero estructural no lineal, que tiene las siguientes propiedades:

Properties of Outline Row 5: Structural Steel NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	2E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Bilinear Isotropic Hardening			
13	Specific Heat, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

Figura 3.4: Parámetros predefinidos por ANSYS, para un acero estructural no lineal.

Testigo de Hormigón

Para el testigo de hormigón, se utilizan los parámetros predefinidos por ANSYS para el concreto no lineal, que tiene las siguientes propiedades:

Properties of Outline Row 3: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	3E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Drucker-Prager Strength Piecewise	Tabular		
13	Tensile Pressure Failure			
15	Crack Softening Failure			

Figura 3.5: Parámetros predefinidos por ANSYS, para el concreto no lineal.

Testigo de Caucho Reciclado

Para el testigo de caucho reciclado, la relación entre la dureza del caucho reciclado y el modelo de Mooney-Rivlin de dos coeficientes, está de acuerdo a la tabla 3.1. Estos valores son aproximados y sirven para cauchos con un módulo de Poisson cercano a 0,5 (material casi incompresible).

Dureza <i>Shore – A</i>	Módulo de Young (E)	Módulo de Corte (G)	C_{10}	C_{01}
[°]	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$
55	3,207	0,956	0,382	0,096
60	4,268	1,185	0,474	0,118
65	5,616	1,465	0,586	0,147
70	7,289	1,839	0,736	0,184

Tabla 3.1: Parámetros del modelo de Mooney-Rivlin de dos variables para el Caucho cercano a la incompresibilidad. [21]

Para el cálculo del parámetro de incompresibilidad ($D1$), se utiliza una relación de Poisson de 0,4995 (Cercana a la incompresibilidad), para así evitar problemas de convergencia, obteniéndose los siguientes resultados:

Dureza <i>Shore – A</i>	Coefficiente de Poisson (ν)	Compresibilidad (K)	Incompresibilidad ($D1$)
[°]	[–]	$[MPa]$	$[MPa^{-1}]$
55	0,4995	956	0,00209
60		1185	0,00169
65		1465	0,00139
70		1839	0,00109

Utilizando estos datos, las propiedades ingresadas en ANSYS para el caucho reciclado son las siguientes:

Properties of Outline Row 4: Elastomer Sample (Mooney-Rivlin)				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	980	kg m ⁻³	
4	Uniaxial Test Data	Tabular		
5	Scale	1		
6	Offset	0	Pa	
7	Mooney-Rivlin 2 Parameter			
8	Material Constant C10	0,382	MPa	
9	Material Constant C01	0,096	MPa	
10	Incompressibility Parameter D1	0,00209	MPa ⁻¹	
11	Curve Fitting	Fit Type: Mooney-Rivlin 2 Parameter		
12	Error Norm for Fit	Normalized Error		
13	Uniaxial Test Data	Tabular		
14	Biaxial Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
15	Shear Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
16	Volumetric Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		

Figura 3.6: Parámetros en ANSYS para el caucho reciclado de dureza 55 Shore-A (Mooney-Rivlin de dos variables).

Properties of Outline Row 4: Elastomer Sample (Mooney-Rivlin)				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	980	kg m ⁻³	
4	Uniaxial Test Data	Tabular		
5	Scale	1		
6	Offset	0	Pa	
7	Mooney-Rivlin 2 Parameter			
8	Material Constant C10	0,474	MPa	
9	Material Constant C01	0,118	MPa	
10	Incompressibility Parameter D1	0,00169	MPa ⁻¹	
11	Curve Fitting	Fit Type: Mooney-Rivlin 2 Parameter		
12	Error Norm for Fit	Normalized Error		
13	Uniaxial Test Data	Tabular		
14	Biaxial Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
15	Shear Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
16	Volumetric Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		

Figura 3.7: Parámetros en ANSYS para el caucho reciclado de dureza 60 Shore-A (Mooney-Rivlin de dos variables).

Properties of Outline Row 4: Elastomer Sample (Mooney-Rivlin)				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	980	kg m ⁻³	
4	Uniaxial Test Data	Tabular		
5	Scale	1		
6	Offset	0	Pa	
7	Mooney-Rivlin 2 Parameter			
8	Material Constant C10	0,586	MPa	
9	Material Constant C01	0,147	MPa	
10	Incompressibility Parameter D1	0,00137	MPa ⁻¹	
11	Curve Fitting	Fit Type: Mooney-Rivlin 2 Parameter		
12	Error Norm for Fit	Normalized Error		
13	Uniaxial Test Data	Tabular		
14	Biaxial Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
15	Shear Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
16	Volumetric Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		

Figura 3.8: Parámetros en ANSYS para el caucho reciclado de dureza 65 Shore-A (Mooney-Rivlin de dos variables).

Properties of Outline Row 4: Elastomer Sample (Mooney-Rivlin)				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	980	kg m ⁻³	
4	Uniaxial Test Data	Tabular		
5	Scale	1		
6	Offset	0	Pa	
7	Mooney-Rivlin 2 Parameter			
8	Material Constant C10	0,736	MPa	
9	Material Constant C01	0,184	MPa	
10	Incompressibility Parameter D1	0,00109	MPa ⁻¹	
11	Curve Fitting	Fit Type: Mooney-Rivlin 2 Parameter		
12	Error Norm for Fit	Normalized Error		
13	Uniaxial Test Data	Tabular		
14	Biaxial Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
15	Shear Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
16	Volumetric Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		

Figura 3.9: Parámetros en ANSYS para el caucho reciclado de dureza 70 Shore-A (Mooney-Rivlin de dos variables).

3.2.2. Malla

La malla es una parte clave de la simulación, ya que la precisión de los resultados muchas veces depende de ésta, sin embargo, entre más pequeña la malla mayor es el número de ecuaciones que el software debe resolver.

Si bien ANSYS recomienda un tamaño malla y una forma de malla, ésta no siempre es la más adecuada para la simulación. Por esto, para obtener un resultado más preciso se realizó un análisis convergente, en el cual se fue disminuyendo el tamaño de la malla hasta que dejara de variar significativamente los resultados, como se muestra en la figura 3.10.

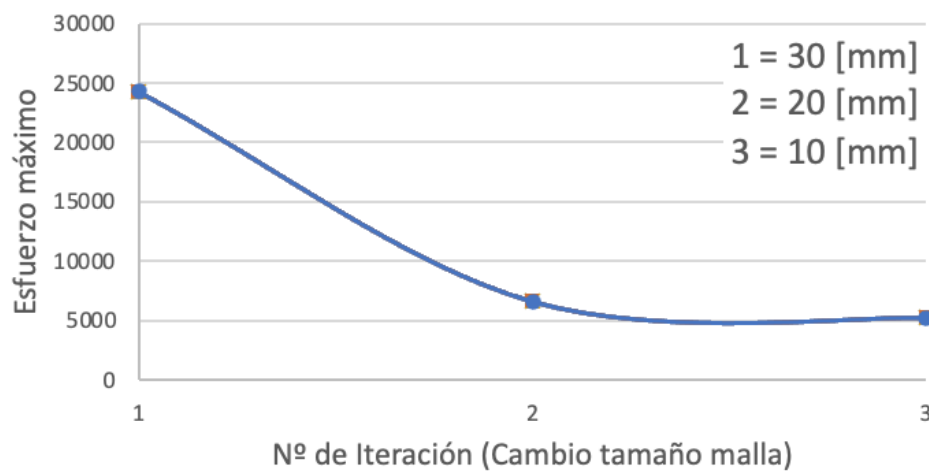


Figura 3.10: Convergencia de la malla, geometría con caucho de 0,5 pulgadas.

En este gráfico, se puede apreciar que a partir de los 20 milímetros empieza a converger y ya no es necesario seguir disminuyendo el tamaño de la malla, sin embargo, se escoge un tamaño de malla de 8 [mm] para obtener resultados lo más preciso posible. Por lo tanto, los modelos para cada geometría quedarán como se muestra a continuación:

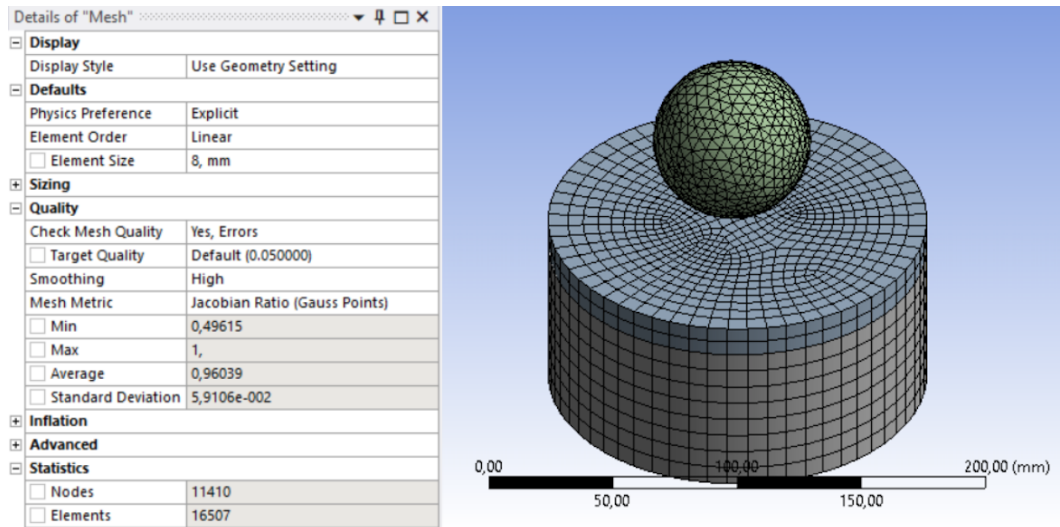


Figura 3.11: Malla de 8 mm utilizada en la simulación, geometría con caucho de 0,5 pulgadas.

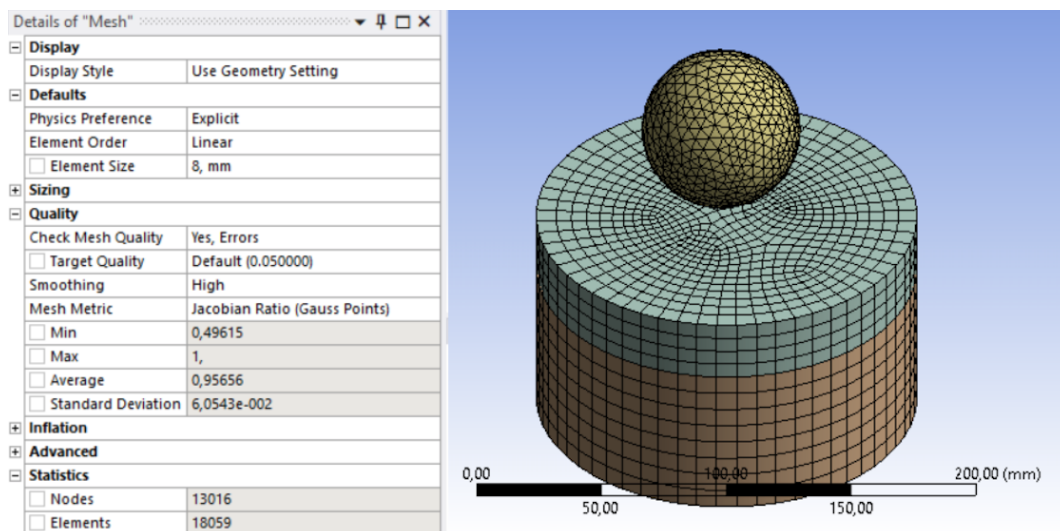


Figura 3.12: Malla de 8 mm utilizada en la simulación, geometría con caucho de 1,0 pulgadas.

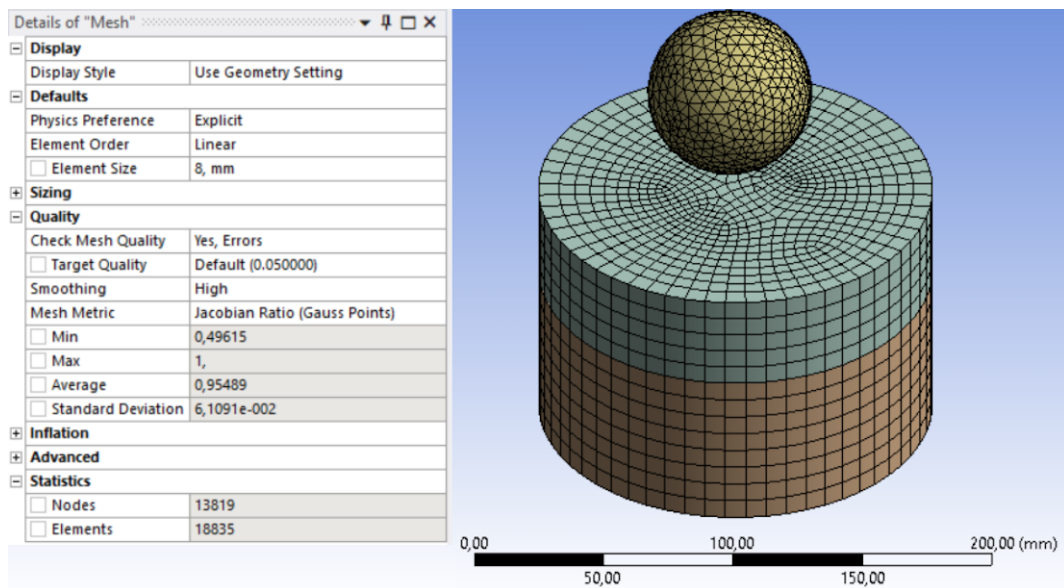


Figura 3.13: Malla de 8 mm utilizada en la simulación, geometría con caucho de 1,5 pulgadas.

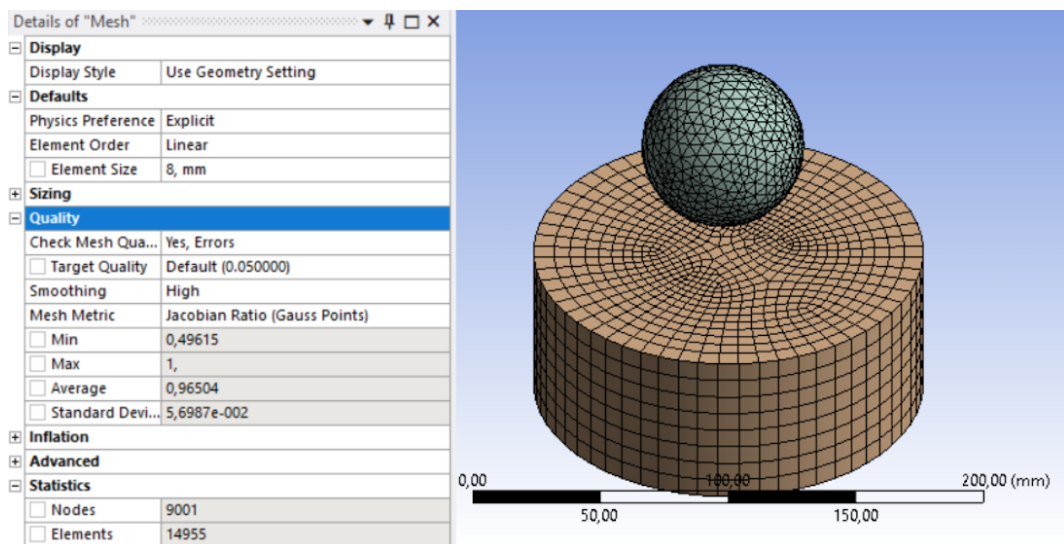


Figura 3.14: Malla de 8 mm utilizada en la simulación, geometría sin caucho reciclado.

En estas figuras, se muestra la cantidad de nodos y elementos para cada geometría. Además, se muestra la relación Jacobiana, encontrándose que en todas ellas la relación es muy cercana a 1, por lo que se puede decir que las geometrías están bien modeladas.

3.2.3. Condiciones Iniciales

Para asemejarse al ensayo ACI 544, se calcula la velocidad con la que impacta la bola de acero (v), haciendo una relación de energías, en la que se iguala la energía potencial que tenía el martillo en el ensayo original con la cinética que tendrá la bola de acero en esta simulación numérica antes del impacto.

Componentes		Energía Potencial	Energía Cinética
Masa martillo (m)	10[lbs]	69519,69 [$\frac{lb \cdot in^2}{s^2}$]	
Aceleración de gravedad (g)	386,22 [in/s^2]		
Altura (h)	18 [in]		
Masa bola acero (m^*)	2,3202 [lbs]		69519,69 [$\frac{lb \cdot in^2}{s^2}$]
Velocidad antes del impacto (v)	244,8 [in/s]		

Tabla 3.2: Relación entre la energía potencial y cinética, para el cálculo de la velocidad de la bola de acero antes del impacto.

Como se muestra en la tabla, la velocidad que llevará la bola de acero antes del impacto será de 244,8 [in/s], esto sería equivalente a una velocidad de 6,2178 [m/s], siendo estos parámetros ingresados como se muestra en la figura 3.15.

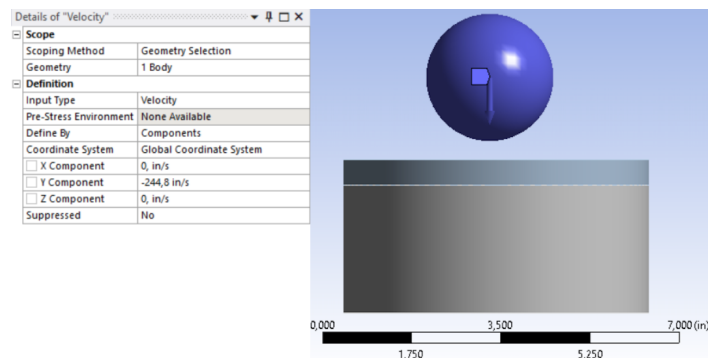


Figura 3.15: Velocidad ingresada a ANSYS de la bola de acero antes del impacto.

La siguiente condición inicial, es fijar la cara inferior del hormigón en ANSYS, para que

así no se desplace libremente, quedando como se muestra a continuación:

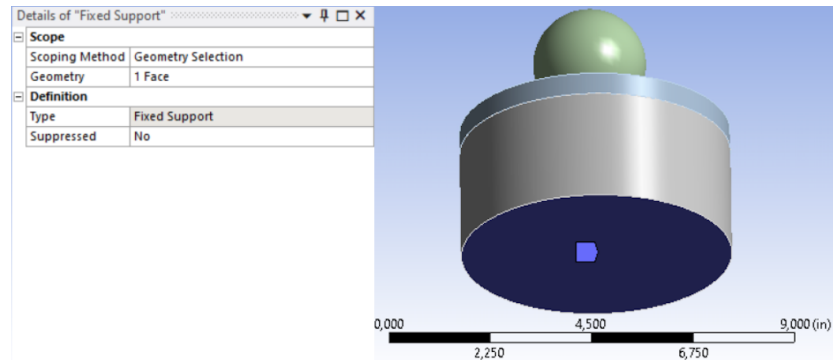


Figura 3.16: Fijación en ANSYS de la cara inferior del hormigón.

3.2.4. Propiedades del análisis

Una condición importante es asegurar que el número de Courant sea menor que uno, para que la información en cada paso de tiempo no se propague por mas de una celda a la vez. Para esto, se determina la velocidad de propagación de la onda mecánica longitudinal de cada material, quedando como se muestra en la siguiente tabla:

Material	Módulo de Young	Densidad	Velocidad de Propagación Onda Mecánica Longitudinal
	(E) [MPa]	(ρ) [kg/m ³]	(u) [m/s]
Acero estructural no lineal	200000	7850	5047,54
Concreto no lineal	30000	2300	3611,58
Caucho 55 Shore-A	3,207	980	57,21
Caucho 60 Shore-A	4,268		65,99
Caucho 65 Shore-A	5,616		75,70
Caucho 70 Shore-A	7,289		86,24

Tabla 3.3: Velocidad de propagación de una onda mecánica longitudinal, para cada material utilizado.

El siguiente paso es determinar el tiempo máximo de iteración, que se consigue haciendo que el número de Courant sea menor que uno, conociendo que el tamaño de la malla es de 8 [mm] y la velocidad de propagación de onda para cada material se obtuvo anteriormente, quedando los resultados como se muestra en la siguiente tabla:

Material	Máximo tiempo entre iteración (Δt)
	[s]
Acero estructural no lineal	$1,58 \cdot 10^{-6}$
Concreto no lineal	$2,22 \cdot 10^{-6}$
Caucho 55 Shore-A	$1,40 \cdot 10^{-4}$
Caucho 60 Shore-A	$1,21 \cdot 10^{-4}$
Caucho 65 Shore-A	$1,06 \cdot 10^{-4}$
Caucho 70 Shore-A	$9,28 \cdot 10^{-5}$

Tabla 3.4: Máximo tiempo entre iteración, para cada material utilizado, con una malla de 8 [mm].

Sabiendo el tiempo máximo entre iteración, se escoge un Δt de $1 \cdot 10^{-6}$ [s] evitando así cualquier problema de convergencia. Además, se escoge el tiempo en que se analizará el impacto, el cual depende de la geometría, incrementándose cuando aumente el espesor del caucho, quedando como se muestra en la siguiente tabla:

Geometría	Tiempo analizado
	[s]
Caucho reciclado 0,5 [inch]	0,008
Caucho reciclado 1,0 [inch]	0,009
Caucho reciclado 1,5 [inch]	0,01
Sin Caucho reciclado	0,006

Tabla 3.5: Tiempo de análisis del impacto, para cada geometría analizada.

Con esta información y seleccionando un tipo de análisis “Drop Test” (Ensayo de caí-

da), que es el más adecuado para el análisis requerido, las propiedades de análisis para cada geometría quedan como se muestra a continuación:

[-] Analysis Settings Preference	
Type	Drop Test
[-] Step Controls	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
Load Step Type	Explicit Time Integrati...
End Time	8,e-003
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	1,e-006 s
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Opposing Faces
Automatic Mass Scaling	No

Figura 3.17: Propiedades del análisis, geometría con caucho reciclado de 0,5 [inch].

[-] Analysis Settings Preference	
Type	Drop Test ▼
[-] Step Controls	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
Load Step Type	Explicit Time Integrati...
End Time	9,e-003
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	1,e-006 s
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Opposing Faces
Automatic Mass Scaling	No

Figura 3.18: Propiedades del análisis, geometría con caucho reciclado de 1,0 [inch].

[-] Analysis Settings Preference	
Type	Drop Test
[-] Step Controls	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
Load Step Type	Explicit Time Integrati...
End Time	1,e-002
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	1,e-006 s
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Opposing Faces
Automatic Mass Scaling	No

Figura 3.19: Propiedades del análisis, geometría con caucho reciclado de 1,5 [inch].

[-] Analysis Settings Preference	
Type	Drop Test
[-] Step Controls	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
Load Step Type	Explicit Time Integrati...
End Time	6,e-003
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	1,e-006 s
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Opposing Faces
Automatic Mass Scaling	No

Figura 3.20: Propiedades del análisis, geometría sin caucho reciclado.

3.2.5. Parámetros requeridos del análisis

Por ultimo, se ingresan en ANSYS las soluciones requeridas, solicitando la deformación máxima en el eje Y, el esfuerzo máximo principal y la deformación máxima principal del testigo de hormigón. Se utiliza la teoría del esfuerzo máximo, debido a que el testigo de hormigón es un material frágil y está siendo sometido a esfuerzos de impactos. Quedando como se muestra en la figura 3.21.

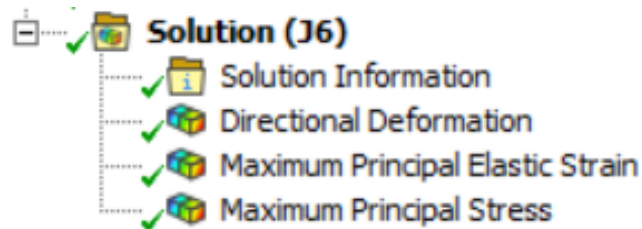


Figura 3.21: Soluciones requeridas del análisis en ANSYS.

Capítulo 4

Resultados y análisis

A continuación, se presentarán los resultados de las simulaciones en una tabla donde se resumirá toda la información y se confeccionarán gráficos de los resultados. Posteriormente, se realizará un análisis de los resultados obtenidos con un ejemplo visual.

4.1. Resultados de las simulaciones

La tabla 4.1 presenta los datos obtenidos de la simulación de impactos mediante elementos finitos, los cuales fueron medidos en el testigo de hormigón.

Dureza	Espesor Caucho Reciclado	Esfuerzo Máximo Principal	Deformación Máxima Principal	Deformación Máxima
[°]	[Inch]	[Mpa]	[mm/mm]	[mm]
55	0,5	3,0443	$1,44540 \cdot 10^{-4}$	$8,0586 \cdot 10^{-3}$
	1,0	1,3403	$5,6399 \cdot 10^{-5}$	$2,7377 \cdot 10^{-3}$
	1,5	0,98801	$3,8597 \cdot 10^{-5}$	$1,72660 \cdot 10^{-3}$
60	0,5	2,9534	$1,49660 \cdot 10^{-4}$	$9,0182 \cdot 10^{-3}$
	1,0	1,4351	$6,1381 \cdot 10^{-5}$	$3,0453 \cdot 10^{-3}$
	1,5	1,0952	$4,2799 \cdot 10^{-5}$	$1,98070 \cdot 10^{-3}$
65	0,5	2,9629	$1,52940 \cdot 10^{-4}$	$1,04170 \cdot 10^{-2}$
	1,0	1,5444	$6,6916 \cdot 10^{-5}$	$3,4173 \cdot 10^{-3}$
	1,5	1,1892	$4,6505 \cdot 10^{-5}$	$2,17730 \cdot 10^{-3}$
70	0,5	2,8958	$1,53820 \cdot 10^{-4}$	$1,23810 \cdot 10^{-2}$
	1,0	1,7204	$7,5016 \cdot 10^{-5}$	$3,9041 \cdot 10^{-3}$
	1,5	1,3189	$5,1393 \cdot 10^{-5}$	$2,56860 \cdot 10^{-3}$
Sin Caucho Reciclado		78,714	0,052867	1,2552

Tabla 4.1: Resultados de las simulaciones.

Espesor Caucho Reciclado	Disminución Esfuerzo Máximo Principal	Disminución Deformación Máxima Principal	Disminución Deformación Máxima
[inch]	[%]	[%]	[%]
0,5	96,2 %	98,9 %	99,2 %
1	98,1 %	99,5 %	99,7 %
1,5	98,5 %	99,7 %	99,8 %

Tabla 4.2: Disminución en porcentaje de los resultados al utilizar caucho reciclado.

Como se puede ver en la tabla anterior, los esfuerzos y deformaciones del impacto original disminuyen considerablemente por utilizar caucho reciclado, en más de un 96 % al utilizar un espesor a partir de 0,5 pulgadas.

4.2. Gráficas de los resultados

Se realizan tres tipos de gráficas, en las cuales se compara la dureza del caucho reciclado utilizado, siendo estas:

- Esfuerzo máximo principal medido en el testigo de hormigón contra el espesor de caucho reciclado colocado sobre el testigo de hormigón.
- Deformación máxima principal medida en el testigo de hormigón contra el espesor de caucho reciclado colocado sobre el testigo de hormigón.
- Deformación máxima medida en el testigo de hormigón contra el espesor de caucho reciclado colocado sobre el testigo de hormigón.

4.2.1. Gráficas considerando el testigo de hormigón recubierto

En las siguientes tres gráficas, Figura 4.1, 4.2 y 4.3, se incluyen los resultados del testigo de hormigón al descubierto como si tuviese un espesor de caucho reciclado de 0 pulgadas. En estas gráficas se puede observar un comportamiento de decaimiento exponencial, esto debido a que si el caucho reciclado tiende a cero el impacto debería ser equivalente al hormigón descubierto y si el caucho reciclado tiende a infinito el impacto debería tender a cero. Además, con la escala utilizada se puede apreciar que no existe un cambio significativo en los resultados por la variación en la dureza, quedando los resultados para cada dureza sobrepuestos.

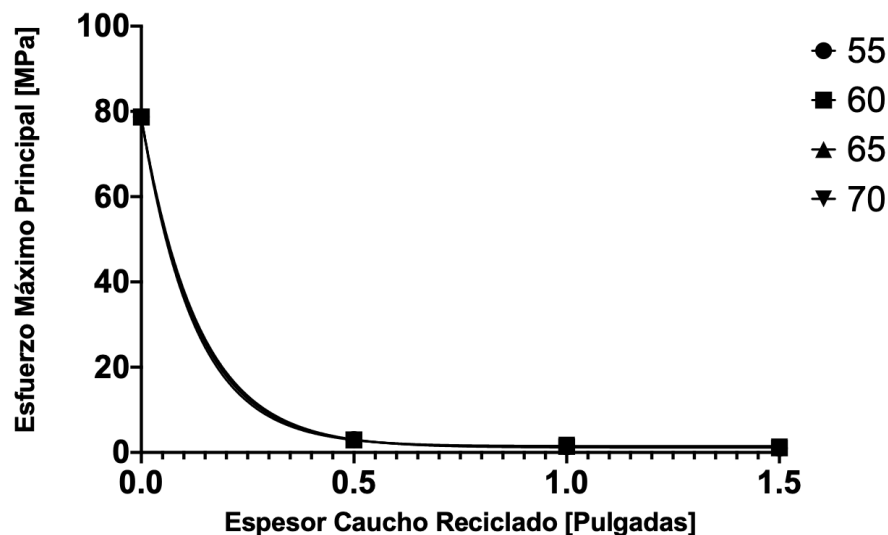


Figura 4.1: Gráfica comparativa de esfuerzo máximo principal contra espesor de caucho reciclado, considerando el hormigón al descubierto.

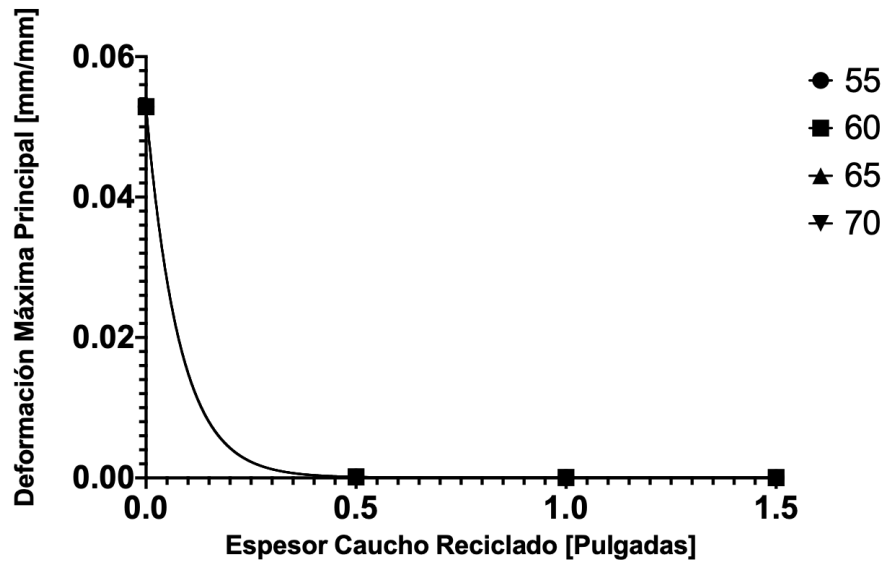


Figura 4.2: Gráfica comparativa de deformación máxima principal contra espesor de caucho reciclado, considerando el hormigón al descubierto.

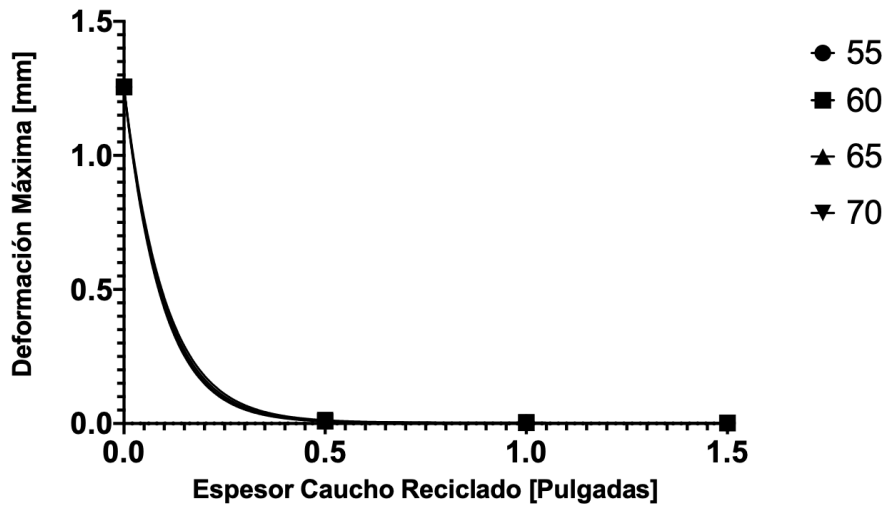


Figura 4.3: Gráfica comparativa de deformación máxima contra espesor de caucho reciclado, considerando el hormigón al descubierto.

4.2.2. Gráficas sin considerar el hormigón descubierto

En estas gráficas no se considera el hormigón al descubierto, con el fin de poder comparar de mejor manera los resultados cuando se varía la dureza. Se observa, que se mantiene el comportamiento de decaimiento exponencial, pero, con esta nueva escala se puede ver

que a medida que aumenta la dureza del caucho reciclado disminuyen las propiedades de amortiguamiento, como se muestra en los tres gráficos a continuación:

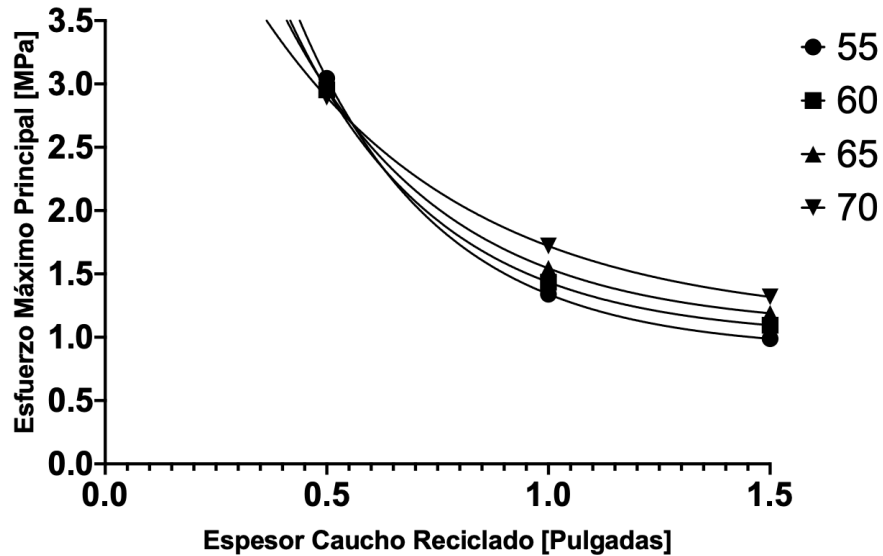


Figura 4.4: Gráfica comparativa de esfuerzo máximo principal contra espesor de caucho reciclado, sin considerar el hormigón al descubierto.

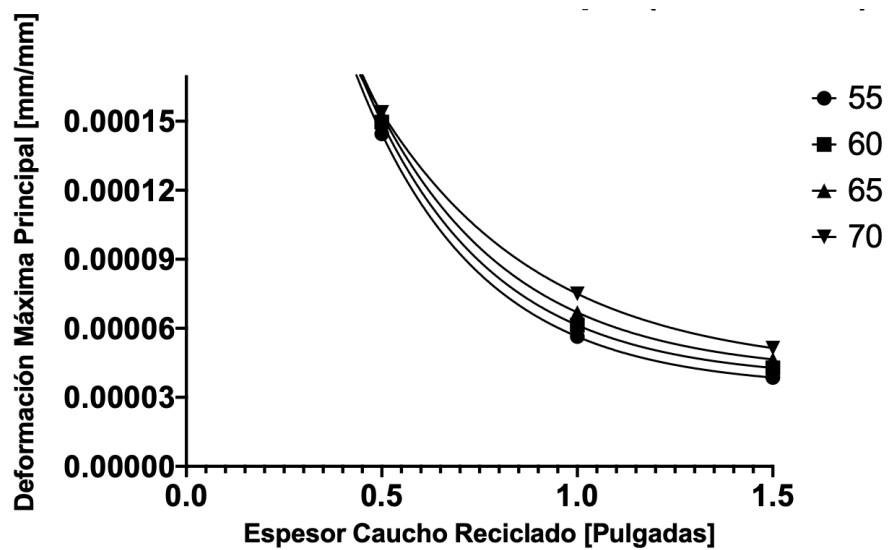


Figura 4.5: Gráfica comparativa de deformación máxima principal contra espesor de caucho reciclado, sin considerar el hormigón al descubierto.

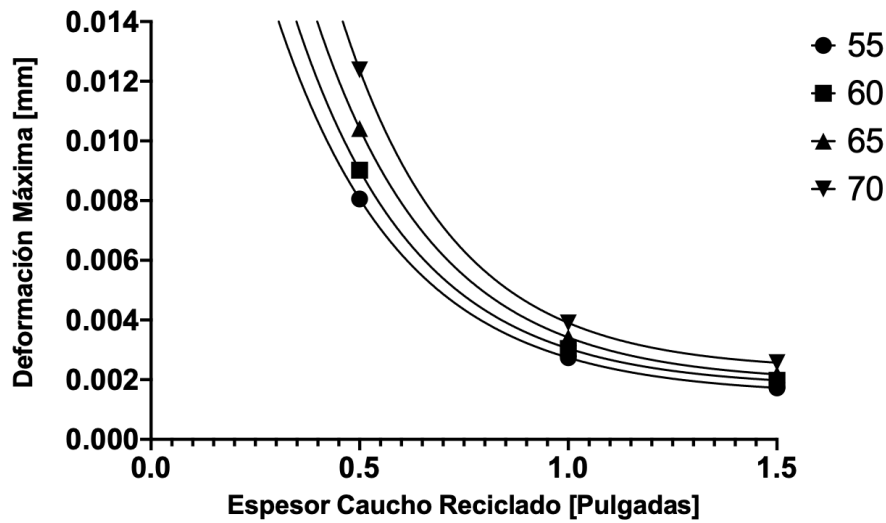


Figura 4.6: Gráfica comparativa de deformación máxima contra espesor de caucho reciclado, sin considerar el hormigón al descubierto.

4.3. Análisis de los resultados

Considerando los resultados de las simulaciones se puede decir que:

1. Utilizar caucho reciclado disminuye significativamente el impacto que recibe el hormigón y entre menor sea la dureza del caucho reciclado mayor será el amortiguamiento de este, disminuyendo así el impacto que recibe el hormigón.
2. Si bien, la amortiguación aumenta con la disminución de la dureza del caucho reciclado, el factor más relevante es el espesor del caucho reciclado, disminuyendo en más de un 96 % los resultados del impacto original al utilizar un espesor de caucho desde 0,5 pulgadas.
3. La curva espesor de caucho reciclado contra esfuerzo máximo principal, deformación máxima principal y deformación máxima, se puede describir como un decaimiento exponencial. Cuando el espesor del caucho reciclado es 0, los valores del impacto serán los del hormigón al descubierto y cuando el espesor del caucho reciclado sea lo suficientemente grande, los valores del impacto serán de aproximadamente 0.

A continuación, se muestre un ejemplo gráfico de la diferencia al utilizar caucho reciclado contra no utilizarlo:

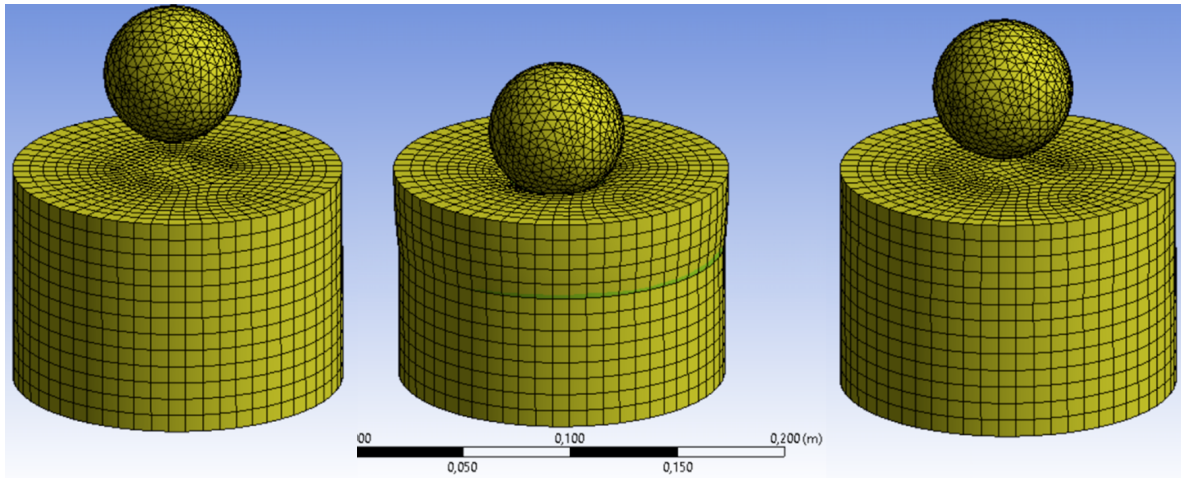


Figura 4.7: Ejemplo del impacto de la bola acero sobre el testigo de hormigón recubierto con caucho reciclado.

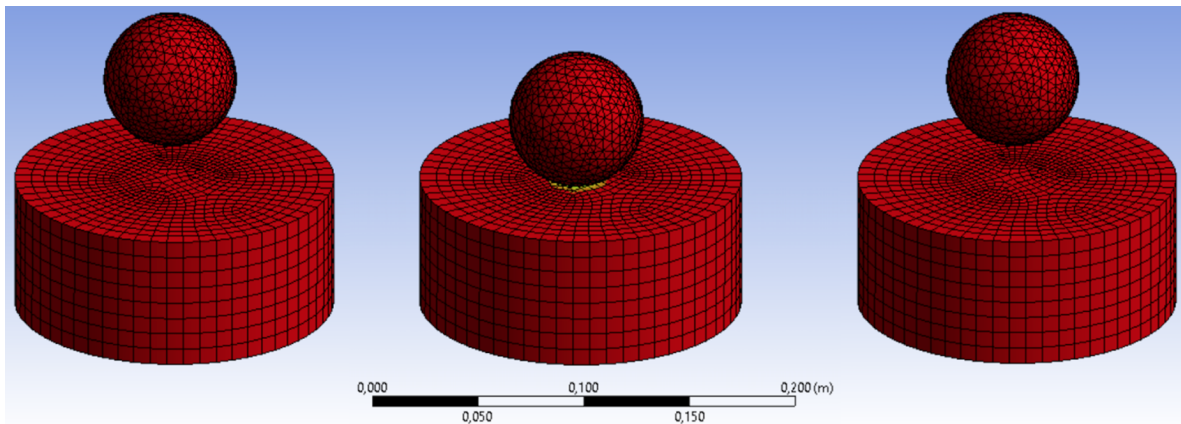


Figura 4.8: Ejemplo del impacto de la bola acero sobre el testigo de hormigón descubierto.

Como se observa en las figuras anteriores, el caucho reciclado se deforma elásticamente absorbiendo el impacto que recibe el hormigón, produciendo un menor daño en este.

Conclusiones

De acuerdo a la información expuesta al inicio de este documento, en el mundo y en Chile se proyecta un aumento significativo en la generación de residuos, esperándose que este aumento esté relacionado con el PIB de cada país y que los países con un mayor PIB incrementen en menor porcentaje su generación de residuos. Esto, principalmente porque los países con un mayor PIB generan más residuos que los países con un menor PIB, y también, a que sus economías empiezan a estar menos ligadas al consumo de materias primas. Dado lo anterior, el aumento en los residuos crea la necesidad de incrementar la recolección y tratamiento de éstos, evitando así, un problema medioambiental.

En el marco de la Ley REP, se hace responsable de los residuos a los productores de ciertos productos prioritarios, cuando estos cumplan su vida útil, siendo escogidos por su impacto ambiental. En el caso de los neumáticos, al ser elaborados de caucho, fueron considerados dentro del listado de productos prioritarios, ya que al ser un material que no es biodegradable se hace necesario su reciclaje para evitar su acumulación. El reciclaje del caucho, como se estudió, es un proceso que no cambia su microestructura, conservando sus propiedades mecánicas como la hiperelásticidad, propiedad que le permite soportar grandes deformaciones sin que estas sean permanentes.

Para modelar el comportamiento del caucho reciclado, cuando es sometido a impactos, se utilizó el software de elementos finitos ANSYS, siendo el módulo de dinámica el mas idóneo para el análisis. El software ANSYS, permitió analizar el material mucho antes de que su construcción se lleve a cabo, ahorrando costos y tiempos. El modelo, fue una modificación del ensayo ACI 544. Esta modificación, permitió simplificar la simulación y reducir el tiempo de

ésta, eliminando geometrías de soporte que no son necesarias en la simulación y la geometría del martillo, al hacer que la bola de acero fuese la que impacte a los testigos, transformando la energía potencial en cinética. En el análisis, se cuantificó el daño producido en el testigo de hormigón y se compararon los resultados con el testigo de hormigón al descubierto, viendo como cambian los resultados al variar el espesor y la dureza del caucho reciclado.

Es importante señalar, que los parámetros automáticos del software ANSYS no siempre son los más adecuados, pudiendo inducir en errores de los resultados, por este motivo, no se utilizó el tamaño de malla automático, y en cambio, se disminuyó hasta que los resultados converjan. Tampoco, se ocupó el tiempo automático entre iteración, para asegurar que el número de Courant se mantuviera menor a 1, y así, evitar que la velocidad de propagación de la onda mecánica del impacto atravesase más de una celda a la vez.

Basado en los resultados, se puede decir que utilizar caucho reciclado disminuye significativamente el impacto recibido por el testigo de hormigón, comportándose todos los resultados como una curva de decaimiento exponencial. La curva, comienza con el impacto en el hormigón al descubierto y disminuye a medida que aumenta el espesor del caucho reciclado. Además, se observa que a medida que aumenta la dureza del caucho reciclado, asimismo aumenta el daño que recibe el hormigón, pero, en escala, no es comparable con el cambio de los resultados al variar el espesor del caucho reciclado.

En conclusión, el caucho reciclado es un excelente amortiguador de impactos y su utilización evitaría un daño permanente en el material ubicado debajo de él, permitiendo darle un segundo uso a los restos de neumáticos, lo que impulsaría un aumento en el reciclaje de este producto prioritario.

Referencias

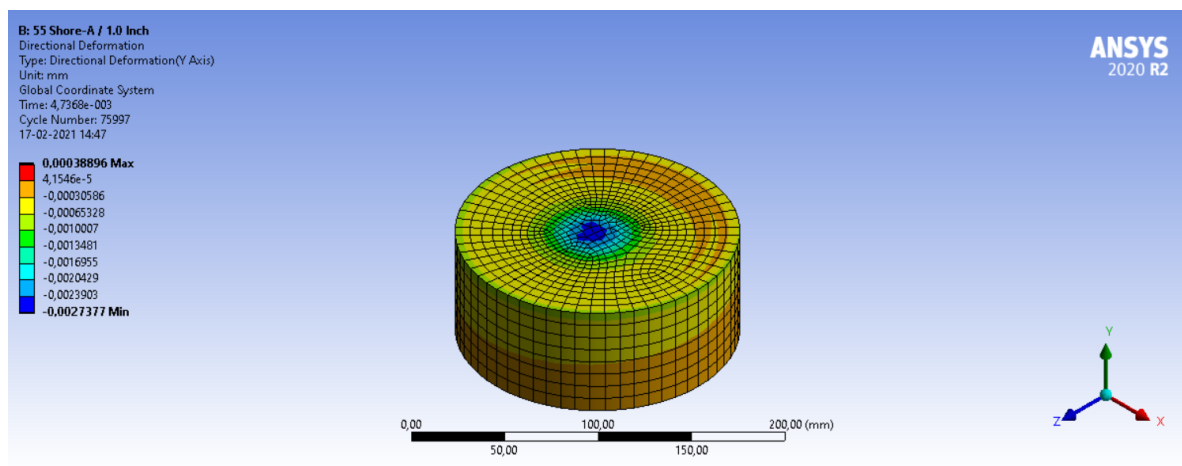
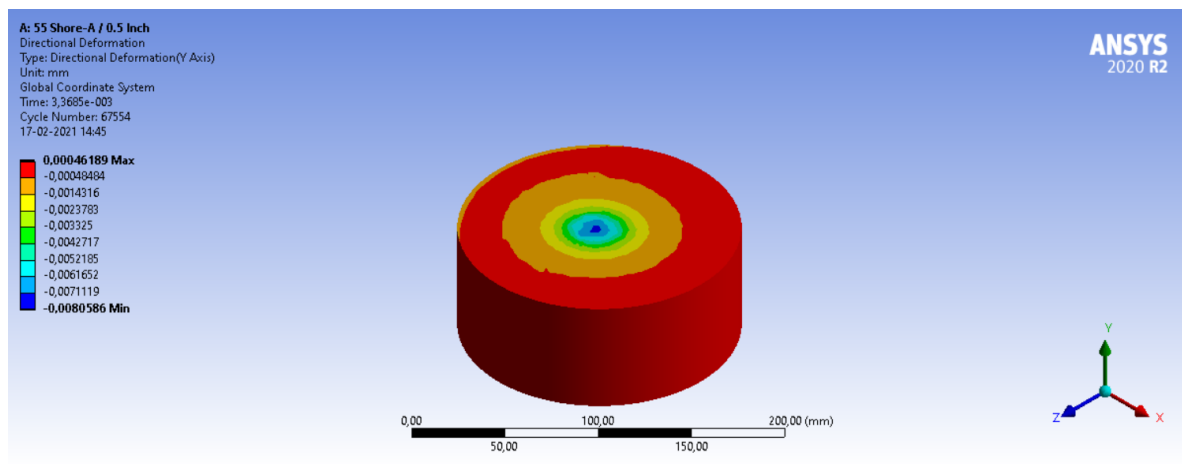
- [1] ACI 544.2R-89, (1989), “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete”, American Concrete Institute.
- [2] RUBTEC, (s. f.), Pisos infantiles [Fotografía], <https://rubtec.cl/productos/wp-content/uploads/2021/01/categoria-pisos-de-caucho.jpg>
- [3] RUBTEC, (s. f.), Pisos gimnasio [Fotografía], <https://rubtec.cl/productos/wp-content/uploads/2021/01/pesas-y-barras02.jpg>
- [4] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Woerden, V. F., (2018), “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050”, World Bank Publications.
- [5] Paredes, E., (2020, 29 de diciembre), Basural en la ruta U-55 preocupa a vecinos de Osorno: Manifiestan que se ha convertido en un vertedero, Radio-Sago. <https://www.rudiosago.cl/basural-en-la-ruta-u-55-preocupa-a-vecinos-de-osorno-manifiestan-que-se-ha-convertido-en-un-vertedero/>
- [6] A., (2018, 13 de mayo), Tribunal Ambiental condenó al relleno Santa Marta por contaminar el agua, CodeXVerde. <https://codexverde.cl/tribunal-ambiental-condeno-al-relleno-santa-marta-por-contaminar-el-agua/>
- [7] A., (2020, 6 de enero), Biobío: multan al relleno sanitario Hidronor de Copiulemu por múltiples fallas, CodeXVerde. <https://codexverde.cl/biobio-multan-al-relleno-sanitario-hidronor-de-copiulemu-por-multiples-fallas/>

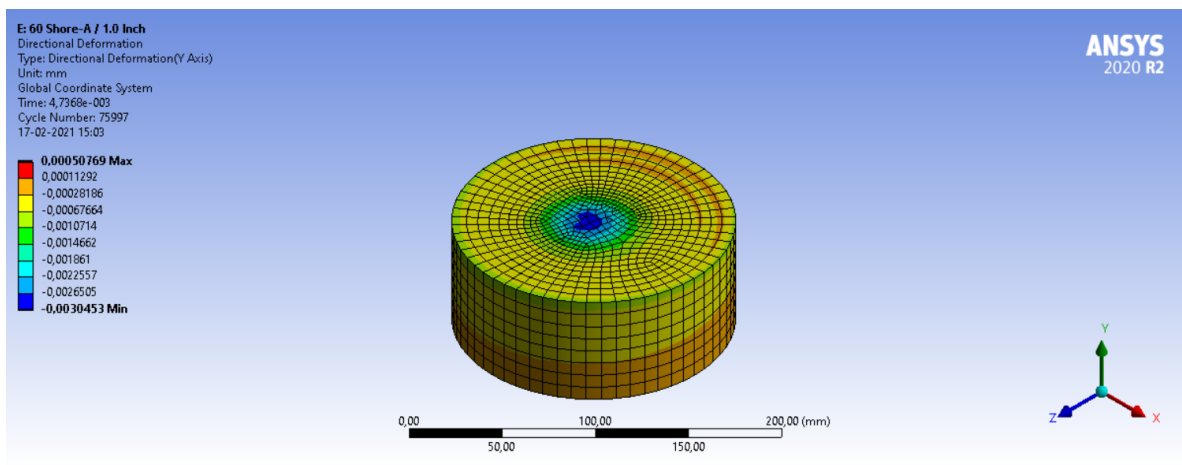
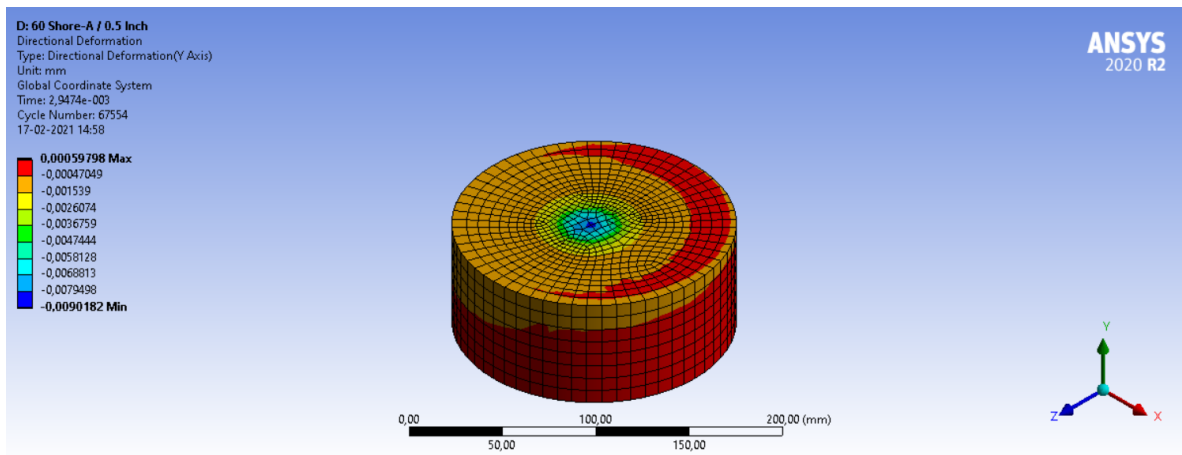
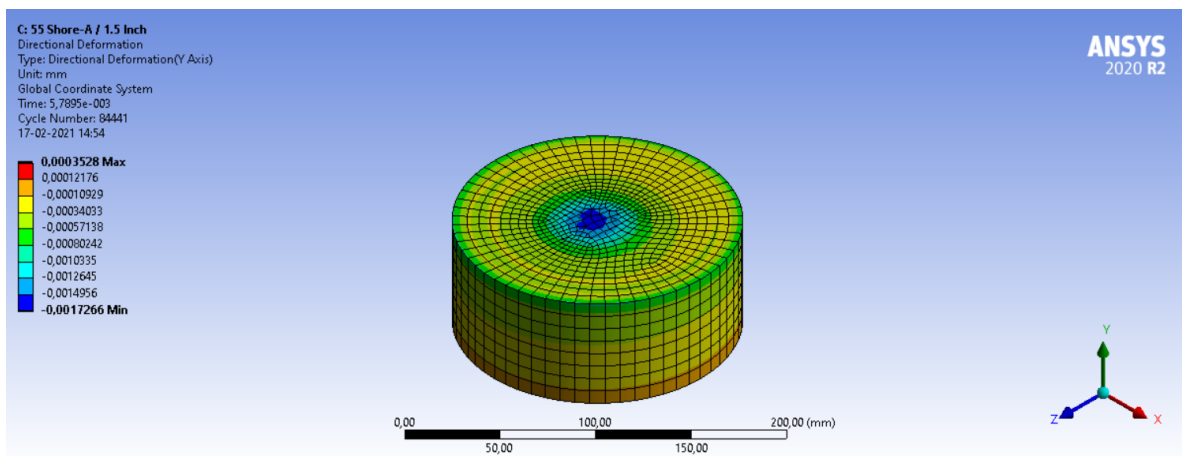
- [8] Olavarría, J. (2019, 17 de septiembre), La otra cara de Chiloé: basura desborda la isla y plan de emergencia amenaza con contaminar las aguas subterráneas, El Mostrador. <https://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2019/09/17/la-otra-cara-de-chiloe-basura-desborda-la-isla-y-plan-de-emergencia-amenaza-con-contaminar-las-aguas-subterraneas/>
- [9] Ministerio del Medio Ambiente. (s. f.). Ley de fomento al Reciclaje. <https://mma.gob.cl/economia-circular/ley-de-fomento-al-reciclaje/>
- [10] Ley N° 20920, (2016), Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje, Diario Oficial de la República de Chile.
- [11] Ministerio del Medio Ambiente, (2018), Cuarto Reporte del estado del medio ambiente, Ministerio del Medio Ambiente. <https://sinia.mma.gob.cl>.
- [12] Esteve, J., (2012, 16 de julio), Reciclaje de Neumáticos: procesos y usos, Reciclaje Verde. <https://reciclajeverde.wordpress.com/2012/06/26/reciclaje-de-neumaticos-procesos-y-usos/>
- [13] BioEnergy Consult, (s. f.), Proceso reciclaje neumáticos [Fotografía], <https://www.bioenergyconsult.com/wp-content/uploads/2019/12/what-is-tire-recycling.jpg>
- [14] ANSYS, (2009), “Workshop 1, Taylor Impact Test, Basic Simulation”, Ansys Explicit Dynamics.
- [15] A. (2020, 6 de enero). “What is Explicit Dynamics in Ansys?”, Mechead. <http://www.mechead.com/what-is-explicit-dynamics-in-ansys/>
- [16] Courant, R.; Friedrichs, K.; Lewy, H. (1928), “Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik”, Mathematische Annalen.
- [17] Koshkin, N., Shirkévich, M., (1975), Manual de Física elemental, Mir Moscú.

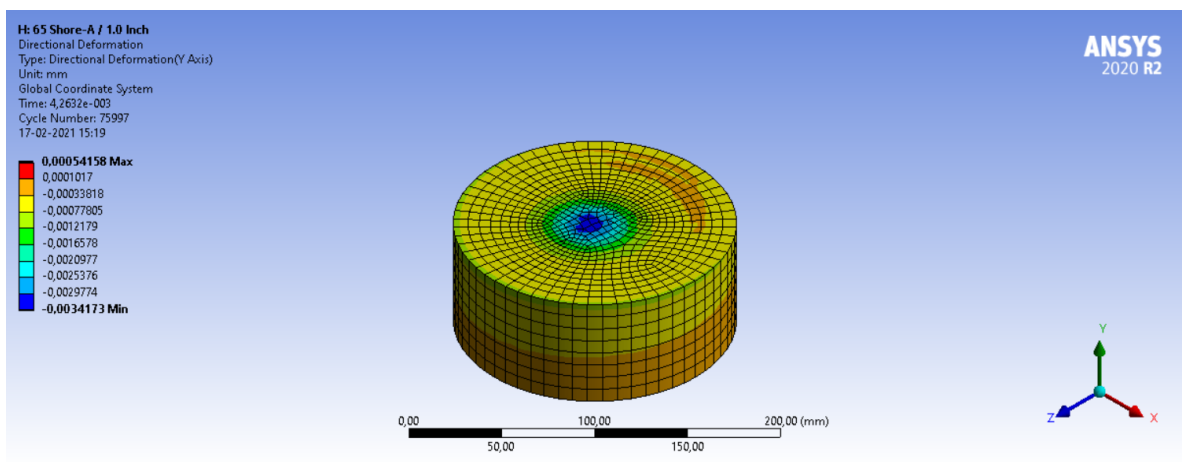
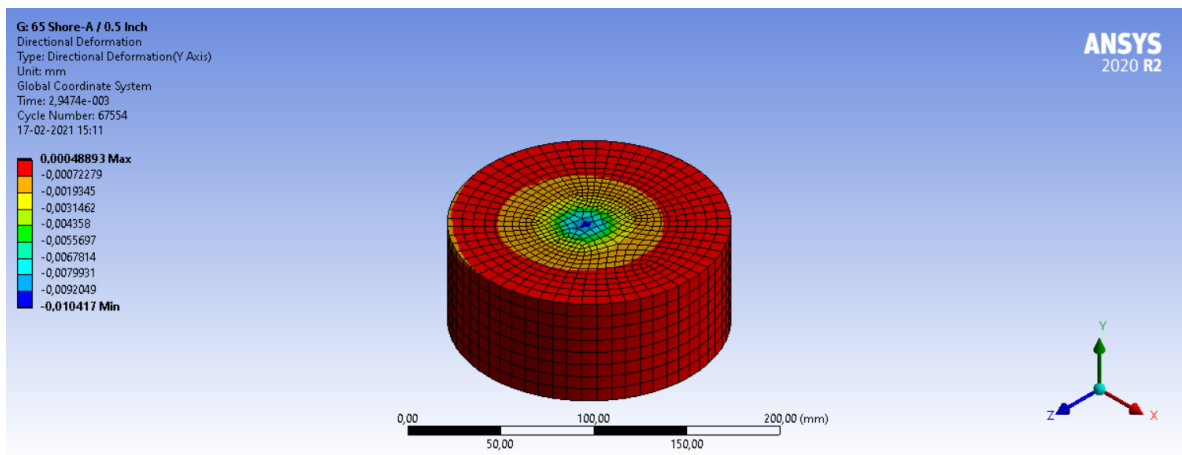
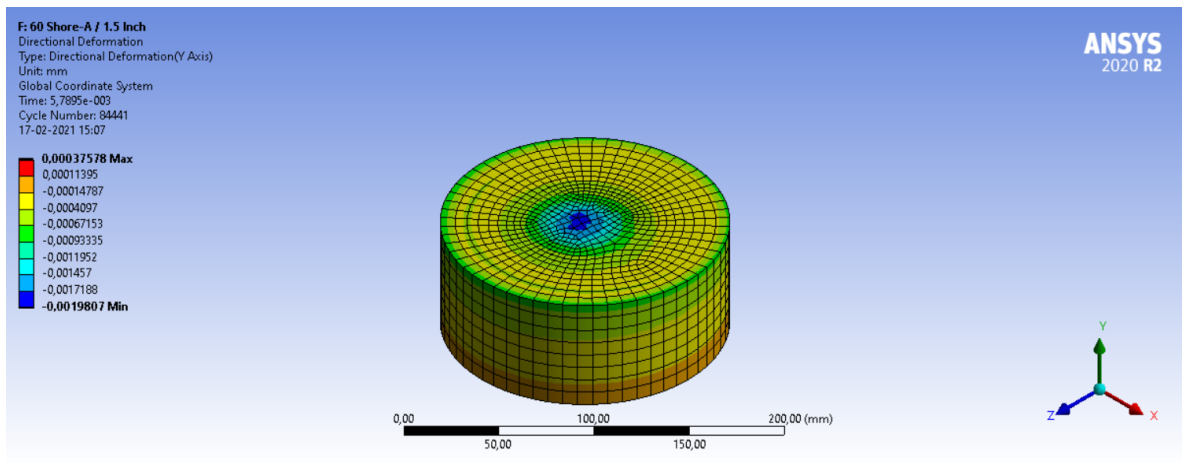
- [18] ÖZGÜN, (2020, 11 de mayo), “Is Your Mesh Good Enough?”, Mechead.
<http://www.mechead.com/mesh-good-enough/>
- [19] Peña, M. (2014). Desarrollo y puesta en marcha de un modelo físico de la hidrodinámica del líquido cefalorraquídeo (Pregrado), Universidad de Sevilla.
- [20] Muñoz, D. (2018). Análisis estructural de un modelo de puente de madera peatonal autoportante ensamblado con uniones carpinteras (sin herrajes) (Pregrado), Universidad Técnica Federico Santa María.
- [21] Altidis, P. A., Warner, B. V., (2005), “Analyzing hyperelastic materials w/some practical considerations”, Midwest ANSYS Users Group.

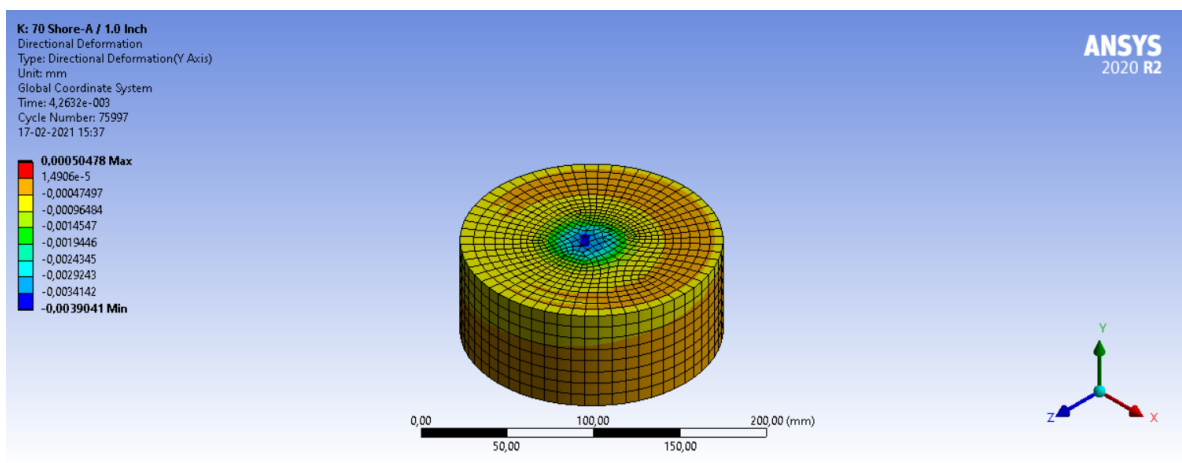
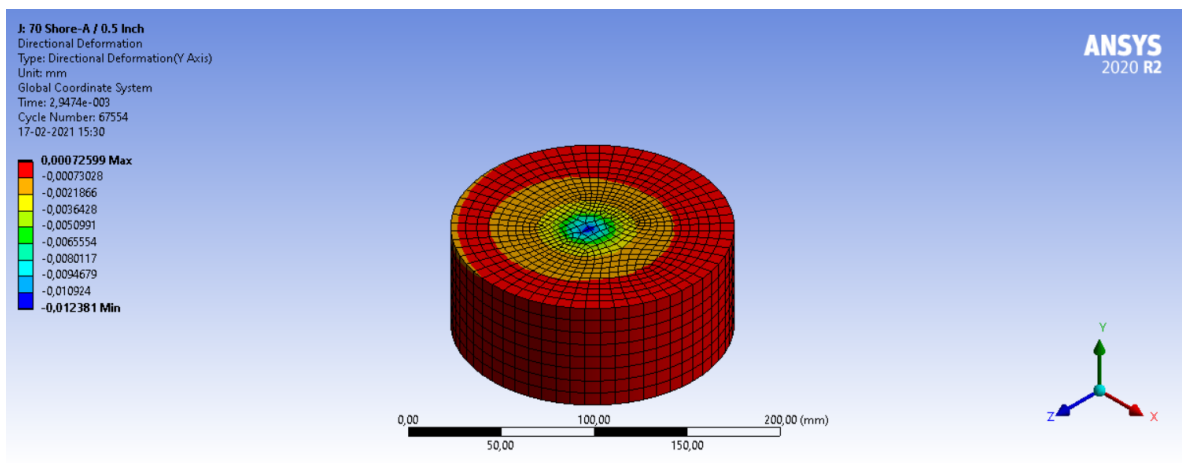
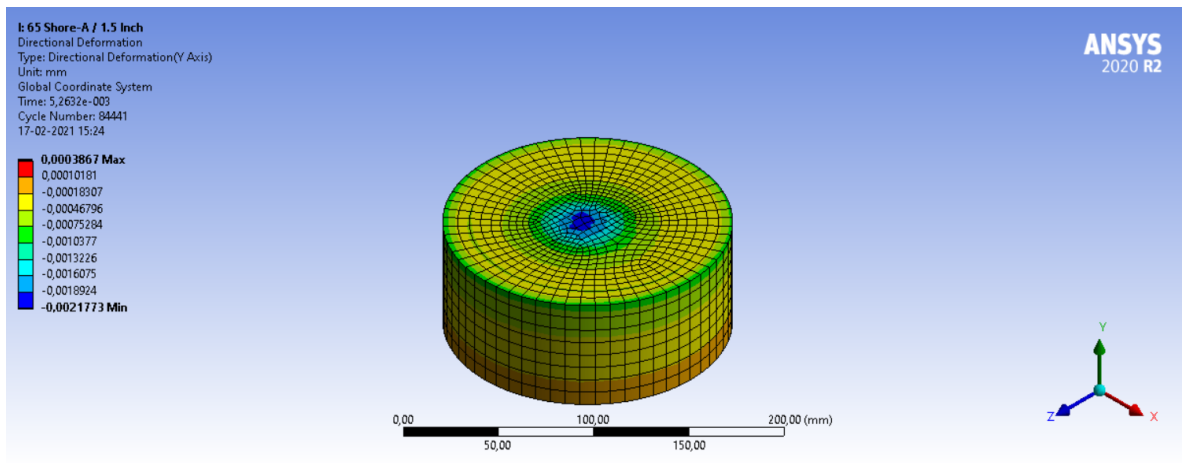
Anexos

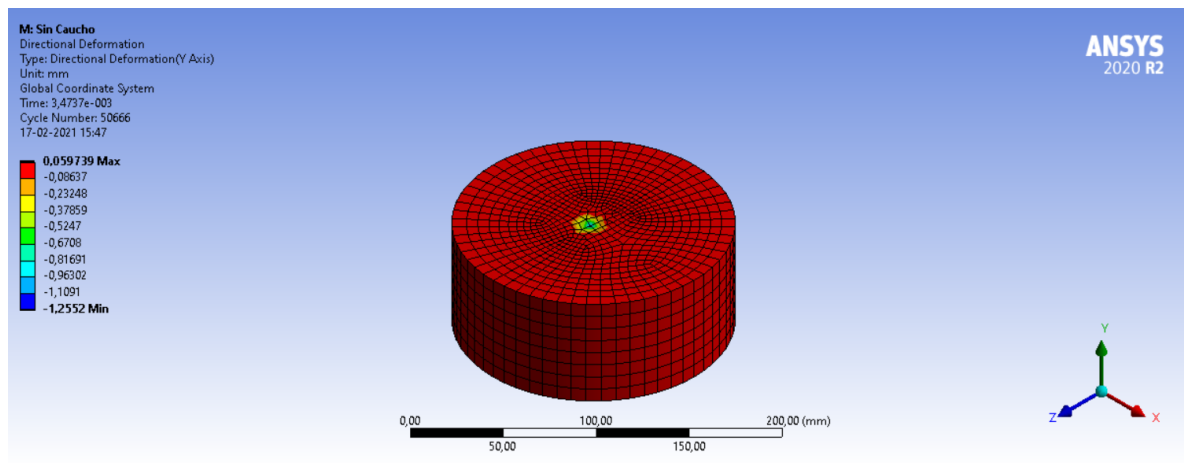
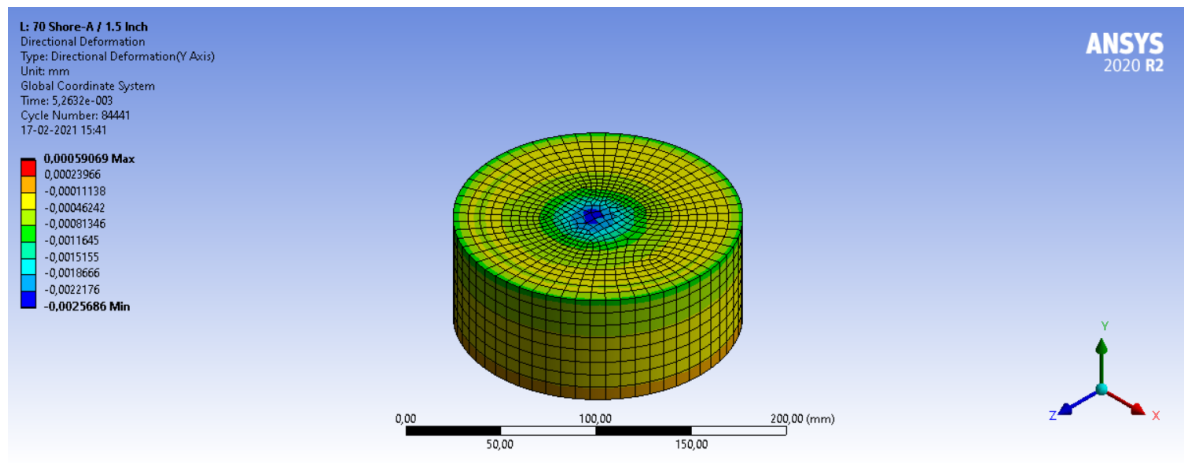
A. Resultados de la Deformación Máxima



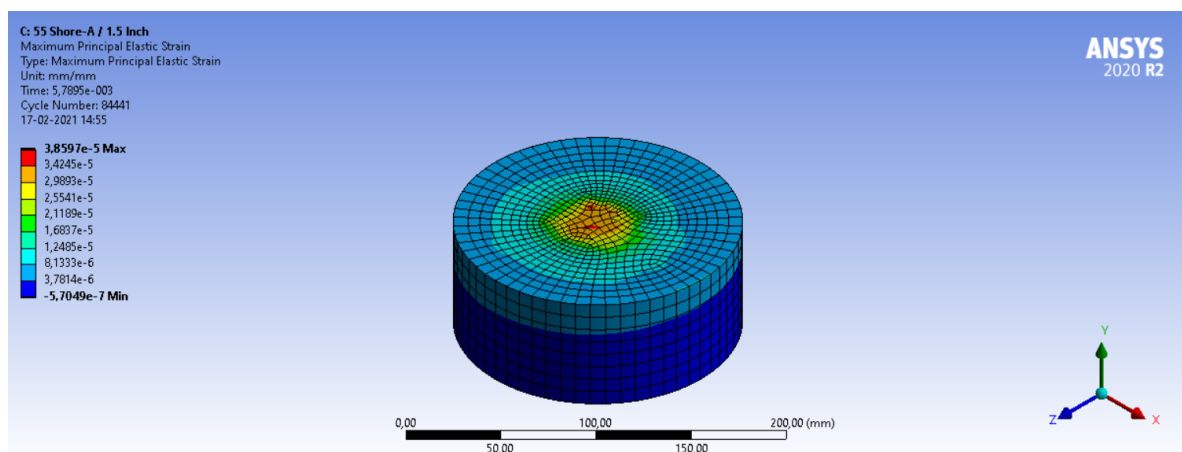
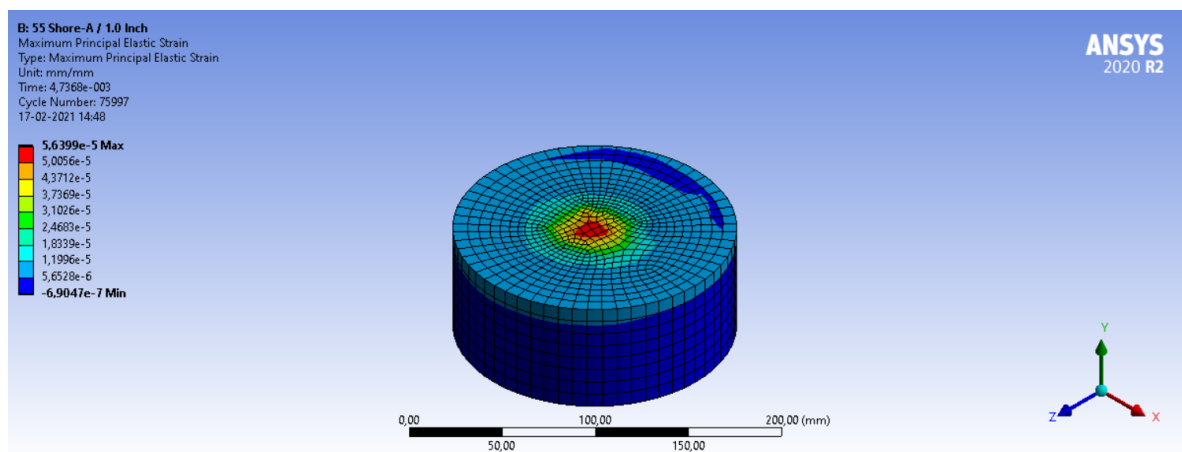
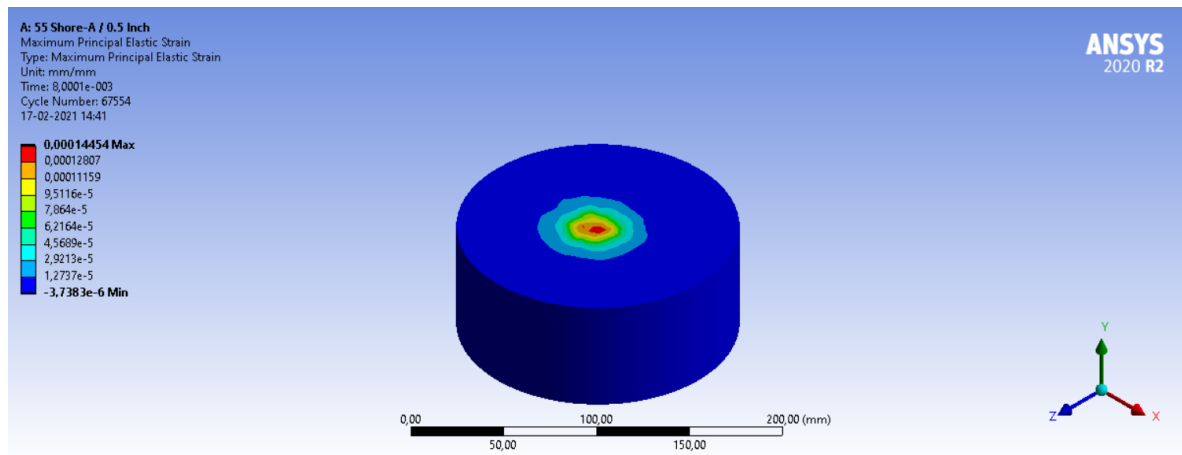


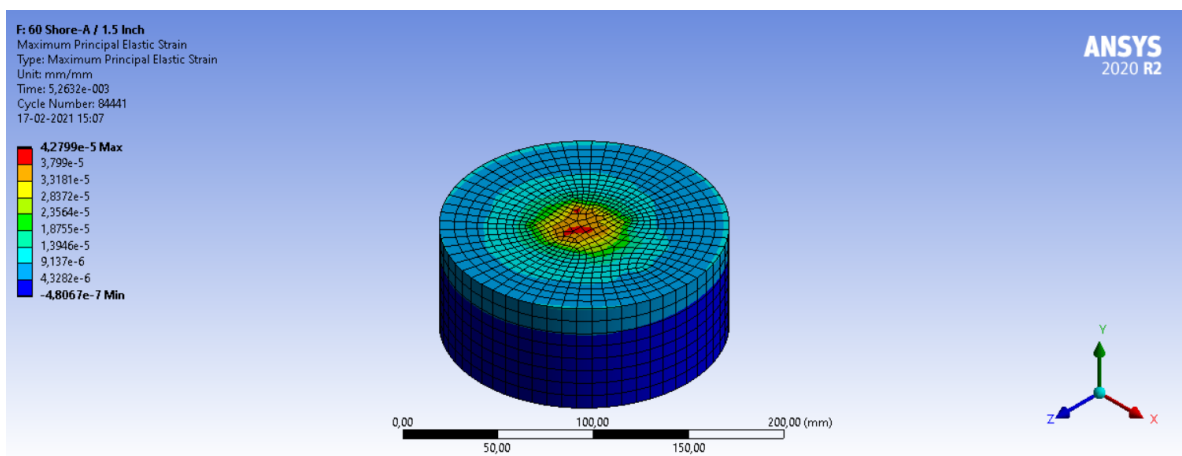
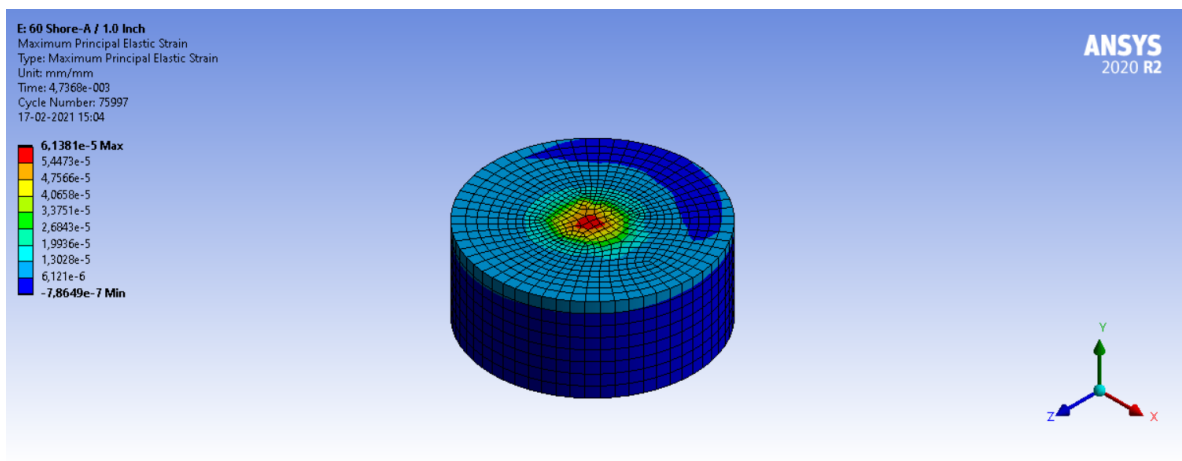
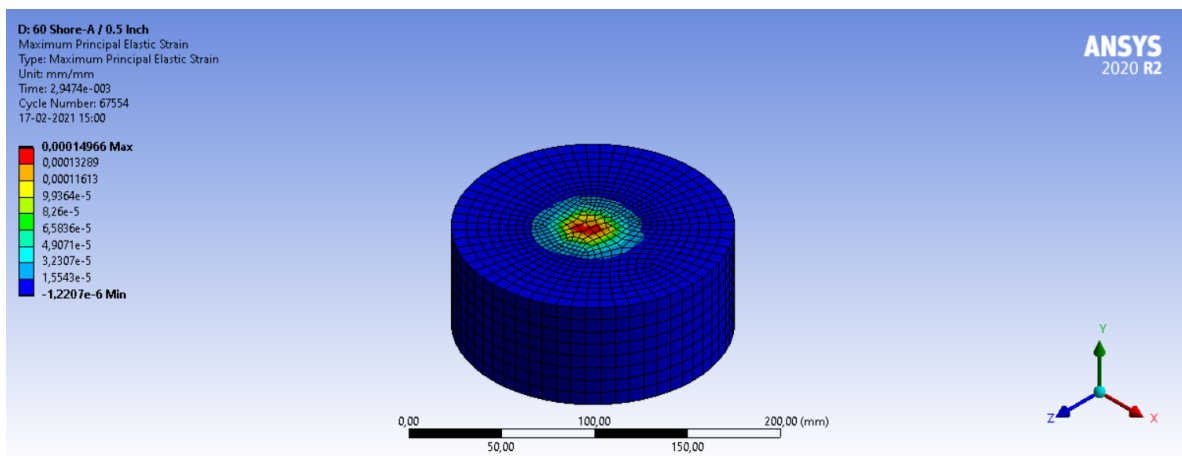


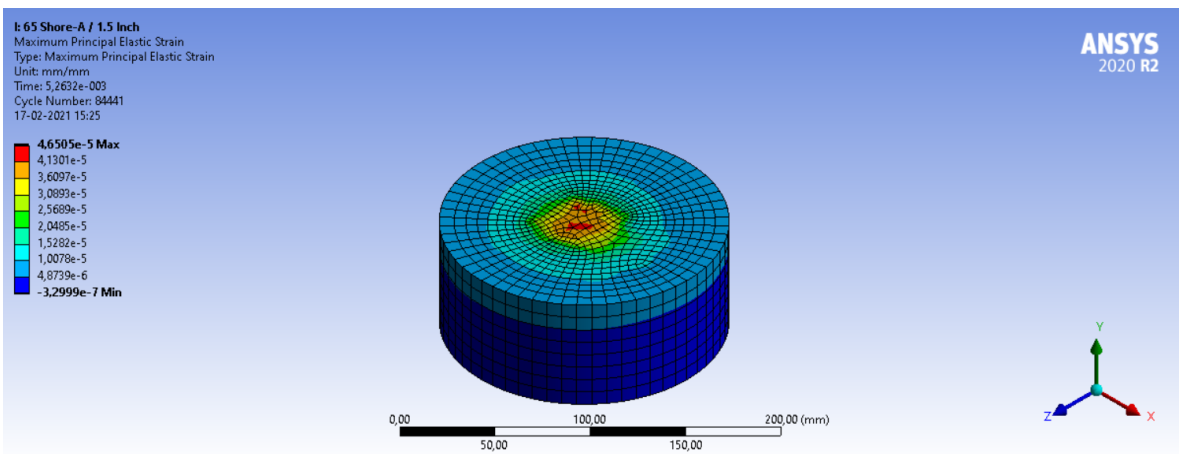
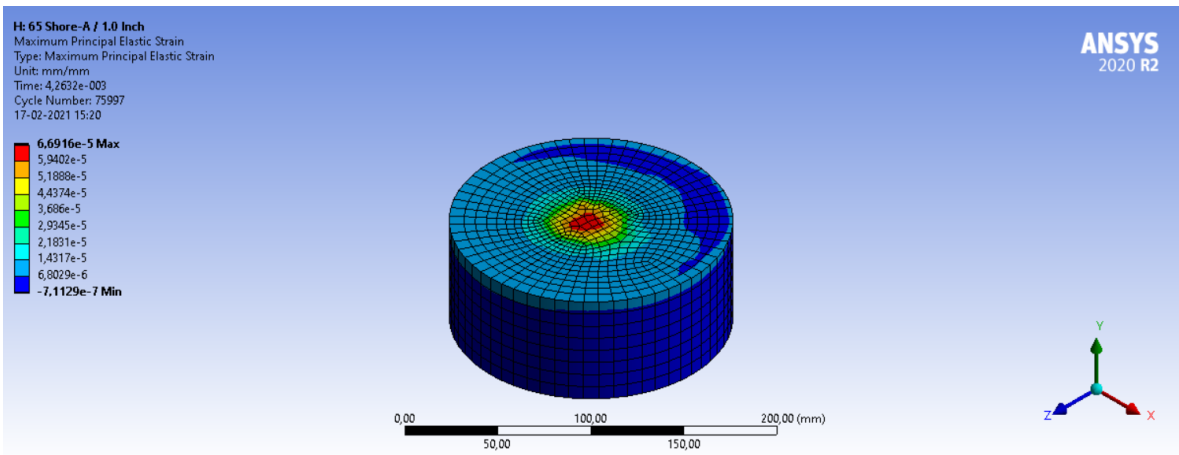
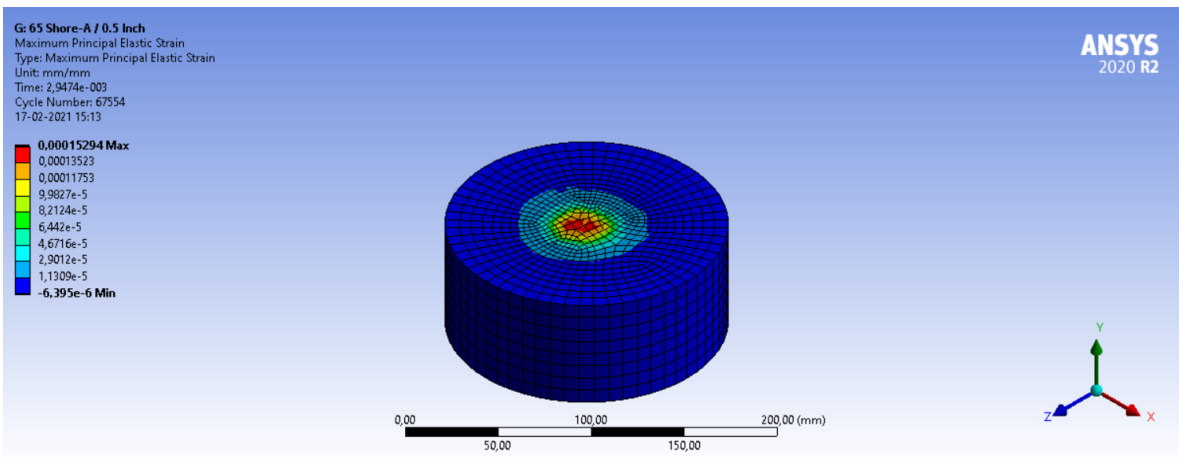


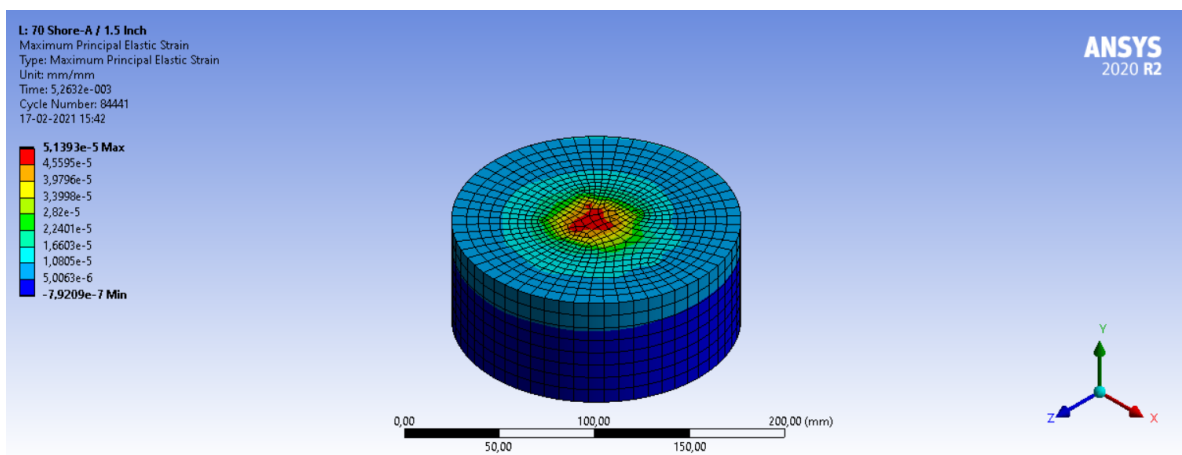
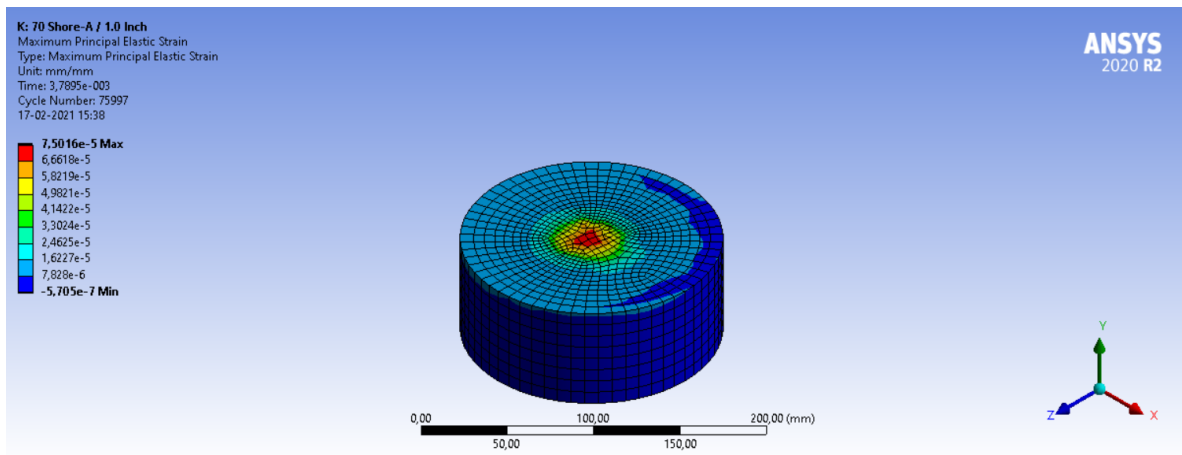
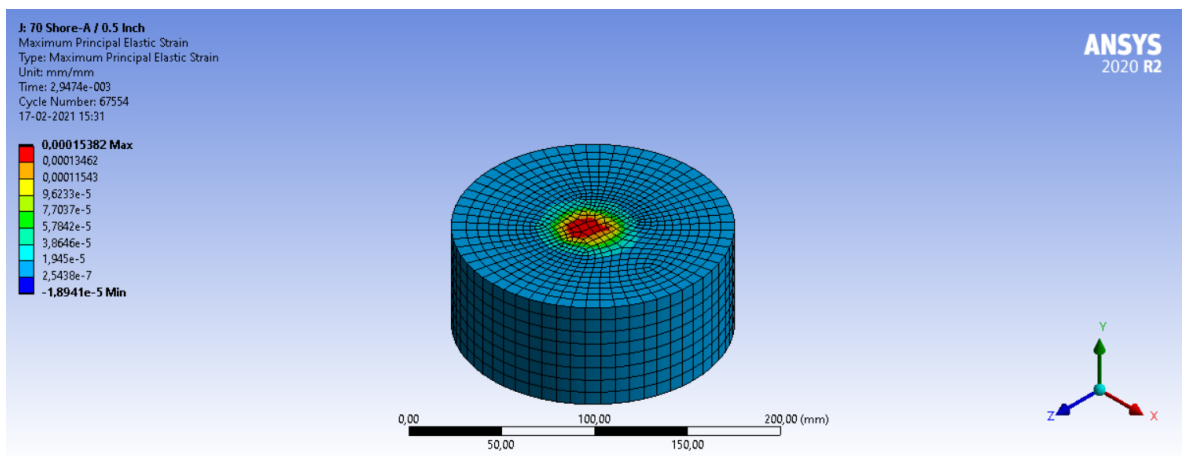


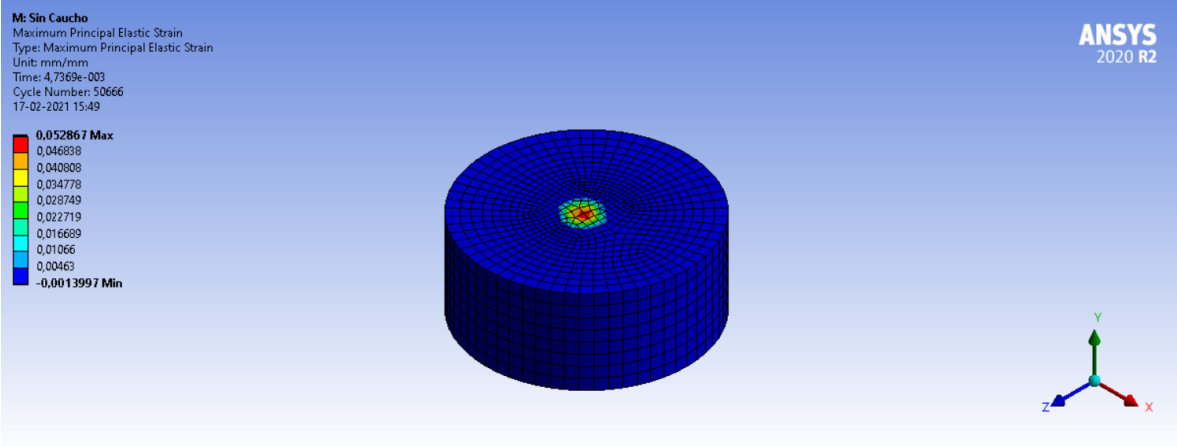
B. Resultados de la Deformación Máxima Principal











C. Resultados del Esfuerzo Máximo Principal

