

CALIBRACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE ELEMENTOS
ESTRUCTURALES CONFORMADOS POR BOTELLAS RELLENAS DE ARENA Y
REFORZADAS CON ACERO CORRUGADO EN EL SOFTWARE ANSYS



JEISSON DAVID PENAGOS SUAREZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

CALIBRACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE ELEMENTOS
ESTRUCTURALES CONFORMADOS POR BOTELLAS RELLENAS DE ARENA Y
REFORZADAS CON ACERO CORRUGADO EN EL SOFTWARE ANSYS

JEISSON DAVID PENAGOS SUAREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniería Civil

Director

MSc. HUGO ALFREDO SILVA RIBÓN

Magíster en Ingeniería civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Mg. LUIS FERNANDO DIAZ CRUZ

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

A mis amados padres, Vitelvina Suárez y Wilson Penagos, les dedico este logro que hoy celebro como es el título de ingeniero civil. Su apoyo incondicional, amor infinito y sacrificios invaluable han sido el pilar fundamental que me ha sostenido a lo largo de este arduo camino. Gracias por creer en mí, por alentarme en cada paso y por ser mi inspiración constante para alcanzar mis metas.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que contribuyeron de alguna manera a la realización de esta tesis final de grado como ingeniero civil.

En primer lugar, quiero agradecer a mis distinguidos profesores y asesores académicos, cuya orientación experta y consejos sabios han sido fundamentales en el desarrollo de este proyecto. Su dedicación y compromiso con mi formación profesional han sido inspiradores y han dejado una huella imborrable en mi trayectoria académica.

Agradezco también a mis compañeros de clase y amigos, quienes compartieron conmigo este viaje lleno de desafíos y aprendizajes. Su apoyo mutuo y camaradería fueron un motor indispensable para superar los obstáculos y alcanzar nuestras metas académicas.

No puedo dejar de mencionar el apoyo incondicional de mi familia, en especial a mis padres y mis hermanos. Su constante aliento, comprensión y amor incondicional han sido mi mayor fortaleza en este camino. Gracias por creer en mí y por ser mi inspiración constante.

Contenido

	Pág.
Resumen	10
Abstract.....	11
1. Introducción.....	12
2. Justificación.....	13
3. Objetivos	14
3.1. Objetivo general	14
3.2. Objetivos específicos.....	14
4. Marco de referencia.....	15
4.1. Marco teórico	15
4.1.1 Método de Elementos Finitos (MEF)	15
4.2. Marco conceptual	17
4.2.1 Comportamiento Estructural de Elementos Compuestos	17
4.2.2 Método de Elementos Finitos (MEF) y su Aplicación en Ingeniería Estructural....	17
4.2.3 Propiedades Mecánicas de Materiales Utilizados: Botellas Rellenas de Arena, concreto y Acero Corrugado	17
4.2.4 Integración de Geometría Específica en el Modelo de Elementos Finitos	19
4.2.5 Calibración de Modelos en el Contexto de Estructuras no Convencionales	19
4.2.6 Aplicaciones Prácticas de la Calibración en Ingeniería Estructural	19
4.3. Estado de arte	19
5. Metodología.....	24
6. Desarrollo del modelo	26
6.1. Generalidades.....	26
6.2. Desarrollo del algoritmo de calibración.....	27
6.3. Parámetros de diseño.....	29
6.3.1 Módulo de elasticidad.....	30
6.3.2 Módulo de elasticidad del plástico.....	30
6.3.3 Módulo de Poisson.....	31
7. Análisis y resultados.....	32

7.1. Análisis por el método de elementos finitos	34
7.2. Resultados	40
7.2.1 Deformaciones	40
7.2.2 Esfuerzos.....	41
8. Conclusiones	43
9. Referencias	44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: <i>Desarrollo Metodológico</i>	24
Tabla 2: Parámetros de diseño para el modelado en Ansys.....	30
Tabla 3: Modulo de elasticidad.....	31
Tabla 4: Propiedades de materiales	35
Tabla 5: Deformaciones calculadas por el Software ANSYS	40
Tabla 6: Deformación calculada en los ensayos de laboratorio.....	40
Tabla 7: Esfuerzos calculados por el Software ANSYS.....	41
Tabla 8: Esfuerzos calculados en los ensayos de laboratorio	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Ubicación prototipo Proyecto Botellas PET	26
Figura 2: Construcción prototipo botellas PET	27
Figura 3: Diagrama de flujo.....	27
Figura 4: Sistema botellas tipo 1.	32
Figura 5: Sistema botellas tipo 2.	32
Figura 6: Descripción montaje botellas tipo 1.....	33
Figura 7: Descripción montaje botellas tipos 2.	33
Figura 8: Discretización general del modelo	34
Figura 9: Desglosé de los elementos a modelar	34
Figura 10: Modelo general de elementos finitos	36
<i>Figura 11:</i> Modelo general de elementos finitos vista en corte.....	36
Figura 12: Graficas de deformación botellas tipo 1.....	37
Figura 13: Graficas de deformación botellas tipo 2.....	38
Figura 14: Graficas de esfuerzo Von-Mises botellas tipo 1	38
Figura 15: Graficas de esfuerzo Von-Mises botellas tipo 2.....	39
Figura 16: Graficas de deformación del concreto en el sistema de botellas tipo 1	39
Figura 17: Graficas de deformación del concreto en el sistema de botellas tipo 2	40

Resumen

El proyecto consiste en la calibración mediante el método de elementos finitos en el software ANSYS de elementos estructurales conformados por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado, con el objetivo de utilizarlos en la construcción de viviendas de interés social con un enfoque en la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente. Se analizan dos tipos de botellas, el cual se le denomino botella 1 y botella 2, evaluando su resistencia bajo condiciones normales de uso y ensayos de laboratorio. Los resultados revelan que la botella 2 muestra una mayor resistencia en condiciones normales, mientras que la botella 1 exhibe una mayor adaptabilidad a situaciones extremas. Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para el diseño y la fabricación de los elementos estructurales, así como para su aplicación en proyectos de vivienda de interés social. Se enfatiza la necesidad de ajustar el diseño y los materiales para garantizar la seguridad y la sostenibilidad de las estructuras, así como la realización de pruebas exhaustivas para validar los modelos de elementos finitos y cumplir con los estándares de calidad y seguridad requeridos.

Palabras Clave: Elementos finitos, Botellas rellenas de arena, Reforzadas con acero corrugado, ANSYS, Viviendas de interés social, Sostenibilidad.

Abstract

The project consists of the calibration using the finite element method in ANSYS software of structural elements made of bottles filled with sand and reinforced with corrugated steel, with the objective of using them in the construction of low-income housing with a focus on sustainability and environmental care. Two types of bottles were analyzed, bottle 1 and bottle 2, evaluating their resistance under normal conditions of use and laboratory tests. The results reveal that bottle 2 shows greater resistance under normal conditions, while bottle 1 exhibits greater adaptability to extreme situations. These findings have important implications for the design and fabrication of structural elements, as well as for their application in social housing projects. The need to adjust the design and materials to ensure the safety and sustainability of the structures is emphasized, as well as the need for extensive testing to validate the finite element models and meet the required quality and safety standards.

Key Word: Finite elements, Sand-filled bottles, Reinforced with corrugated steel, ANSYS, Social housing, Sustainability.

1. Introducción

En el ámbito de la ingeniería estructural, la búsqueda constante de soluciones innovadoras y sostenibles para la construcción de edificios y estructuras ha llevado a explorar materiales y métodos poco convencionales que puedan mejorar la eficiencia y la economía de proyectos. Una de estas áreas de investigación se centra en la utilización de elementos estructurales conformados por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado. Estos elementos, aparentemente simples, pero de gran versatilidad, han despertado un interés creciente debido a su potencial para reducir costos, reciclar materiales y contribuir a la sostenibilidad en la construcción.

El presente proyecto se enfoca en la calibración de un modelo mediante el empleo del método de elementos finitos en el software Ansys, buscando no solo evaluar la viabilidad técnica de esta innovadora forma de construcción, sino también comprender su comportamiento estructural y su aplicabilidad en proyectos reales.

La combinación de botellas rellenas de arena y acero corrugado representa una propuesta única en la ingeniería estructural, ya que integra materiales fácilmente accesibles y asequibles con tecnología avanzada de simulación numérica, cabe resaltar, que la consecución exitosa de este proyecto puede abrir nuevas puertas para la construcción sostenible, reducir la huella ecológica y ampliar las opciones de diseño en un sector que busca constantemente la optimización de recursos.

2. Justificación

La justificación de este proyecto radica en la necesidad de evaluar el comportamiento estructural de las botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado, para determinar su resistencia y durabilidad bajo diferentes condiciones de carga. Este tipo de estructuras son cada vez más utilizadas en la construcción de viviendas económicas y sostenibles, por lo que es importante contar con herramientas de simulación para optimizar su diseño y asegurar su estabilidad y seguridad.

El uso del software Ansys permite realizar un análisis de elementos finitos, para simular el comportamiento de las botellas en un entorno virtual, evitando la necesidad de llevar a cabo pruebas costosas y prolongadas en la vida real. Además, el análisis de elementos finitos permite identificar áreas críticas de tensión y deformación en la estructura, lo que ayuda a mejorar el diseño y la eficiencia.

En resumen, la justificación de este proyecto radica en la necesidad de contar con herramientas de simulación para evaluar el comportamiento estructural de las botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado, para optimizar su diseño, asegurar su estabilidad y seguridad, y promover su uso en la construcción de viviendas económicas y sostenibles.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Desarrollar el modelo de elementos finitos de elementos estructurales conformados por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado para simular su comportamiento real mediante el software Ansys.

3.2. Objetivos específicos

- Diseñar y modelar en 3D las botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado en el software Ansys.
- Definir las condiciones de carga y restricciones en el modelo para simular su comportamiento real.
- Comparar los resultados obtenidos en el análisis con datos experimentales para validar la precisión del modelo.
- Documentar los resultados del análisis y las recomendaciones para su implementación en futuros proyectos.

4. Marco de referencia

4.1. Marco teórico

4.1.1 Método de Elementos Finitos (MEF)

Fundamentos teóricos del método de elementos finitos

Descripción de la teoría de elementos finitos como método numérico en ingeniería estructural: El método de elementos finitos es una técnica numérica utilizada para aproximar soluciones a ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento de estructuras. Se basa en dividir el dominio continuo en pequeños elementos finitos conectados entre sí mediante nodos, permitiendo así la representación discreta del problema (Pereiro, 2006).

Fundamentos matemáticos de la discretización de dominios continuos: La discretización implica dividir el dominio estructural en elementos más simples para los cuales se pueden formular ecuaciones. Esto se logra mediante el uso de funciones de forma que interpolan las variables desconocidas dentro de cada elemento, convirtiendo las ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas.

Concepto de elementos finitos y nodos en la aproximación de soluciones: Cada elemento finito representa una porción del dominio y se define por un conjunto de nodos. Las soluciones se aproximan a través de funciones de forma definidas en los nodos, y la combinación de estos elementos y nodos conforma la malla o malla de elementos finitos.

Principios de discretización y formulación matemática

- *Proceso de discretización del dominio en elementos finitos:* En el contexto de la investigación, se aplicaría la discretización a las botellas rellenas de arena y al acero corrugado para representar su comportamiento estructural mediante elementos finitos (Ochoa Suárez y otros, 2019). La malla de elementos finitos se generaría con atención a la geometría y las características específicas de estos elementos.
- *Formulación matemática de las ecuaciones de equilibrio y comportamiento estructural:* Las ecuaciones que describen el equilibrio y comportamiento estructural se formulan matemáticamente, tomando en cuenta las propiedades mecánicas de las botellas rellenas de

arena y el acero corrugado. Las ecuaciones resultantes se incorporan al sistema global de ecuaciones para la simulación en ANSYS.

- *Explicación de matrices de rigidez y masa en el contexto del MEF:* En el marco del MEF, se emplean matrices de rigidez y masa para describir la respuesta estructural de los elementos finitos. Estas matrices se derivan de la formulación matemática y juegan un papel crucial en la resolución del sistema de ecuaciones.
- *Consideraciones sobre condiciones de contorno y restricciones en la formulación matemática:* Se integran condiciones de contorno y restricciones específicas del problema, asegurando que la simulación refleje de manera precisa las condiciones reales de la estructura conformada por botellas rellenas de arena y acero corrugado.

Consideraciones específicas para la simulación de estructuras conformadas por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado

- *Adaptación de las ecuaciones de elementos finitos para modelos no convencionales:* Se ajustan las ecuaciones del MEF para abordar las particularidades de las botellas rellenas de arena y el comportamiento específico del acero corrugado, considerando la no linealidad y heterogeneidad del sistema.
- *Consideraciones geométricas particulares de las botellas rellenas de arena:* La geometría única de las botellas rellenas de arena se tiene en cuenta al definir la forma de los elementos finitos, asegurando una representación precisa de su estructura.
- *Integración de propiedades mecánicas del acero corrugado en el modelo de elementos finitos:* Se incorporan las propiedades mecánicas del acero corrugado, como su módulo de elasticidad y límite de fluencia, en el modelo de elementos finitos para capturar con precisión su contribución al comportamiento estructural (González y otros, 2015).
- *Desafíos y estrategias para abordar la heterogeneidad del material compuesto:* La heterogeneidad del material compuesto, en este caso, las botellas rellenas de arena y el acero corrugado, presenta desafíos específicos que requieren estrategias adecuadas, como la definición de modelos constitutivos que reflejen la respuesta no homogénea del material.

4.2. Marco conceptual

En el ámbito de la investigación sobre la calibración mediante el método de elementos finitos de elementos estructurales conformados por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado en el software ANSYS, es crucial asentar ciertos conceptos clave que sirven como cimiento teórico:

4.2.1 *Comportamiento Estructural de Elementos Compuestos*

El comportamiento estructural de elementos compuestos, como las botellas rellenas de arena y el acero corrugado, se refiere a la respuesta conjunta de estos materiales ante las cargas externas (Han & Zhang, 2019). Se considera la interacción entre las propiedades individuales de cada componente para entender su rendimiento global.

4.2.2 *Método de Elementos Finitos (MEF) y su Aplicación en Ingeniería Estructural*

El MEF, un método numérico, divide el dominio estructural en elementos más pequeños para facilitar el análisis. En este contexto, se utiliza para simular el comportamiento de elementos compuestos en ANSYS, aplicando principios de discretización y formulación matemática.

4.2.3 *Propiedades Mecánicas de Materiales Utilizados: Botellas Rellenas de Arena, concreto y Acero Corrugado*

Las propiedades mecánicas de las botellas rellenas de arena incluyen la capacidad de carga y deformaciones bajo esfuerzo (Aleman y otros, 2019). Para el acero corrugado, se destacan el módulo de elasticidad, el límite de fluencia y su capacidad para absorber cargas de tracción.

Botellas Rellenas de Arena: Las botellas rellenas de arena, como elementos estructurales, exhiben propiedades mecánicas únicas que influyen en su comportamiento bajo carga. Estas propiedades incluyen:

- Capacidad de Carga: La capacidad para soportar cargas externas sin sufrir fallas, determinada por la resistencia global de la estructura de la botella y la capacidad del material de arena para distribuir las cargas.
- Deformaciones Bajo Esfuerzo: La respuesta del material a la aplicación de fuerzas, manifestada a través de deformaciones proporcionales a los esfuerzos aplicados.

Acero Corrugado:

El acero corrugado, utilizado como refuerzo en elementos estructurales, presenta propiedades mecánicas esenciales para la resistencia y durabilidad de la estructura:

- Módulo de Elasticidad: La medida de la rigidez del acero, indicando cómo responde el material a deformaciones elásticas bajo carga.
- Límite de Fluencia: El punto a partir del cual el acero comienza a deformarse plásticamente de manera permanente bajo carga.
- Capacidad de Absorción de Cargas de Tracción: La capacidad del acero para resistir y distribuir cargas de tracción, fundamental para contrarrestar las fuerzas de tracción en la estructura.

Concreto:

El concreto, comúnmente utilizado en combinación con acero corrugado, contribuye a las propiedades mecánicas de la estructura compuesta:

- Resistencia a Compresión: La capacidad del concreto para soportar cargas de compresión antes de sufrir fallos, indicando su robustez bajo cargas concentradas.
- Módulo de Elasticidad del Concreto: La medida de la rigidez del concreto en respuesta a esfuerzos de compresión, proporcionando información sobre su capacidad para resistir deformaciones elásticas.
- Adherencia con el Acero: La capacidad del concreto para adherirse al acero, crucial para garantizar la transferencia efectiva de esfuerzos entre ambos materiales en la estructura.

Estas propiedades mecánicas son esenciales para comprender y modelar con precisión el comportamiento de elementos estructurales conformados por botellas rellenas de arena, acero corrugado y concreto en el contexto de la simulación mediante el método de elementos finitos (Kim & Jang, 2021).

4.2.4 Integración de Geometría Específica en el Modelo de Elementos Finitos

La representación numérica precisa en ANSYS requiere la modelación cuidadosa de la geometría particular de las botellas rellenas de arena y la disposición del acero corrugado. Esto asegura una simulación fiel de la estructura (Sequera Gutierrez y otros, 2019).

4.2.5 Calibración de Modelos en el Contexto de Estructuras no Convencionales

La calibración de modelos de elementos finitos enfrenta desafíos únicos al tratar con estructuras no convencionales. Ajustar parámetros y validar la precisión del modelo en ANSYS se convierte en un paso crucial (Hernández y otros, 2017).

4.2.6 Aplicaciones Prácticas de la Calibración en Ingeniería Estructural

La calibración precisa de modelos de elementos finitos contribuye directamente a una mayor confiabilidad en la predicción del comportamiento estructural. La investigación podría aplicarse en proyectos de ingeniería donde la precisión en el análisis de estructuras no convencionales sea fundamental.

4.3. Estado de arte

La simulación numérica mediante elementos finitos es una técnica ampliamente utilizada en la ingeniería estructural para analizar y diseñar estructuras complejas. En particular, los modelos numéricos de elementos finitos se han utilizado con éxito en el análisis de estructuras de concreto reforzado. En este contexto, las botellas rellenas de arena reforzadas con acero corrugado son un elemento estructural interesante que se puede modelar numéricamente mediante elementos finitos (Ortiz y otros, 2018). En este estado del arte, se revisarán los trabajos más relevantes sobre la calibración de piezas del modelo en elementos finitos de elementos estructurales conformados por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado en el software Ansys.

En primer lugar, se debe tener en cuenta la modelización numérica de estructuras de concreto reforzado utilizando elementos finitos. Entre los métodos más utilizados se encuentran el

método de elementos finitos tridimensionales, el método de elementos finitos de capa y el método de elementos finitos de viga (Naranjo y otros, 2019). La elección del método de elementos finitos adecuado dependerá de la complejidad del problema y del grado de detalle requerido en la simulación.

En cuanto a las botellas rellenas de arena, varios trabajos han analizado el comportamiento estructural de estas estructuras mediante elementos finitos. Por ejemplo, el trabajo de (Jaimes A. V., 2019) utilizó el software Ansys para modelar numéricamente botellas rellenas de arena sometidas a cargas laterales. Los autores encontraron que el modelo numérico era capaz de predecir con precisión el comportamiento estructural de las botellas.

En otro estudio realizado por (Jaimes S. , 2017), se utilizó el software Ansys para desarrollar un modelo de elementos finitos de una estructura de pared delgada reforzada con botellas de PET rellenas de arena y acero corrugado. Se llevó a cabo una calibración del modelo mediante la comparación de los resultados numéricos con los resultados experimentales obtenidos de pruebas de carga en estructuras reales.

Además, varios trabajos se han centrado en la calibración de modelos numéricos a través de pruebas experimentales. Por ejemplo, el trabajo de (Navas, 2020) utilizó pruebas experimentales para validar un modelo numérico de una botella rellena de arena. Los autores encontraron que el modelo numérico era capaz de predecir con precisión el comportamiento estructural de la botella.

En cuanto a los materiales utilizados en las botellas rellenas de arena, es importante tener en cuenta que la arena y el acero corrugado son materiales altamente heterogéneos (Xue y otros, 2019). Por lo tanto, la elección de las propiedades materiales adecuadas es crucial para la precisión del modelo numérico. En este contexto, varios trabajos se han centrado en el comportamiento mecánico de la arena y del acero corrugado en situaciones de carga.

A continuación, se presentan algunas ventajas y desventajas relevantes de la calibración de piezas del modelo en elementos finitos de elementos estructurales conformados por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado en el software Ansys:

Ventajas:

- La simulación numérica mediante elementos finitos permite obtener información detallada sobre el comportamiento estructural de las botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado, lo que puede ayudar a optimizar su diseño y mejorar su eficiencia estructural.

- La utilización del software Ansys permite una simulación numérica avanzada y precisa, que tiene en cuenta múltiples factores, como el material, las condiciones de carga y las geometrías complejas.
- La calibración de piezas del modelo a través de pruebas experimentales puede ayudar a validar el modelo numérico y mejorar la precisión de las predicciones.
-

Desventajas:

- La simulación numérica mediante elementos finitos puede requerir un conocimiento especializado en el uso del software y la interpretación de los resultados.
- La calibración de modelos numéricos a través de pruebas experimentales puede ser costosa y requiere una planificación cuidadosa.
- La simulación numérica es una herramienta complementaria a las pruebas experimentales, no puede reemplazar completamente la necesidad de realizar pruebas físicas de validación.

En general, la simulación numérica mediante elementos finitos en el software Ansys puede ser una herramienta útil para la calibración de piezas del modelo de botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones y desventajas asociadas a la utilización de esta técnica, y combinarla con pruebas experimentales y otros métodos de validación para obtener resultados más precisos y confiables.

Calibración de modelos de elementos finitos en Ansys

La calibración de modelos de elementos finitos en Ansys es un proceso importante para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados de simulación. La calibración implica ajustar los parámetros del modelo de elementos finitos para que los resultados de la simulación coincidan con los resultados experimentales o con los valores teóricos conocidos (Paez y otros, 2019). Esto se hace para garantizar que el modelo pueda predecir de manera confiable el comportamiento del sistema físico que se está simulando.

Para calibrar un modelo de elementos finitos en Ansys, se recomienda seguir los siguientes pasos:

➤ **Selección de los parámetros a calibrar**

Es importante conocer las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción de los elementos, como el acero corrugado, la arena y las botellas, para poder simular su comportamiento estructural de manera precisa. Estos parámetros pueden incluir la densidad, el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción, la resistencia a la compresión, entre otros (Zuluaga y otros, 2019).

➤ **Definición de los criterios de calibración**

Esto implica establecer los criterios para evaluar la precisión del modelo de elementos finitos.

➤ **Generación de datos experimentales o teóricos de referencia**

Esto implica obtener los datos experimentales o teóricos de referencia que se utilizarán para comparar con los resultados de la simulación, tomando como estudio inicial el proyecto de investigación “DISEÑO Y MODELACIÓN DE MUROS FORMADOS POR BOTELLAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO RELLENAS DE ARENA Y REFORZADAS CON ACERO CORRUGADO”, al cual ya se le realizó una serie de ensayos y se calibró de manera general.

➤ **Ejecución de la simulación**

Esto implica ejecutar la simulación utilizando los parámetros iniciales del modelo de elementos finitos.

➤ **Comparación de los resultados de la simulación con los datos de referencia**

Esto implica comparar los resultados de la simulación con los datos experimentales o teóricos de referencia y evaluar la precisión del modelo.

➤ **Ajuste de los parámetros del modelo**

Esto implica ajustar los parámetros del modelo de elementos finitos para mejorar la precisión de los resultados de simulación.

➤ **Validación del modelo**

Una vez que se ha calibrado el modelo, es necesario validar el modelo utilizando datos de referencia adicionales para asegurarse de que los resultados de la simulación sean precisos y confiables.

La calibración de modelos de elementos finitos en Ansys es una técnica ampliamente utilizada en la ingeniería estructural para mejorar la precisión y la confiabilidad de los análisis numéricos. La calibración del modelo es un proceso crucial que implica ajustar los parámetros del modelo para

que se ajusten a los datos experimentales o de campo (Calderón, 2020). En particular, en el caso de elementos estructurales conformados por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado, la calibración del modelo puede mejorar la precisión de los análisis de carga y deformación y predecir mejor la respuesta estructural en situaciones reales.

Existen varios métodos de calibración de modelos, que incluyen desde enfoques basados en la optimización hasta técnicas basadas en estadísticas. En la literatura técnica, se han reportado diversos estudios que demuestran la eficacia de estos métodos de calibración para mejorar la precisión y confiabilidad de los modelos de elementos finitos en Ansys para elementos estructurales conformados por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado.

5. Metodología

La calibración de modelos en elementos finitos es una práctica fundamental para lograr una adecuada simulación numérica del comportamiento de estructuras conformadas por botellas rellenas de arena y acero corrugado. Para lograr esto, es importante contar con una metodología de investigación clara y efectiva que permita recopilar y analizar los datos necesarios para la calibración y validación del modelo en el software Ansys.

En este sentido, existen dos enfoques principales para abordar esta problemática: la investigación mixta y la investigación cuantitativa. En el primer caso, se busca combinar la recopilación de datos cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión completa del comportamiento del modelo y las recomendaciones para mejorar la calibración y validación del modelo. Por otro lado, en la investigación cuantitativa se enfoca principalmente en la recopilación y análisis de datos numéricos, lo que puede proporcionar resultados precisos y objetivos.

En el caso de la metodología de investigación cuantitativa, se proponen los siguientes pasos: una revisión bibliográfica exhaustiva para identificar las variables relevantes y el diseño del modelo en el software Ansys, la selección de variables, la recopilación de datos mediante la simulación numérica, el análisis de datos mediante técnicas estadísticas, la validación del modelo comparando los resultados obtenidos con los de pruebas experimentales y la presentación de las conclusiones y recomendaciones.

Posteriormente se hace el DESARROLLO METODOLÓGICO para desarrollar y lograr cada objetivo planteado, en la siguiente **Tabla 1: Desarrollo Metodológico**:

Tabla 1: Desarrollo Metodológico

Objetivo	Actividad	Descripción	Actores
Diseñar y modelar en 3D las botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado en el software Ansys.	Diseño y modelado	La actividad consiste en el diseño y modelado en 3D de botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado utilizando el software Ansys.	Estudiante de ingeniería civil.

Tabla 1 Continuación

<p>Definir las condiciones de carga y restricciones en el modelo para simular su comportamiento real.</p>	<p>Definición de las condiciones de carga y restricciones</p>	<p>La actividad consiste en definir las condiciones de carga y restricciones en el modelo de simulación para el comportamiento real de las botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado.</p>	<p>Estudiante de ingeniería civil e ingeniero tutor a cargo del proyecto.</p>
<p>Comparar los resultados obtenidos en el análisis con datos experimentales para validar la precisión del modelo.</p>	<p>Comparación de los resultados obtenidos en el análisis con los datos experimentales</p>	<p>Para validar la precisión del modelo, se requiere la realización de pruebas experimentales que proporcionen datos precisos y fiables sobre el comportamiento real de las botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado.</p>	<p>Estudiante de ingeniería civil e ingeniero tutor a cargo del proyecto.</p>
<p>Documentar los resultados del análisis y las recomendaciones para su implementación en futuros proyectos.</p>	<p>Documentación de los resultados del análisis y las recomendaciones para su implementación en futuros proyectos</p>	<p>Después de realizar el análisis, se deben documentar los resultados en un informe detallado que incluya información sobre las condiciones de carga y restricciones, las simulaciones realizadas, los datos experimentales, los resultados del análisis y las comparaciones entre los resultados del análisis y los datos experimentales.</p>	<p>Estudiante de ingeniería civil</p>

6. Desarrollo del modelo

6.1. Generalidades

El proyecto de construcción del prototipo de botellas PET rellenas de área y reforzadas con acero corrugado de 1/2 pulgada se encuentra ubicado en la ciudad de Villavicencio, específicamente en la sede Agua Claras de la Universidad Santo Tomás, como se muestra en **Figura 1**.

Figura 1: Ubicación prototipo Proyecto Botellas PET



Esta sede se distingue por su compromiso con la innovación y la investigación en diversas áreas de la ingeniería y la tecnología. El proyecto está situado al respaldo de la universidad, aprovechando su infraestructura y recursos para llevar a cabo el desarrollo del prototipo.

La ubicación estratégica del proyecto lo sitúa al lado de los laboratorios de suelos y concretos, facilitando así el acceso a los recursos y la colaboración con expertos en el campo como se evidencia en la **Figura 2**. Esta proximidad permite un intercambio fluido de conocimientos y experiencia entre los investigadores y los estudiantes involucrados en el proyecto.

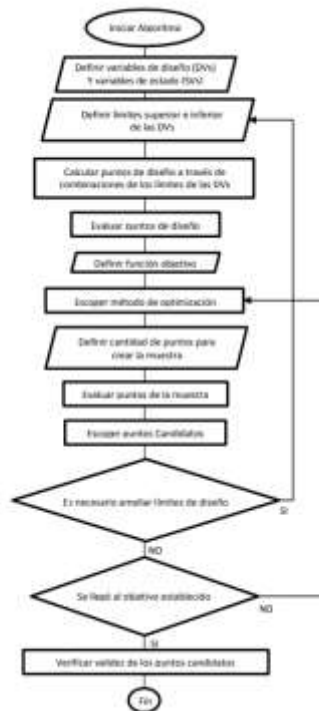
Figura 2: Construcción prototipo botellas PET



6.2. Desarrollo del algoritmo de calibración

El siguiente algoritmo **Figura 3**, se usó para la simulación del proceso de fabricación de botellas PET en ANSYS. El algoritmo se basa en el método de elementos finitos (MEF) y utiliza el software ANSYS para realizar las simulaciones. Cabe resaltar que se tomó de la tesis titulada “ALGORITMO PARA LA CALIBRACIÓN DE MODELOS ESTRUCTURALES EN ELEMENTOS FINITOS DE PUENTES USANDO ANSYS”.

Figura 3: Diagrama de flujo



Nota 1: Información suministrada por la tesis Modelos de calibración (Segura Gutiérrez & Solano, 2013)

Paso a paso para el modelado de botellas PET denominadas Botella 1 y Botella 2 en Ansys:

1. Preparación de la geometría:

- Se importaron las geometrías de las botellas PET, Botella 1 y Botella 2 en Ansys utilizando archivos STEP encontrados en internet.
- Se verificó y limpió la geometría para garantizar su integridad y precisión, utilizando las herramientas de edición de Ansys cuando fue necesario.

2. Definir material:

- Se asignaron propiedades de material al PET de las botellas, basadas en datos proporcionados por la literatura técnica.
- Se ingresaron las propiedades mecánicas, térmicas y de flujo de los materiales PET en Ansys para su uso en el análisis.

3. Generación de la malla (meshing):

- Se generó una malla de elementos finitos en las geometrías de las botellas PET, utilizando una densidad de malla adecuada para capturar detalles importantes sin aumentar excesivamente el tamaño del modelo.
- Se prestó especial atención a la calidad de la malla en áreas críticas, como las roscas del tapón y las regiones de alta concentración de esfuerzos.

4. Definir las condiciones de contorno:

- Se aplicaron condiciones de contorno para simular el apoyo de las botellas sobre una superficie plana, restringiendo los desplazamientos en la base de las botellas.
- Se modelaron las cargas internas y externas, como la presión interna de la arena y las fuerzas debidas al manejo y transporte de las botellas.

5. Definir el tipo de análisis:

- Se seleccionó un análisis estático lineal para evaluar el comportamiento estructural de las botellas PET bajo cargas estáticas.
- Se configuraron los parámetros del análisis, como la presión interna de la arena y la temperatura ambiente, de acuerdo con las condiciones de servicio esperadas.

6. Resolver el análisis:

- Se ejecutó la simulación para resolver las ecuaciones del modelo y obtener resultados.

- Se supervisó el progreso de la solución para asegurarse de que la simulación convergiera correctamente y de que no se produjeran errores significativos.

7. Revisar los resultados:

- Se visualizaron y analizaron los resultados obtenidos, incluyendo tensiones, deformaciones y distribución de presiones internas en las botellas PET.
- Se compararon los resultados con los datos experimentales disponibles para validar la precisión del modelo.

8. Iterar según sea necesario:

- En caso de resultados insatisfactorios o necesidad de cambios en el modelo, se realizaron las modificaciones pertinentes y se repitieron los pasos anteriores.
- Se ajustaron los parámetros del modelo, las condiciones de contorno y la malla según sea necesario para mejorar la precisión de la simulación.

9. Documentar y presentar los resultados:

- Se documentaron los resultados obtenidos, incluyendo condiciones de simulación, parámetros del modelo y conclusiones.
- Se preparó una presentación clara y concisa de los resultados, como se evidencia en el siguiente capítulo, utilizando gráficos, tablas y visualizaciones adecuadas para comunicar los hallazgos relevantes de manera efectiva.

Al seguir este proceso, se logró modelar con éxito las botellas 1 y 2 en Ansys, obteniendo resultados útiles para su diseño y análisis de rendimiento.

6.3. Parámetros de diseño

La siguiente **Tabla 2**, muestra los parámetros de diseño para una mezcla de arena, junto con los valores medidos para diferentes tipos de materiales, haciendo la observación que algunos fueron calculados:

Tabla 2: *Parámetros de diseño para el modelado en Ansys*

Parameters	Basu (2009)		Present study	
	Clay	Sand-fibre mix	Clay	Stone aggregates
Young's modulus, E (kPa)	250	6700	420	42500
Cohesion (kPa)	16.0	15.55	5	0
Angle of internal friction, ϕ (°)	0	34.47	0	43
Poisson's ratio, μ	0.3	0.3	0.48	0.3
Dry unit weight (kN/m ³)	14.90	18.0	13.85	14.51
Bulk unit weight (kN/m ³)	19.37	-	18.58	-

Nota 2: Información tomada de Basu (2009)

6.3.1 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young del concreto, es una medida de la rigidez del material. Se define como la relación entre la tensión aplicada (esfuerzo) y la deformación unitaria que experimenta el concreto como resultado de esa tensión (Torres, 2015).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{FL_0}{A_0\Delta L}$$

Donde:

E: Modulo de elasticidad o módulo de Young

F: Fuerza axial aplicada

A₀: Área sección transversal

ΔL : Variación de la dimensión longitudinal del objeto

L₀: Altura original

6.3.2 Módulo de elasticidad del plástico

El módulo de elasticidad del plástico, también conocido como módulo de Young del plástico, es una propiedad mecánica fundamental que mide la rigidez del material. Se define como la relación entre la tensión aplicada (esfuerzo) y la deformación unitaria que experimenta el plástico

como resultado de esa tensión (Barros, 2020). En términos más simples, nos indica cuánto se deforma un plástico bajo una carga específica.

El módulo de elasticidad del plástico varía considerablemente dependiendo del tipo de plástico. Algunos ejemplos de valores típicos para diferentes tipos de plásticos se muestran en la siguiente **Tabla 3**:

Tabla 3: Modulo de elasticidad

MATERIAL	E (GPa)	ν
Plásticos		
ABS	1,7	0,33
Nylon	1,4 – 2,75	
Acrílico	6,0	0,33
Poliétileno	0,8	0,46
Polistireno	5,0	0,4
PVC rígido	2,4 – 2,75	

Nota 3: Información tomada de (Pelález, 2012)

6.3.3 Módulo de Poisson

El módulo de Poisson, también conocido como razón de Poisson o coeficiente de Poisson, es una propiedad fundamental de los materiales sólidos que caracteriza su comportamiento bajo deformación uniaxial. Esta constante elástica nos indica la relación entre la deformación transversal (contracción) que experimenta un material en las direcciones perpendiculares a la carga aplicada y la deformación longitudinal (alargamiento) que ocurre en la dirección de la carga (Castaño Colorado & Correa Morales, 2020).

$$\nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Donde:

ν = Coeficiente de Poisson

ε_2 = Deformación unitaria transversal

ε_1 = Deformación unitaria longitudinal

7. Análisis y resultados

El siguiente análisis consiste en determinar cuál de las siguientes dos configuraciones de botellas desechadas llenas de arena presenta la mayor resistencia estructural al ser utilizadas en la fabricación de viviendas. La **Figura 4** muestra el sistema de botella tipo 1 y la

Figura 5 muestra el sistema usando botellas tipo 2. Se trata del uso de botellas de plástico llenas de arena ocupando el lugar de los ladrillos, acopladas unas con otras y unas encima de otras, alineadas con una buena mezcla de concreto que las mantiene unidas, firmes y adheridas unas a otras.

Figura 4: Sistema botellas tipo 1.

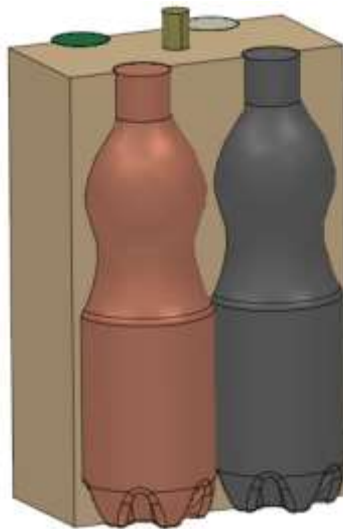


Figura 5: Sistema botellas tipo 2.



En la mitad del sistema se usa una varilla metálica de refuerzo, y es de resaltar que en el interior de cada botella se encuentra la pieza sólida que representa la arena compactada. La **Figura 6** muestra una vista explosionada del sistema de botellas tipo 1 con todos sus componentes, y la

Figura 7 muestra el explosionado del sistema de botellas Gatorade.

Figura 6: Descripción montaje botellas tipo 1.

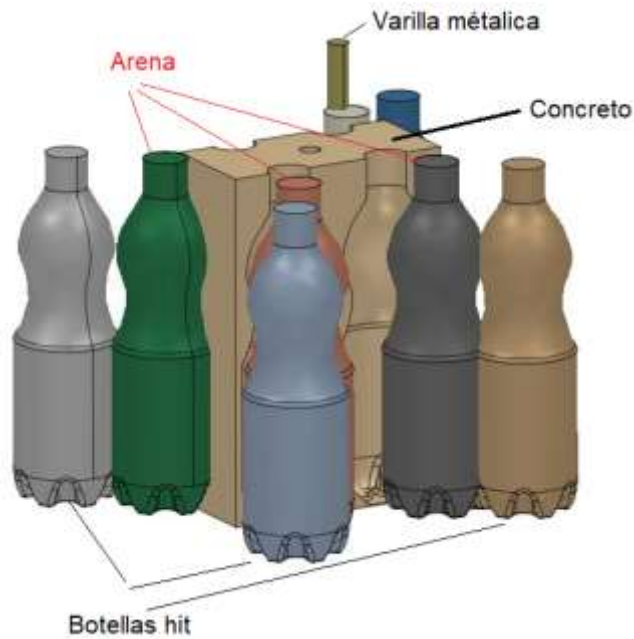
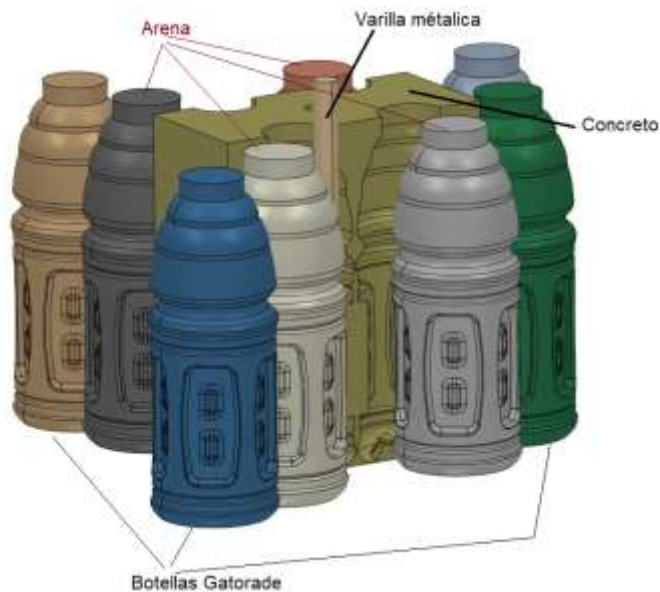


Figura 7: Descripción montaje botellas tipos 2.



7.1. Análisis por el método de elementos finitos

El primer paso para desarrollar la simulación por elementos finitos consiste en discretizar las piezas que se desean analizar. El sistema se divide en una cantidad finita de elementos haciendo uso de un programa con preprocesador. Es uno de los pasos más importantes para obtener una solución correcta del problema. La **Figura 8** muestra de forma general el sistema discretizado, dejando ver la forma de las mallas de las partes interiores.

Figura 8: Discretización general del modelo



Figura 9: Desglosé de los elementos a modelar



Definir las propiedades de los elementos del numeral anterior. Se deben definir las propiedades de los elementos asignándoles sus respectivos materiales, como se muestra en la **Tabla 4**, las propiedades de los materiales utilizadas en la simulación.

Tabla 4: Propiedades de materiales

Material	Densidad (kg/m ³)	Modulo Young (MPa)	Razón de Poisson
Concreto	2300	30000	0.18
Plástico ABS	1040	2390	0.399
Acero	7850	200000	0.3
Arena compactada	1832	81	0.23

- Ensamblar las matrices de rigidez. El ensamble de las matrices de rigidez consiste en la aplicación del equilibrio para toda la estructura de modo que se cumpla la igualdad $F=K*U$ (K =matriz de rigidez, F =Vector de fuerzas, U =vector de desplazamientos), se refiere a los desplazamientos nodales que se generan al aplicar las fuerzas nodales (Blanco Díaz y otros, 2015).
- Condiciones de frontera y cargas. Aplicación de restricciones y cargas para evaluar la estructura. La **Figura 10**, muestra el modelo general de elemento finitos utilizado para desarrollar las simulaciones. Para hacer más eficiente las simulaciones solo se utiliza la mitad de la geometría haciendo uso de la simetría con la ayuda de restricciones de desplazamiento. Para todas las simulaciones se usa una carga en forma de presión de 0.3 MPa y se aplica directamente a la parte superior del concreto y botellas con arena. Este valor de presión corresponde a la generada por la masa de las botellas superiores y el techo. Además, se ha activado la aceleración de 1G en la dirección vertical para simular la gravedad.

Figura 10: Modelo general de elementos finitos

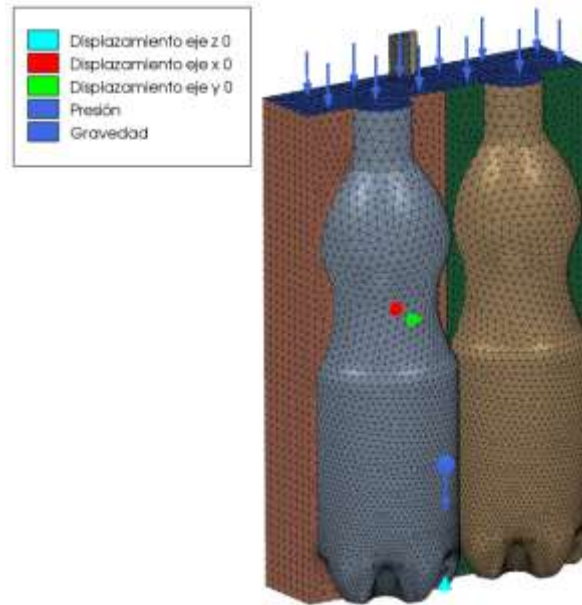
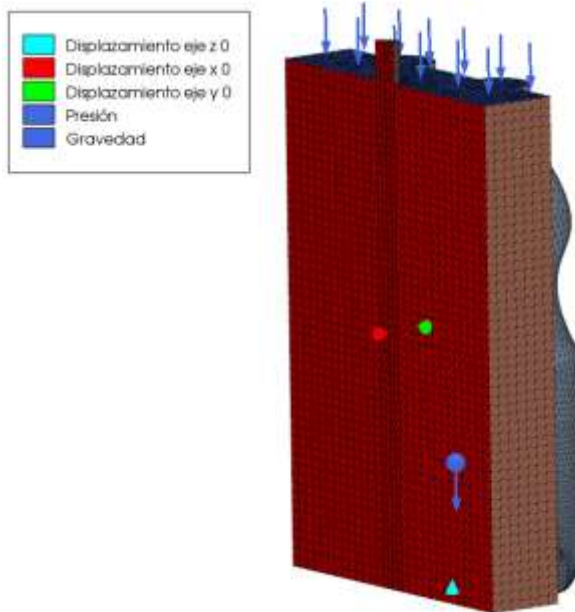


Figura 11: Modelo general de elementos finitos vista en corte



- Solución del problema. Dar la orden al software para que resuelva el sistema de ecuaciones algebraica de los pasos anteriores.

Para la solución del modelo se usará la versión de estudiante del software Ansys. Esta versión de estudiante permite solo el uso de un número limitado de elementos, por lo tanto, se

puede ver comprometida la validez de los resultados, ya que se vuelve imposible desarrollar análisis de convergencia en la simulación.

- Calcular las deformaciones y esfuerzos. A través de un software de posprocesamiento el usuario puede extraer del software en forma de gráficos o datos numéricos los diferentes resultados del análisis.

La **Figura 12**, muestra la deformación del sistema de botellas tipo 1 y la **Figura 13** muestra la deformación del sistema de botellas tipo 2.

Figura 12: Graficas de deformación botellas tipo 1.

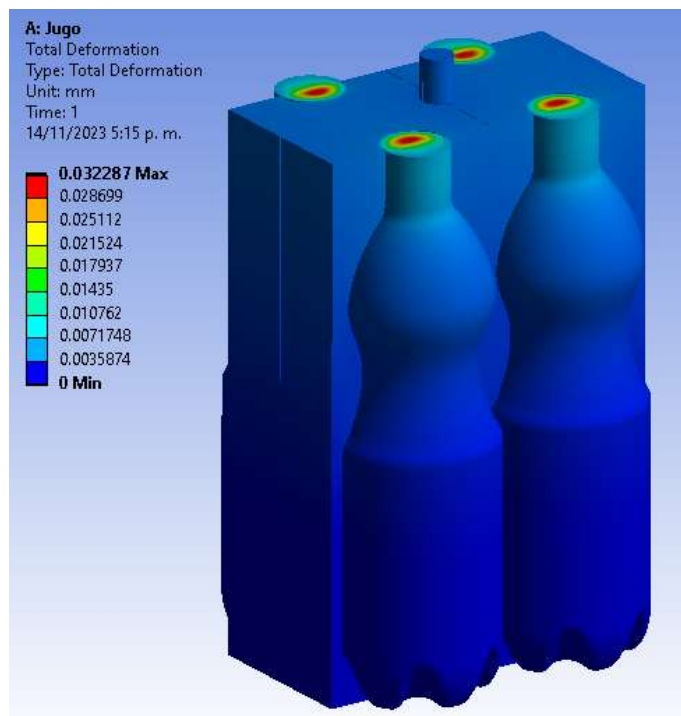
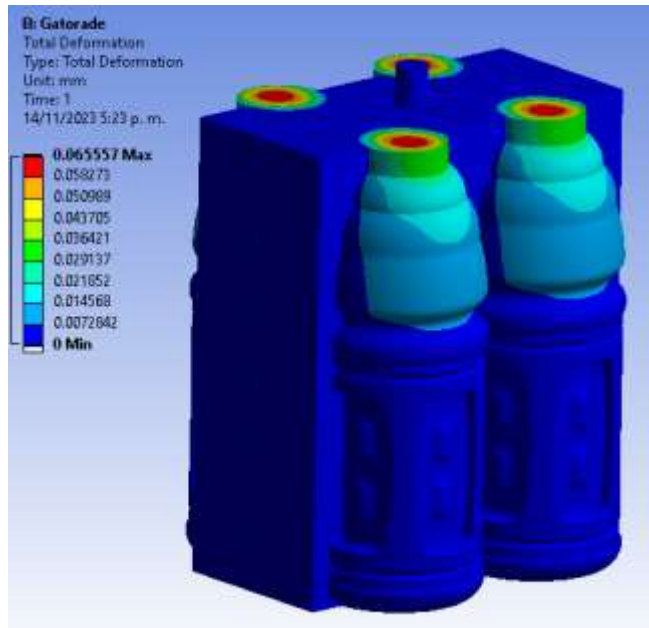


Figura 13: Graficas de deformación botellas tipo 2.



La **Figura 14**, muestra el esfuerzo de Von-Mises del sistema de botellas tipo 1 y la **Figura 15** muestra el esfuerzo de Von-Mises del sistema de botellas tipo 2.

Figura 14: Graficas de esfuerzo Von-Mises botellas tipo 1

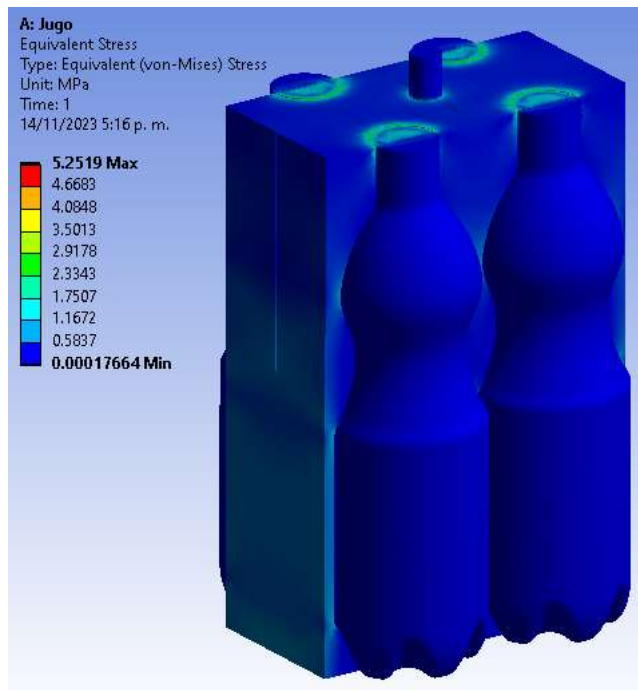
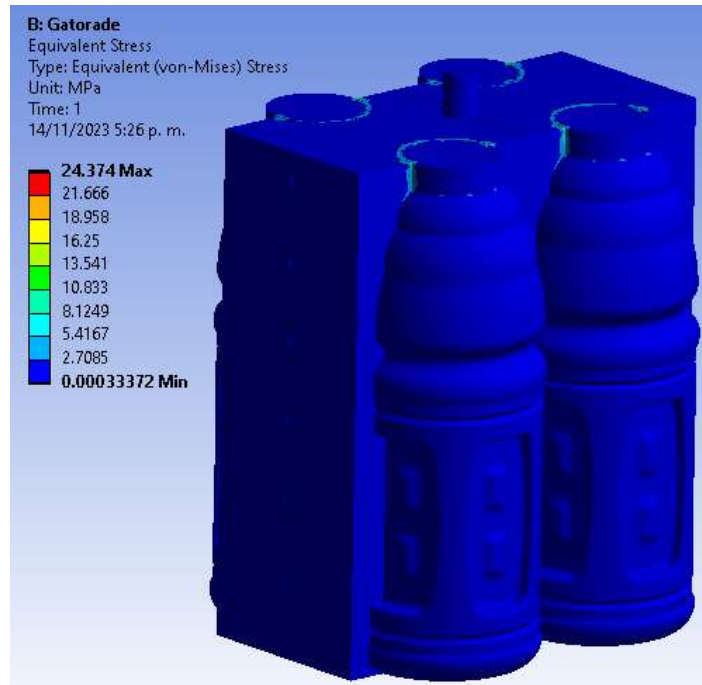


Figura 15: Graficas de esfuerzo Von-Mises botellas tipo 2



La **Figura 16**, muestra la deformación del concreto para el sistema de botellas tipo 1 y la **Figura 17** muestra la deformación del concreto para el sistema de botellas tipo 2.

Figura 16: Graficas de deformación del concreto en el sistema de botellas tipo 1

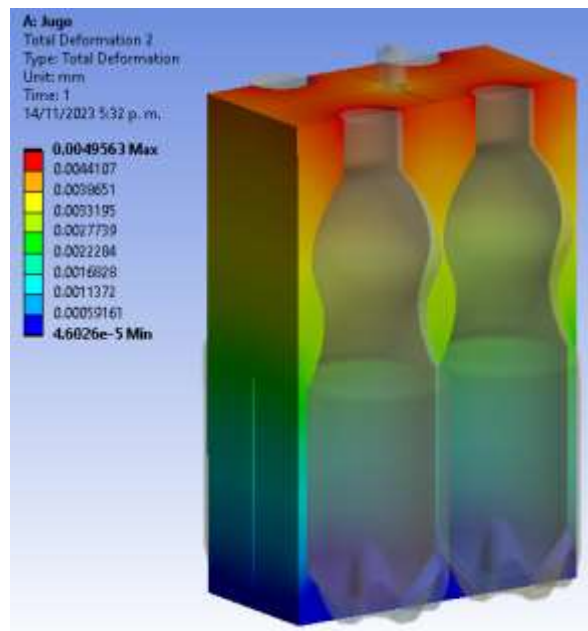
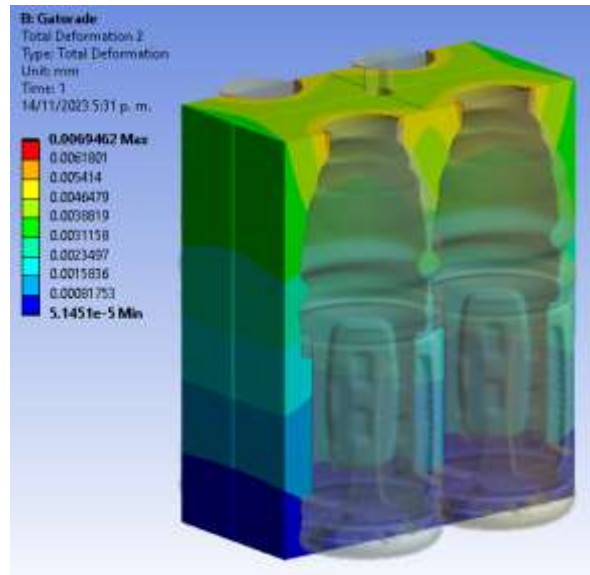


Figura 17: Graficas de deformación del concreto en el sistema de botellas tipo 2



7.2. Resultados

7.2.1 Deformaciones

El presente análisis tiene como objetivo comparar los resultados de deformación máxima y mínima obtenidos mediante dos métodos: simulación computacional con el software Ansys y ensayos de laboratorio. Se estudiaron dos tipos de botellas, tipo 2 y tipo 1 para evaluar la precisión del software en la predicción del comportamiento del material bajo diferentes condiciones de carga, como se muestra en la **Tabla 5**.

Tabla 5: Deformaciones calculadas por el Software ANSYS

Botella	Deformación Máximo (mm)	Deformación Mínimo (mm)
Tipo 1	0.032287	0.003587
Tipo 2	0.065557	0.007284

Tabla 6: Deformación calculada en los ensayos de laboratorio

Botella	Deformación Máximo (mm)	Deformación Mínimo (mm)
Tipo 1	0.025	0.0048
Tipo 2	0.048	0.001

El análisis comparativo de las deformaciones experimentadas por las botellas Tipo 1 y Tipo 2, proporciona información valiosa sobre su comportamiento estructural bajo diferentes condiciones. En primer lugar, al examinar las condiciones normales de uso, se observa que la botella tipo 2 experimenta mayores deformaciones en comparación con la botella tipo 1. Con deformaciones máximas registradas de 0.065557 mm y mínimas de 0.007284 mm, la botella tipo 2 parece ser más susceptible a deformaciones que la botella tipo 1, que muestra valores máximos de 0.032287 mm y mínimos de 0.003587 mm.

La botella Tipo 1 muestra una mayor susceptibilidad a deformaciones bajo condiciones normales de uso, la botella Tipo 2 exhibe una respuesta más variable bajo ensayos de laboratorio, lo que sugiere una mayor capacidad de adaptación a condiciones extremas. Este análisis destaca la importancia de evaluar la resistencia estructural de los productos en una variedad de escenarios para comprender completamente su rendimiento en situaciones reales.

7.2.2 Esfuerzos

*En este análisis se compararán los resultados de los esfuerzos máximos y mínimos obtenidos mediante dos métodos: simulación computacional con el software Ansys y ensayos de laboratorio. Se estudiaron dos botellas de Tipo 2 y Tipo 1 para evaluar la precisión del software en la predicción del comportamiento del material bajo diferentes condiciones de carga, como se puede observar en la **Tabla 7** y la*

Tabla 8.

Tabla 7: Esfuerzos calculados por el Software ANSYS

Botella	Esfuerzo Máximo (MPa)
Tipo 1	5.2519
Tipo 2	24.374

Tabla 8: Esfuerzos calculados en los ensayos de laboratorio

Botella	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Fuerza Vertical Máxima (KN)
Tipo 1	3.519	144.0
Tipo 2	1.760	58.0

*Este análisis compara los esfuerzos máximos obtenidos **Tabla 7:** Esfuerzos calculados por el Software ANSYS y*

Tabla 8: Esfuerzos calculados en los ensayos de laboratorio de dos tipos de botellas plásticas. Se observa una diferencia significativa entre los valores de esfuerzo máximo predichos por ANSYS y los obtenidos en los ensayos de laboratorio. La discrepancia es del 49.8% para la botella Tipo 1 y del 92.8% para la botella Tipo 2.

Se sugiere mejorar la precisión del modelo de ANSYS mediante la refinación de la geometría y la verificación de las propiedades del material, ya que en el caso de la botella de Tipo 2, el esfuerzo máximo es demasiado alto. Además, se recomienda aumentar el tamaño de la muestra en los ensayos de laboratorio y realizar pruebas con diferentes condiciones de carga y borde.

8. Conclusiones

Tras la ejecución de la presente investigación, se ha logrado el desarrollo exitoso de un modelo de elementos finitos para analizar el comportamiento estructural de elementos conformados por botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado. Los objetivos establecidos se han abordado de manera sistemática, arrojando resultados significativos que contribuyen al campo de la ingeniería estructural.

En primer lugar, se ha llevado a cabo el diseño y modelado en 3D de las botellas rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado mediante el software Ansys. Este proceso ha permitido la creación de representaciones virtuales precisas de los elementos estructurales estudiados, garantizando la adecuada representación de su geometría y propiedades materiales.

Seguidamente, se definieron las condiciones de carga y restricciones necesarias para simular el comportamiento real de las estructuras. La cuidadosa selección de estas condiciones ha permitido realizar análisis numéricos que reflejan fielmente las condiciones a las que estarán sujetas las estructuras en su entorno de aplicación.

La validación del modelo se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados del análisis numérico con datos experimentales previamente obtenidos. Esta comparación ha demostrado la capacidad del modelo desarrollado para predecir con precisión el comportamiento estructural de los elementos estudiados, validando así su fiabilidad y utilidad en aplicaciones prácticas.

Se ha observado una discrepancia significativa entre los esfuerzos máximos predichos por ANSYS y los obtenidos en ensayos de laboratorio. Estas son del 49.8% para la botella Tipo 1 y del 92.8% para la botella Tipo 2. Los resultados de los ensayos de laboratorio muestran consistentemente esfuerzos máximos inferiores a los obtenidos por ANSYS. Esta es más pronunciada en el caso de la botella Tipo 2. Las diferencias podrían atribuirse a la precisión del modelo de ANSYS, las propiedades del material, las condiciones de borde y los errores de medición en los ensayos de laboratorio. Se sugiere mejorar la precisión del modelo de ANSYS mediante la refinación de la geometría, la verificación de las propiedades del material y el ajuste de las condiciones de borde. Además, se recomienda aumentar el tamaño de la muestra en los ensayos de laboratorio y realizar pruebas con diferentes condiciones de carga y borde.

9. Referencias

- Aleman, M., Jáuregui, A., & Cuello, J. (Eds.). (2019). *Análisis numérico de un puente compuesto de acero y hormigón utilizando el software de elementos finitos ANSYS*. Journal of Physics: Conference Series. https://oa.upm.es/50284/1/TFG_Mauricio_Aleman.pdf
- Blanco Díaz E, Cervera Ruiz, M., & Suárez Arroyo, B. (2015). *Análisis matricial de estructuras*. Cimne. <https://cervera.rmee.upc.edu/libros/Analisis%20Matricial%20Estructuras.pdf>
- Barbosa Méndez, C. A; Barbosa Méndez, J. A. & Terreros Arias, J. C. (2019). Análisis de la Interacción Suelo Estructura en Muros de Contención de Concreto Reforzado en Voladizo Sobre Suelos Arcillosos Colombianos. [Artículo académico, Universidad Nacional Colombia]. Repositorio Institucional. https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/3391/Interaccion_suelo_contencion_concreto.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Calderón W, R. (2020). *Calibración de modelos de elementos finitos de muros de adobe por optimización: Using optimisation for calibrating finite element models for adobe walls* [Universidad Santo Tomas]. Repositorio Institucional. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/24001?show=full>
- Castaño Colorado , Álvaro A. , & Correa Morales, J. C. (2020). *Comparación del modelo COM-Poisson y el modelo Poisson*. Comunicaciones En Estadística, 13(2), 9–32. <https://doi.org/10.15332/2422474x.6255>
- Cortez Espinoza, A., Parada Zelaya, E., & Chávez Valencia, A. (2021). *Propuesta de diseño de una máquina llenadora de envases PET* [Universidad del Salvador]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.ues.edu.sv/items/06e5770d-50f6-4788-aed9-b3d1081a0364>
- Girón, C. C. A., & Galeano, E. E. R. (2019). *Modelación por el Método de Elementos Finitos (MEF), mediante el Software ANSYS del elemento placa* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/11349/22126>
- González, V., Botero, J., Rochel, R., Vidal, J., & Álvarez, M. (2015). *Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado en Colombia* [Universidad de la Rioja]. Repositorio Institucional. <https://doi.org/1794-9165>

- Han, L., & Zhang, Z. (Eds.). (2019). *Experimental and numerical study on steel tube-reinforced composite wall with waste polyethylene terephthalate (PET) bottle as formwork*. Journal of Cleaner Production. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523005247?via%3Dihub>
- Hernández, C., Suárez, O., & Villalba, C. (2017). *Estudio experimental y numérico de la interacción suelo-estructura en pilotes sometidos a cargas laterales*. [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59904>
- Jaimés, A. (2019). *Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano* [Universidad Politécnica de Catalunya]. Repositorio Institucional <https://core.ac.uk/download/pdf/19924837.pdf>
- Jaimés, S. (2011). Uso de software de elementos finitos ANSYS, en el diseño estructural de un vehículo todo terreno. [Artículo académico, Universidad Pontificia Bolivariana]. Repositorio Institucional. <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8010/Uso%20de%20software%20de%20elementos%20Finitos%20Ansys.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kim, M., & Jang, I. (2024). Experimental Evaluation of Waste PET Bottles as a Sustainable Building Material. *Journal of Architectural Engineering*. 30(2). <http://dx.doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1701>
- Lopez Villalba, N. (2019). *Construcción de una estructura primaria funcional a base de botellas PET recicladas*. [Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33363/2014.natalial%20pez.pdf?sequence=1>
- Martínez, F. (2018). *Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructuras de autobuses* [Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio Institucional. https://oa.upm.es/50284/1/TFG_FRANCISCO_MURILLO_MARTINEZ.pdf
- Naranjo, L., Quiceno, E., & Quintero M. (2019). *Análisis numérico de la estabilidad de taludes en suelos residuales*. *Revista de la Facultad de Ingeniería* [Universidad nacional de Colombia]. Repositorio Institucional

- <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57334/analisisdeestabilidaddetaludes.pdf>
- Navas, P. (2020). *Prueba piloto para la implementación de modelación numérica del comportamiento esfuerzo deformación en mampuestos suelo PET MSPET* [Universidad de la Salle]. Repositorio Institucional https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1897&context=ing_civil
- Ochoa Suárez, D. O., Vivas, J., & Santafé Rangel, E.R. (2019). *Uso del Método de elementos finitos (MEF) para la determinación de esfuerzos y deformaciones en un modelo de pozo* *Revistas Fuentes, El reventón energético*, 7(1). 27-35. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/360>
- Ortiz, A., Giraldo, S., & Vargas, L. (2018). *Modelación numérica de un muro de contención en suelo reforzado con geosintéticos mediante el software ANSYS* [Universidad Militar nueva granada]. Repositorio Institucional <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/43881?show=full>
- Otero Pereiro, L (2006). *Apreniendo sobre el Método de los Elementos Finitos*. *Revista de Ingenieria Mecanica*. 9(3). 7-13. <https://www.redalyc.org/pdf/2251/225117945001.pdf>
- Paez, C., & Cardona, A. (Eds.). (2019). *Calibration of finite element models for seismic analysis of structures*. *International Journal of Computational*. <https://doi.org/10.2495/cmcm-v7-n5-758-767>
- Peláez, J. (2012). *Prueba de tension (Modulo de tensión y flexión)*. Zwick Roall. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-flexion/>
- Quintero Díaz, L. A. (2022). *Diseño de una planta de reciclado de Tereftalato de polietileno (PET)* [Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/59710/QUINTERO%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20una%20planta%20de%20reciclado%20de%20Tereftalato%20de%20polietileno%20\(PET\),%20con%20una%20producc....pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/59710/QUINTERO%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20una%20planta%20de%20reciclado%20de%20Tereftalato%20de%20polietileno%20(PET),%20con%20una%20producc....pdf)
- Roberto Caicedo, K., & Lozada Garavito, A. (2020). *Caracterización del comportamiento mecánico de un material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua Angustifolia Kunth mediante la simulación* [Universidad Católica de Colombia]. Repositorio

- Institucional. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/d77311be-e2ca-4019-9aa2-7c9495dcbb0e/content>
- Rodríguez, A. (Ed.). (2019). *Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica*. [Trabajo de grado, Universidad Carlos III de Madrid]. Repositorio Institucional. <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/a4325d60-fa7d-4f09-a37d-e6509342c29e/content>
- Rodríguez Aguirre, M., & Arango, S. (2016). *Diseño y construcción de un módulo de vivienda con botellas recicladas* [Universidad Tecnológica de Colombia]. Repositorio Institucional <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/5a9f69ac-77e8-488b-b831-c3a8fc33a3fe/content>
- Rodríguez Calderón, W., & Pallares Muñoz, M. (Eds.). (2020). *Calibración de modelos de elementos finitos de muros de adobe por optimización*. Revista Universidad nacional de colombia. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingeniv/article/download/15155/34391>
- Sangucho Barros, D. S., Velasco Cevallos, D. A., & Viera Arroba, L. P. (2023). Propiedades físicas y mecánicas de reciclados de plásticos producidos en Ecuador como material de construcción. FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo, 16(2), 58–69. <https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4495>
- Segura Gutierrez, D., & Solano, L. (2018). *Algoritmo para la calibración de modelos estructurales de elementos finitos de puentes usando ANSYS* [Pontificia Universidad javeriana]. Repositorio Institucional <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/11169/SequeraGutierrezDiegoAlejandro2013.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Sequera Gutierrez, D.A; Solano Rodríguez, L.F; Muñoz Díaz, E.E; Alvarado, Y.A; Villalba, J.D. & Gasch, I. (2019). Updating the finite element model of a Colombian bridge with Ansys. *Revista Dyna*. 87(212). 209-218. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/79785/74103>
- Torres, A. (2015). *Obtención del modulo de elasticidad* [Universidad la gran Colombia]. Repositorio Institucional https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/3471/Obtenci%C3%B3n_modulo_elasticidad_concretos.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vélez, W., Gómez, D., & Thomson, P. (2019). Ajuste de modelos de elementos finitos. *Revista Dyna*. 72(158). 177-189. .
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532009000200017