

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN
MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO ADICIONADOS CON FIBRAS PET**



JHON EDUER QUINTERO MAZO

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN
MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO ADICIONADOS CON FIBRAS PET**

JHON EDUER QUINTERO MAZO

**Trabajo de grado para optar por el título de
ingeniero civil**

**Director
MSC. MBA. MARTIN EDUARDO ESPITIA NERY**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020**



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

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

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

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



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



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

Nota de aceptación

Firmas del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. Noviembre de 2020

DEDICATORIA

A mi madre, por su enorme esfuerzo y apoyo incondicional que me ha dado para hacer de mí una mejor persona.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE ANEXOS	17
INTRODUCCIÓN	20
JUSTIFICACIÓN.....	21
PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
OBJETIVOS.....	23
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	24
CAPÍTULO 1 MARCO DE REFERENCIA.....	26
1.1. ANTECEDENTES.....	28
1.1.1. Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados – reforzados con fibras.....	29
1.1.2. Investigaciones y estudios sobre simulaciones numéricas de materiales compuestos	39
1.2. MARCO TEÓRICO	43
1.2.1. Características y propiedades de los materiales	43
1.2.2. Características y propiedades de los materiales reforzados con fibras.....	48
1.2.3. Teorías para el estudio de materiales compuestos	54
3.7.1. Simulación numérica	72
3.8. MARCO CONCEPTUAL.....	77
3.9. MARCO LEGAL.....	80
3.10. CONCLUSIONES PARCIALES	84
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA	85
2.1. ETAPA I: DETERMINACIÓN DE FUENTES DE INFORMACIÓN.....	87
2.1.1. Consulta de características y propiedades de compuestos bajo esfuerzos de compresión	89
2.1.2. Consulta de características y propiedades de compuestos bajo esfuerzos de flexión	91
2.2. ETAPA II: SELECCIÓN DEL MODELO Y SIMULACIÓN	92
2.2.1. Selección de modelos.....	93

2.2.2.	Simulación numérica	96
2.2.2.1.	Simulación ensayo de resistencia a la compresión	96
2.2.2.2.	Simulación ensayo de resistencia a la flexión	97
2.3.	ETAPA III: ANÁLISIS DE RESULTADOS	99
2.4.	CONCLUSIONES PARCIALES	101
CAPÍTULO 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		102
3.1.	ETAPA I: DETERMINACIÓN DE FUENTES DE INFORMACIÓN	103
3.1.1.	Consulta de características y propiedades de compuestos bajos esfuerzos de compresión	104
3.1.2	Consulta de características y propiedades de compuestos	117
3.1.3	bajo esfuerzos de flexión	117
3.2.	ETAPA II: SELECCIÓN DEL MODELO Y SIMULACIÓN	129
3.2.1.	Selección de modelos.....	129
3.2.2.	Simulación numérica	131
3.2.2.1.	Simulación ensayo de resistencia a la compresión	133
3.2.2.2.	Simulación ensayo de resistencia a la flexión	154
3.3.	ETAPA III: ANÁLISIS DE RESULTADOS	164
3.4.	CONCLUSIONES	173
3.5.	RECOMENDACIONES	174
BIBLIOGRAFÍA.....		175
ANEXO 1.....		182
PROCESO DE MODELADO Y SIMULACIÓN		182
Comportamiento mecánico a compresión		190
Comportamiento mecánico a flexión		205

LISTA DE TABLAS

	PAG.
Tabla 1. Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.	29
Tabla 2. Investigaciones y estudios sobre simulaciones de materiales compuestos.	39
Tabla 3. Tipos de cemento según norma NTC 30.	44
Tabla 4. Clasificación de plásticos.	45
Tabla 5. Características físicas y mecánicas de fibras.	48
Tabla 6. Cuadro para el registro de la información seleccionada sobre los materiales compuestos sometidos a compresión.	90
Tabla 7. Cuadro para el registro de la información seleccionada sobre los materiales compuestos sometidos a flexión.	91
Tabla 8. Resumen de información - referencia (1) compresión.	104
Tabla 9. Resumen de información - referencia (2) compresión.	105
Tabla 10. Resumen de información - referencia (3) compresión.	106
Tabla 11. Resumen de información - referencia (4) compresión.	106
Tabla 12. Resumen de información - referencia (5) compresión.	107
Tabla 13. Resumen de información - referencia (6) compresión.	108
Tabla 14. Resumen de información - referencia (7) compresión.	109
Tabla 15. Resumen de información - referencia (8) compresión.	110
Tabla 16. Resumen de información - referencia (9) compresión.	111
Tabla 17. Resumen de información - referencia (10) compresión.	112
Tabla 18. Resumen de información - referencia (11) compresión.	113
Tabla 19. Resumen de información - referencia (12) compresión.	114
Tabla 20. Resumen de información - referencia (13) compresión.	114

Tabla 21. Resumen de información - referencia (14) compresión.	116
Tabla 22. Resumen de información - referencia (1) flexión.	117
Tabla 23. Resumen de información - referencia (2) flexión.	118
Tabla 24. Resumen de información - referencia (3) flexión.	118
Tabla 25. Resumen de información - referencia (4) flexión.	120
Tabla 26. Resumen de información - referencia (5) flexión.	121
Tabla 27. Resumen de información - referencia (4) flexión.	121
Tabla 28. Resumen de información - referencia (6) flexión.	122
Tabla 29. Resumen de información - referencia (6) flexión.	123
Tabla 30. Resumen de información - referencia (7) flexión.	124
Tabla 31. Resumen de información - referencia (8) flexión.	125
Tabla 32. Resumen de información - referencia (9) flexión.	126
Tabla 33. Resumen de información - referencia (10) tracción.	127
Tabla 34. Resumen de modelos constitutivos y criterios de falla a emplear.	129
Tabla 35. Condiciones de borde y dimensiones de probeta según normatividad para determinar la resistencia a la compresión	133
Tabla 36. Modelos y dosificación a emplear para simulación numérica de comportamiento a compresión.	134
Tabla 37. Parámetros seleccionados para el modelado de la respuesta a compresión y flexión del compuesto.	139
Tabla 38. Valores de la cuantía de refuerzo equivalente en función del porcentaje de inclusión en la matriz .	144
Tabla 39. Características mecánicas del mortero para la creación del material compuesto en la simulación.	144
Tabla 40. Características mecánicas de las fibras de PET para la creación del material compuesto en la simulación.	145
Tabla 41. Datos de salida de la simulación numérica – compresión.	153

Tabla 42. Condiciones de borde y dimensiones de probeta según normatividad para determinar la resistencia a la flexión.	154
Tabla 43. Modelos y dosificación a emplear para simulación numérica de comportamiento a flexión.	155
Tabla 44. Datos de salida de la simulación numérica – flexión.	163

LISTA DE FIGURAS

	PAG.
Figura 1. Hilo conductor marco de referencia	27
Figura 2. Fibras de PET (polietileno tereftalato)	47
Figura 3. Deformación de una matriz que rodea una fibra sometida a un esfuerzo a tracción.	51
Figura 4. distribución continua de fibras en barras y en malla.	52
Figura 5. distribución discontinua de fibras alineadas y dispersas.	52
Figura 6. Curva de resistencia residual a la tracción de morteros con fibras (ACI).	53
Figura 7. Esquema de comportamientos serie - paralelo de un material compuesto laminado.	57
Figura 8. Comportamiento elastoplástico perfecto.	63
Figura 9. Deformaciones plásticas ideales.	64
Figura 10. Deformaciones plásticas ideales.	65
Figura 11. Modelos numéricos de fisura.	66
Figura 12. Curva de tensión – deformación con ablandamiento.	67
Figura 13. Superficie de falla de William (William & Warnke 1975).	68
Figura 14. Superficie de fluencia del modelo de Von Mises.	71
Figura 15. Elemento finito lineal.	73
Figura 16. Elementos finitos bidimensionales, a) cuadrilátero, b) triangular.	73
Figura 17. Elementos finitos tridimensionales, a) tetraedro, b) hexaedro.	74
Figura 18. Geometría del elemento SOLID65 de ANSYS.	75
Figura 19. Hilo conductor para el desarrollo de la metodología.	86
Figura 20. Desarrollo de la primera etapa metodológica.	88
Figura 21. Fibras pet comercializadas por ACEBRI.	89

Figura 22. Criterios para la selección de la teoría o del modelo matemático.	93
Figura 23. Imagen de referencia ensayo y simulación de elemento sometido a compresión.	97
Figura 24. Imagen de referencia ensayo y simulación de elemento sometido a flexión.	98
Figura 25. Fases para el análisis de resultados de la etapa III, del desarrollo metodológico.	100
Figura 26. Desarrollo del proceso de simulación numérica.	132
Figura 27. Curva de resistencia residual a la tracción de morteros con fibras (ACI).	137
Figura 28. Geometría final del sólido para desempeño freten a esfuerzos de compresión.	147
Figura 29. Proceso de mallado hexaédrico para la geometría del sólido a compresión.	147
Figura 30. Restricción de desplazamiento en la base del sólido.	148
Figura 31. Asignación de cargas de compresión (b).	148
Figura 32. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.	149
Figura 33. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.	149
Figura 34. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.	150
Figura 35. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.	150
Figura 36. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.	151
Figura 37. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.	151
Figura 38. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 1.5% de inclusión.	152

Figura 39. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 1.5% de inclusión.	152
Figura 40. Geometría final del sólido para desempeño freten a esfuerzos de flexión.	158
Figura 41. Proceso de mallado hexaédrico para la geometría del sólido a flexión.	158
Figura 42. Condiciones de contorno para el sólido sometido a flexión.	159
Figura 43. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 0.0% de inclusión.	159
Figura 44. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.	160
Figura 45. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 0.5% de inclusión.	160
Figura 46. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.	161
Figura 47. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.	161
Figura 48. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.	162
Figura 49. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 1.5% de inclusión.	162
Figura 50. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.	163
Figura 51. Desempeño del compuesto a compresión en función de la longitud de las fibras – 2.5 Kg/m ³ .	164
Figura 52. Desempeño del compuesto a compresión en función de la longitud de las fibras - 10 Kg/m ³ .	165
Figura 53. Desempeño del compuesto a flexión en función de la longitud de las fibras – 2.5 Kg/m ³ .	166
Figura 54. Desempeño del compuesto a compresión en función de la longitud de las fibras – 10 Kg/m ³ .	167
Figura 55. Deformaciones del sólido a compresión en función del porcentaje de inclusión de fibras PET.	168

Figura 56. Deformaciones del sólido a flexión en función del porcentaje de inclusión de fibras PET.	169
Figura 57. Relación entre las deformaciones y la resistencia a la compresión del compuesto en función del porcentaje de incorporación de fibras PET.	170
Figura 58. Relación entre las deformaciones y la resistencia a la flexión del compuesto en función del porcentaje de incorporación de fibras PET.	171
Figura 59. Interfaz gráfica ANSYS MECHANICAL APDL 2020 R1.	182
Figura 60. Disciplinas para el análisis de los materiales.	183
Figura 61. Tipo de elemento a emplear en el análisis.	183
Figura 62. Selección del elemento SOLID65 (a).	184
Figura 63. Selección del elemento SOLID65 (b).	184
Figura 64. Selección del sistema de unidades.	185
Figura 65. Selección de modelos.	185
Figura 66. Selección del modelo de comportamiento para el mortero.	186
Figura 67. Definición características intrínsecas de la matriz – Módulo de elasticidad y módulo de Poisson.	186
Figura 68. Definición características intrínsecas de la matriz – densidad.	187
Figura 69. Propiedades para la simulación de elementos (patrón)	187
Figura 70. Adición del modelo de comportamiento para la inclusión.	188
Figura 71. Definición características intrínsecas de la inclusión – Módulo de elasticidad y módulo de Poisson.	188
Figura 72. Definición características intrínsecas de la inclusión – densidad.	189
Figura 73. Propiedades para la simulación de elementos (patrón).	189
Figura 74. Herramienta de dibujo de área rectangular.	190
Figura 75. Herramienta de dibujo de extracción de áreas.	190
Figura 76. Geometría final del sólido para desempeño frente a esfuerzos de compresión.	191
Figura 77. Proceso de mallado hexaédrico para la geometría del sólido.	191

Figura 78. Asignación de restricciones al desplazamiento (a).	192
Figura 79. Asignación de restricciones al desplazamiento (b).	192
Figura 80. Asignación de esfuerzos de compresión (a).	193
Figura 81. Asignación de esfuerzos de compresión (b).	193
Figura 82. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.	194
Figura 83. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión	195
Figura 84. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -0.5%).	196
Figura 85. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.	197
Figura 86. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.	198
Figura 87. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -1.0%).	199
Figura 88. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 1.0% de inclusión.	200
Figura 89. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 1.0% de inclusión.	201
Figura 90. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -1.5%).	202
Figura 91. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 1.5% de inclusión.	203
Figura 92. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 1.5% de inclusión.	204
Figura 93. Herramienta de dibujo de área rectangular.	205
Figura 94. Herramienta de dibujo de extracción de áreas.	206
Figura 95. Geometría final del sólido para desempeño freten a esfuerzos de flexión.	206
Figura 96. Proceso de mallado hexaédrico para la geometría del sólido.	207

Figura 97. Tamaño de los elementos del enmallado.	207
Figura 98. Asignación de restricciones al desplazamiento (a).	208
Figura 99. Asignación de restricciones al desplazamiento (b).	209
Figura 100. Asignación de esfuerzos de flexión (a).	210
Figura 101. Asignación de esfuerzos de flexión (b).	210
Figura 102. Deformación del solido por esfuerzos de flexión – 0.0% de inclusión.	211
Figura 103. Deformación máxima del solido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.	212
Figura 104. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -0.5%).	213
Figura 105. Deformación del solido por esfuerzos de flexión – 0.5% de inclusión.	214
Figura 106. Deformación máxima del solido por esfuerzos de flexión – 0.5% de inclusión.	215
Figura 107. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -1.0%).	216
Figura 108. Deformación del solido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.	217
Figura 109. Deformación máxima del solido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.	218
Figura 110. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -1.5%).	219
Figura 111. Deformación del solido por esfuerzos de flexión – 1.5% de inclusión.	220
Figura 112. Deformación máxima del solido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.	221

LISTA DE ANEXOS

	PAG.
Anexo 1. Proceso de modelado y simulación	182

PERIODO: 2020-3

PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIANTE: JHON EDUER QUINTERO MAZO **CÓDIGO:** 506110

DIRECTOR SUGERIDO: MARTIN EDUARDO ESPITIA NERY

ALTERNATIVA: AUXILIAR DE INVESTIGACIÓN

1 TÍTULO

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN
MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO ADICIONADOS CON FIBRAS PET**

2 ALTERNATIVA

AUXILIAR DE INVESTIGACIÓN

3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

MATERIALES.

3.1 EJE TEMÁTICO

COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO

INTRODUCCIÓN

El uso desmedido de productos sintéticos, de difícil degradación, representa uno de los problemas medioambientales más graves de este siglo y del siglo pasado. Los polímeros y todos sus derivados son un gran reflejo de dicha sombra ecológica, que cada vez amenaza con mayor fuerza la estabilidad de los distintos ecosistemas del planeta, incidiendo directamente de forma negativa en la vida del hombre.

La problemática de los polímeros radica principalmente en dos factores, el primero, es el periodo de tiempo necesario para que llegue a degradarse por completo, siendo lo mínimo algunos cientos de años y el segundo factor, es la dependencia desmedida que se manifiesta en el uso indiscriminado de este material, habiendo aumentado su producción aproximadamente 520 veces más de lo que se producía hace apenas 60 años. Situación que ha llevado a depositar millones de toneladas de polímeros en vertederos dispuestos para almacenar los residuos por el tiempo necesario para su desintegración, esto sin contar las miles de toneladas que cada año van a parar a los océanos del planeta, claramente teniendo en cuenta el crecimiento desbordado de la producción de polímeros y el ineficiente o inexistente proceso de eliminación de residuos del mismo, se hace necesaria una alternativa eficaz para la mitigación de estos desechos.¹

Una alternativa eficaz para la regulación de estos residuos es el aprovechamiento de los productos pet, que pueden ser implementados en la composición de materiales tradicionales de construcción, como lo son el mortero y el concreto, en forma de fibras. Trayendo ventajas significativas en el comportamiento de los materiales. De igual manera generando un impacto positivo en el medio ambiente, mediante una correcta utilización de residuos tipo pet.

¹ Perdomo M, Gilberto A. Revista Iberoamericana Polímeros: PLÁSTICOS Y MEDIO AMBIENTE. Volumen 3(2) Abril 2002. [en línea]: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/abr/perdomo.pdf>

JUSTIFICACIÓN

El estudio sobre morteros adicionados con fibras sintéticas para el mejoramiento de sus propiedades representa un gran campo de investigación, que en conjunto con los problemas medioambientales por los cuales atraviesa el planeta, permite, ahondar y formular posibles soluciones tanto en el mejoramiento de las propiedades (mecánicas) de los mismos, al mismo tiempo que se hace frente a las complicaciones ambientales que representan los desechos “plásticos”. Repercutiendo en el avance tecnológico de los morteros y aportando una solución al manejo y reutilización de residuos.

Es posible contemplar la desbordada producción de productos plásticos que viene creciendo desde la mitad del siglo XX, pasando de producirse a nivel mundial medio millón de toneladas en 1950 a una producción anual de aproximadamente 260 millones de toneladas a nivel global. Si se habla únicamente de botellas plásticas, las cuales se construyen a partir de PET, estas generaron alrededor de 10 millones de toneladas de desechos para el año 2007, una cifra que viene con un aumento del 15 % anualmente.

De lo anterior se advierte el por qué los desechos PET representan una exagerada proporción de los desechos sólidos urbanos a nivel mundial. Por otro lado los productos de tereftalato de polietileno (PET) casi siempre son aprovechables, de ahí la importancia de presentar una solución de reutilización de estos materiales en forma de fibras de refuerzo para matrices cementicias.

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El complejo panorama que se presenta hoy, en nuestro país y en el mundo entero, sobre el manejo de residuos plásticos, debido a su carácter acumulativo (ya que la cantidad de productos plásticos aumenta conforme pasan los días) y de largo plazo por su condición de no biodegradables (lo que impide su reintroducción en los ciclos naturales), representan un verdadero reto en su regulación, debido entre otras cosas al inadecuado aprovechamiento de estos residuos, que en el mejor de los casos arriba en el relleno sanitario de la ciudad .²

En contexto con la problemática mencionada y teniendo en cuenta la necesidad actual de ahondar e investigar sobre nuevas composiciones, que mejoren el comportamiento de los materiales tradicionales empleados en la construcción, surge la pregunta: ¿Cómo simular el comportamiento mecánico de los morteros de cemento hidráulico con adiciones de fibra de PET reciclado?

Para responder la pregunta en cuestión, se plantea elaborar un proyecto que simule el comportamiento mecánico de los morteros de cemento hidráulico con adiciones de fibra de PET reciclado, que sirva para analizar el desempeño de estos a bajo costo.

² TÉLLEZ MALDONADO, Alejandra. *Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Estudios Ambientales-IDEA. La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. Bogotá, Colombia. 2012. [en línea]: <http://bdigital.unal.edu.co/7080/1/905077.2012.pdf>*

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Simular el comportamiento mecánico en cuanto a flexión y compresión de morteros de cemento hidráulico fibro-reforzados con macrofibras sintéticas PET (polietileno de tereftalato).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener datos confiables y significativos respecto a las características específicas de los materiales a emplear en el modelo.
- Definir la influencia que generan las macrofibras sintéticas tipo PET, en función de su volumen en la mezcla y su longitud.
- Contrastar por medio del análisis de los resultados obtenidos la aproximación del modelo, en comparación a resultados experimentales de las investigaciones consultadas.

ALCANCES Y LIMITACIONES

ALCANCES

Con el desarrollo de este trabajo de investigación se pretende evaluar la incidencia, en morteros de concreto hidráulico, de fibras sintéticas tipo PET (tereftalato de polietileno) a partir de la correcta modelación numérica de los esfuerzos y de los materiales en un software de diseño. Simulando el comportamiento mecánico de flexión y compresión de un mortero sin adiciones de fibra y otro de mortero fibrorreforzado, a través del análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones de morteros con de diferentes porcentajes de fibra incorporados en la matriz cementicia, encontrando de este modo, la cantidad o dosificación óptima, para la cual el modelo de mortero adicionado obtenga resultados superiores en cuanto su comportamiento a flexión y compresión.

Buscando obtener resultados confiables que permitan predecir el comportamiento que tendrán los materiales en la realidad, es decir un mortero de mejores características mecánicas, lo que se traduce a matrices cementicias más resistentes y duraderas e indirectamente de un costo menor a largo plazo.

LIMITACIONES

Limitación temporal

La duración de la ejecución del proyecto debe ser de alrededor de 4 meses, es decir inferior a un periodo académico de la universidad. Para lo cual se presentaron objetivos medibles y alcanzables en este periodo de tiempo, dando inicio al mismo, en el primer periodo académico del año 2020 (ver tabla).

Limitación espacial

El presente trabajo de investigación se desarrollará en la ciudad de Bogotá, distrito capital de Colombia. De manera remota a la institución educativa, dada las condiciones sanitarias actuales.

Limitación económica

Los recursos financieros del proyecto son suficientes para desarrollar apropiadamente el trabajo de investigación planteado.

CAPÍTULO 1

MARCO DE REFERENCIA

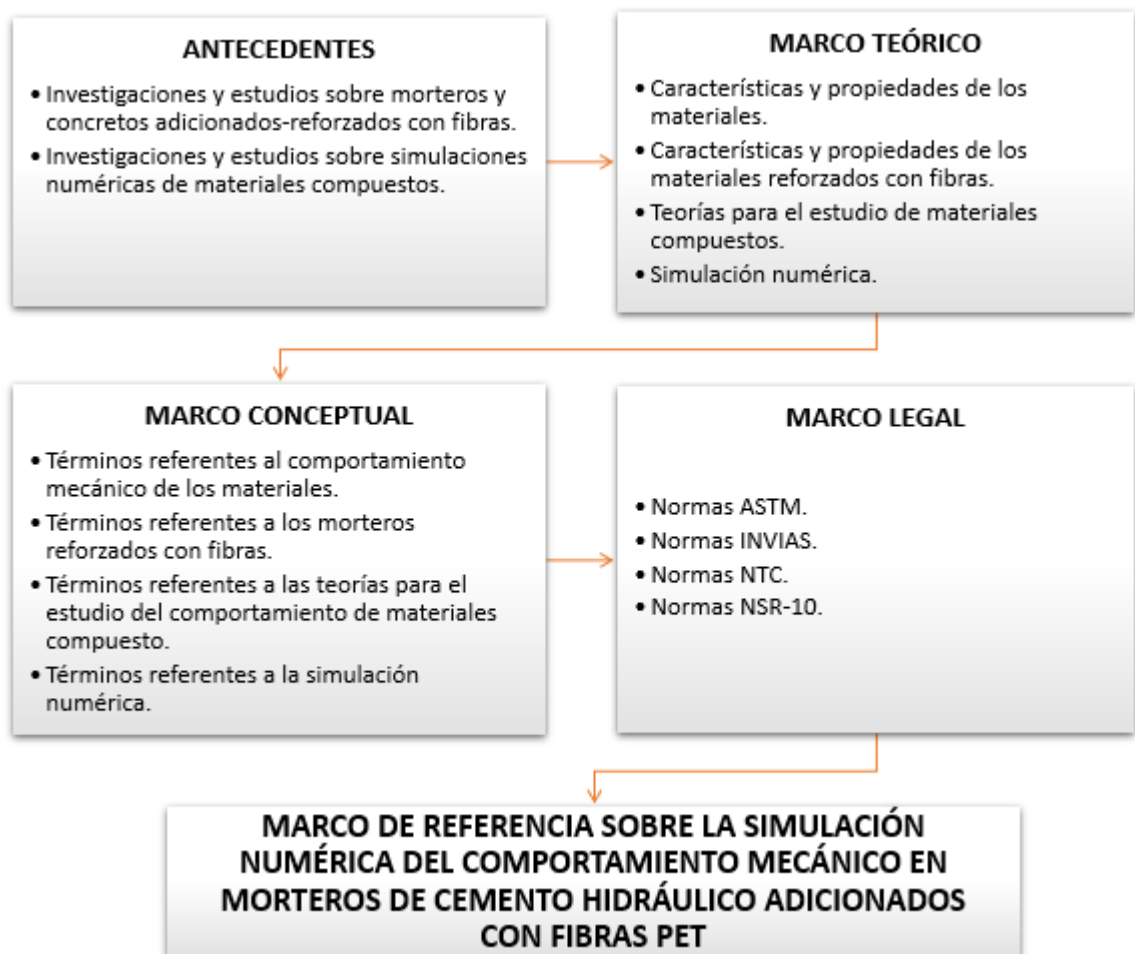
Mediante este capítulo se pretende dar a conocer los fundamentos teóricos que sirvieron como base para la formulación y solución de la problemática tratada. En este sentido se exponen los antecedentes, teorías, definiciones y normas, que permitan una contextualización adecuada del inconveniente que significa para el hombre los residuos plásticos tipo PET (tereftalato de polietileno) y como la implementación de los mismos en mezclas de mortero, brindan un aporte tanto a la solución del problema, como al campo de los materiales compuestos en la rama de la ingeniería civil.

Los antecedentes extraídos de la literatura, permiten vislumbrar las contribuciones realizadas al campo de los materiales fibrorreforzados, en donde se ha utilizado como matriz del compuesto a algunos de los principales materiales en la industria de la construcción, como lo son el mortero y el concreto. Por su parte las bases metódicas y teóricas presentes en esta sección, están orientadas a mostrar los conceptos relacionados a las propiedades intrínsecas de los materiales objeto del presente estudio, sus principales formas de comportamiento y algunos de los principales métodos que permiten describir y analizar matemáticamente, el desempeño de estos cuando se ven sometidos a esfuerzos.

Como parte esencial de la investigación también se muestra en este capítulo nociones que permiten comprender la importancia de analizar a través de una simulación numérica, el comportamiento mecánico de morteros fibrorreforzados con PET, cuando son sometidos a esfuerzos de flexión y compresión. Esto a través de herramientas (softwares para el análisis de materiales) que cada día ganan más relevancia en el campo de la ingeniería, gracias a las ventajas que puede llegar a ofrecer esta alternativa, frente a los tradicionales ensayos de laboratorio.

En la figura mostrada a continuación se presenta el hilo conductor empleado para la elaboración del marco de referencia de la investigación sobre la simulación numérica del comportamiento mecánico en morteros de cemento hidráulico adicionados con fibras PET:

Figura 1. Hilo conductor marco de referencia.³



Fuente: propia.

³ Fuente propia.

1.1. ANTECEDENTES

Los morteros han sido empleados históricamente debido a sus propiedades aglutinantes, desde hace miles de años, teniendo una aparición clara, por primera vez en la época neolítica. Producto del material residual compuesto por caliza y agua, que se formaba después de apagar el fuego de una hoguera, surgiendo de esta forma un mortero denominado de “cal apagada” y que presentaba cualidades ligantes.

Desde el neolítico, hasta la actualidad han pasado alrededor de 10.000 años y el uso del mortero sigue estando vigente y con más aplicaciones que nunca, claro está que, con significativos cambios en su composición física y química, en especial desde la aparición de los cementos “hidráulicos artificiales” en 1811, gracias al aporte de James Frost. La evolución de los morteros ha ido de la mano con las distintas necesidades que surgen de enfrentar las nuevas tendencias constructivas, lo que lleva rotundamente al desarrollo de morteros aplicables a situaciones muy específicas.⁴

Uno de los campos de investigación más fructíferos, con respecto al avance tecnológico de los morteros, es la adición de fibras para estabilizar y reforzar al mismo, aunque la concepción de este no surge en la actualidad, si no que aparece prácticamente al mismo tiempo que los ligantes compuestos de caliza, situación que se evidencia en las ruinas de construcciones realizadas en el neolítico, empleando adobe y tapia (masa de barro mezclada con paja y moldeada con forma de prisma). Ya en la antigüedad supieron emplear las fibras de paja como una respuesta,

⁴ ÁLVAREZ, José Ignacio; MARTÍN, Antonio y GARCÍA CASADO, Pedro J. Departamento de Química y Edafología, Facultad de Ciencias Universidad de Navarra. HISTORIA DE LOS MORTEROS. P. 1. [en línea]: https://www.researchgate.net/profile/Jose_Alvarez37/publication/273110688_Historia_de_los_morteros/links/54f6fa1e0cf28d6dec9baf50/Historia-de-los-morteros.pdf

económica y eficaz para problemas como la retracción de los adobes, que, al estar compuestos casi en su totalidad por barro, presentaban alteraciones importantes.⁵

1.1.1. Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados – reforzados con fibras

Algunos estudios e investigaciones sobre los morteros y concretos adicionados y/o reforzados con fibras (ver tabla 1).

Tabla 1. Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.⁶

<p>LUGAR DE ESTUDIO: MADRID, ESPAÑA. SEPTIEMBRE 2006.</p> <p>AUTORES: F. PUERTAS, A. GIL-MAROTO, M. PALACIOS, T. AMAT.</p> <p>TITULO: MORTEROS DE ESCORIA ACTIVADA ALCALINAMENTE REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO AR. COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES.</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>Se estudio el comportamiento de morteros de escoria activada alcalinamente reforzados con fibras de vidrio álcali-resistentes (AR), especialmente diseñadas para reducir la retracción al secado en sistema cementantes. Para ello se prepararon morteros de escoria activada alcalinamente y de cemento Portland como material de referencia. El</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <p>1. La incorporación de fibras de vidrio AR, en un contenido en torno al 0,22% en peso de ligante, en morteros de escoria activada alcalinamente con waterglass reduce la retracción al secado en un 20%.</p> <p>2. Este porcentaje de fibra en el mortero no afecta negativamente al desarrollo resistente a flexo tracción y</p>

⁵ GONZALO SÁNCHEZ, Vanesa. Universidad Politécnica de Madrid Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. MORTEROS DE BARRO ESTABILIZADOS CON FIBRAS DE PAJA, ESPARTO Y SISAL PARA SU USO COMO REVESTIMIENTOS. 2012. [en línea]: http://oa.upm.es/14429/2/TESIS_MASTER_VANESA_GONZALO_SANCHEZ.pdf

⁶ Fuente propia.

Tabla 1 (continuación). Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.

<p>porcentaje de fibra AR en los morteros varió entre 0-1,1% en peso de ligante. Los morteros preparados fueron sometidos a los siguientes ensayos: retracción al secado, resistencias mecánicas a 2, 7 y 28 días, ensayos de tenacidad, resistencia al impacto y comportamiento resistente frente a altas temperaturas.</p>	<p>compresión. Tampoco afecta a su resistencia al impacto y tenacidad.</p>
<p>LUGAR DE ESTUDIO: ESPAÑA. (2000) AUTORES: F. PUERTAS, T. AMAT, T. VÁZQUEZ. TÍTULO: COMPORTAMIENTO DE MORTEROS DE CEMENTOS ALCALINOS REFORZADOS CON FIBRAS ACRÍLICAS Y DE POLIPROPILENO.</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>En el trabajo se estudió el comportamiento de morteros de cementos alcalinos reforzados con fibras de distinta naturaleza (acrílica y de polipropileno). Se evaluó también la estabilidad química de dichas fibras en medios fuertemente alcalinos en tres matrices diferentes: escoria vítrea de horno alto activada con NaOH 2M, temperatura ambiente (22 °C); ceniza volante activada con NaOH 8M, curada a 85 °C durante 24 horas y 50%ceniza/50%escoria activada con NaOH 8M, temperatura ambiente. El contenido de fibra fue del 0,2 y 1% en volumen de mortero. Los ensayos realizados fueron: tenacidad e índice de tenacidad, resistencia al impacto y retracción al secado. Sobre las probetas ensayadas a impacto se realizó un estudio microestructural por SEM/EDX.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Con bajos contenidos en fibra (0,2% en volumen), la tenacidad y el índice de tenacidad de estos morteros no se ve afectado. Con contenidos superiores (1%) se produce un incremento en los correspondientes valores. Este incremento es mayor en los morteros de escoria activada alcalinamente. 2. Para las tres matrices estudiadas, las fibras de polipropileno incrementan la resistencia al impacto en mayor medida que las fibras acrílicas. El efecto de refuerzo es más significativo en la matriz A y cuando el contenido de fibra es del 1% en volumen. El estudio microestructural realizado sobre estos morteros ha demostrado que las fibras acrílicas presentan signos de alteración y gran cantidad de depósitos en su superficie, mientras que las de polipropileno se encuentran en mejor estado.

Tabla 1 (continuación). Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.

	<p>3. La retracción al secado de estos morteros se modifica dependiendo del tipo de matriz y fibra. En los morteros de escoria activada, las fibras no reducen la retracción. En los morteros de ceniza activada reforzados con las fibras acrílicas, la retracción es menor que cuando contienen fibras de polipropileno o carecen de ellas. Finalmente, en los morteros de ceniza/escoria activada, las dos fibras reducen la retracción al secado.</p>
<p>LUGAR DE ESTUDIO: MADRID, ESPAÑA. (2008). AUTORES: ENFEDAQUE DÍAZ, ALEJANDRO. TÍTULO: RESISTENCIA A IMPACTO DE MORTEROS DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO (GRC)</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>Se evaluó la influencia de 5 tipos diferentes de adiciones en el comportamiento mecánico del GRC. Realizando diferentes tipos de ensayos mecánicos (tracción simple, flexión en 4 puntos) sobre GRC joven y sobre GRC envejecido.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <p>1. Es necesario emplear fibras de vidrio para mantener la integridad de los elementos que sufren el impacto.</p> <p>2. Parece que la razón principal del deterioro de las propiedades del GRC con el tiempo es la corrosión de las fibras de vidrio.</p> <p>3. La reducción del área resistente de las fibras produce concentraciones de tensiones en las mismas y en definitiva una pérdida de resistencia y ductilidad del GRC.</p>
<p>LUGAR DE ESTUDIO: SANTIAGO DE CHILE (DICIEMBRE 2002).</p>	

Tabla 1 (continuación). Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.

<p>AUTORES: PRADO, F., GONZÁLEZ, M.</p> <p>TÍTULO: INCIDENCIA DE LA ADICIÓN DE FIBRAS POLIMÉRICAS PARA MORTEROS SOBRE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN DE ESTUCOS DE BARRO</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>En el trabajo se estudió el uso de fibras poliméricas como refuerzo a estucos de mortero de adobe. Para ello se desarrollaron en laboratorio una muestra cero y muestras con adiciones de fibras, en diferentes dosificaciones, las cuales fueron tes-teadas en la prensa de ensayo, a modo de obtener sus parámetros característicos de flexión y compresión.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se comprobó que la adición de fibras poliméricas a la mezcla de barro contribuye al aumento de la resistencia de flexión y compresión de los estucos. 2. La mezcla de fibras de distintos tamaños, generan mejores resultados en la resistencia mecánica de los morteros. 3. Las fibras de polipropileno mejoran significativamente la elasticidad de los morteros de adobe, disminuyendo deformaciones bajo cargas permanentes. 4. Los costos asociados a la incorporación de las fibras no son incidentes en el precio del producto terminado. 5. Debido a la adición de fibras en los morteros, se mejoró la resistencia a la flexión en un 30 % y la resistencia a la compresión en un 15%.
<p>LUGAR DE ESTUDIO: VENEZUELA (2009).</p> <p>AUTORES: SUSAN BERNAL, JOHANNA ESGUERRA, JAVIER GALINDO, RUBY MEJÍA DE GUTIÉRREZ, ERICH RODRÍGUEZ, MARISOL GORDILLO Y SILVIO DELVASTO</p> <p>TÍTULO: MORTEROS GEOPOLIMERICOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO BASADOS EN UN SISTEMA BINARIO DE UN SUBPRODUCTO INDUSTRIAL</p>	

Tabla 1 (continuación). Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.

<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>El estudio consistió en evaluar las propiedades mecánicas de morteros geopoliméricos basados en una escoria siderúrgica colombiana (GBFS) y en un metacaolín (MK) de alta pureza, reforzados con fibras de carbono (FC). El anterior reforzamiento fue incorporado al sistema en volúmenes del 0.10, 0.15 y 0.21%. En estos morteros se evaluaron propiedades tales como: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y sensibilidad a la entalla.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La incorporación de FC (fibras de carbono) en el mortero geopolimérico, no afecta el desarrollo resistente del material y genera reducciones en la resistencia a la compresión, inferiores a un 20%, para todos los volúmenes de fibra incorporados. 2. El efecto más notorio de la incorporación de FC en las propiedades mecánicas de morteros geopoliméricos fue observado en el comportamiento en flexión del material. El módulo de rotura de los morteros reforzados es superior que el de la matriz sin reforzamiento cuando se incorporaron porcentajes de FC iguales o superiores a un 0.15%. 3. La incorporación de FC en el sistema genera un incremento sustancial en el KIC del material, lo cual puede ser atribuido a un proceso de detención de propagación de grieta.
<p>LUGAR DE ESTUDIO: MEDELLÍN, COLOMBIA. (1997). AUTORES: ANACILA ARBELÁEZ ARCE TÍTULO: MORTEROS REFORZADOS CON FIBRAS DE BAMBU</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>Se realizó en las instalaciones del Proyecto Nacional de Bambú, en San José, Costa Rica, ensayos con dosificaciones y porcentajes de refuerzo que permitieran una</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. En términos generales, al reducir la relación B/C (relación bambú cemento), manteniendo constante la dosificación, se mejora

Tabla 1 (continuación). Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.

<p>trabajabilidad adecuada de la mezcla el proceso en la preparación manual de la mezcla; variaciones en el contenido de humedad del bambú; elección del material de refuerzo por tamaño; comportamiento con respecto a retención de humedad; tiempos de fraguado; influencia de la composición del desecho en el proceso de endurecimiento de la pasta.</p>	<p>ostensiblemente la resistencia mecánica y las propiedades físicas de absorción de humedad y contracciones por secado.</p> <p>2. Se debe mantener la relación A/C lo más baja posible (0.4 o 0.5), ya que la humedad que contiene la fibra en el punto de saturación de fibra, la entrega lentamente al compuesto</p>
<p>LUGAR DE ESTUDIO: CARACAS, VENEZUELA. (2008). AUTORES: ALESMAR LUIS, NALIA RENDÓN, MARÍA EUGENIA KORODY. TITULO: DISEÑOS DE MEZCLA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) – CEMENTO</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>En el estudio se desarrollaron mezclas basadas en la determinación de la dosificación de cada uno de los materiales utilizados para lograr una mezcla óptima, que pudiera servir más adelante como material de construcción de obras civiles y como un nuevo método de disposición final de los residuos de PET.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <p>1. El PET puede ser usado como agregado en las mezclas, a fin de contribuir al proceso de disposición final de los residuos plásticos contaminantes, lo cual ayuda de forma indirecta a disminuir el impacto ambiental.</p> <p>2. Al mantener constante la cantidad de cemento y variar la cantidad de arena para agregar el PET, hace que varíe la resistencia a compresión.</p> <p>3. Al agregar PET a una mezcla de concreto se pierde un poco de resistencia, aunque con la obtenida se podría utilizar como mezcla para elementos que no requieran de estética</p>

Tabla 1 (continuación). Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.

	<p>o para bloques u otros elementos que no soporten importantes cargas.</p> <p>4. La densidad de la mezcla de PET – Cemento es menor que los concretos o morteros, ya que el PET es menos pesado que la arena y la piedra, lo que hace que la mezcla sea más liviana, lo cual la hace interesante en estructuras sometidas a bajas cargas.</p>
<p>LUGAR DE ESTUDIO: VALENCIA, ESPAÑA. (2011). AUTORES: FERNANDO MUÑOZ CEBRIÁN. TITULO: COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO: INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE FIBRA ADICIONADO</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>El trabajo tiene como objetivo estudiar la influencia de la incorporación de fibra de polipropileno multifilamento en hormigones de altas prestaciones, en las propiedades mecánicas del hormigón endurecido.</p> <p>En la investigación se realizaron ensayos comparativos entre un mortero patrón, que no contenía fibras y morteros con distinto porcentaje de fibra adicionado. La fibra adicionada osciló entre el 5% y el 20% en peso del cemento. Las propiedades del hormigón que se estudiaron fueron la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexotracción.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La incorporación de fibras de polipropileno, tiene una serie de repercusiones sobre las propiedades del hormigón en estado fresco, destacando entre ellas la reducción de la trabajabilidad. A 2. Se ha podido observar que la resistencia a compresión aumenta a medida que le añadimos fibra de polipropileno, pero a partir de la cantidad del 5% de fibras en peso de cemento. 3. Se observo que en todas las configuraciones de concreto adicionado con fibras de polipropileno, la resistencia a la flexotracción no tuvo

Tabla 1 (continuación). Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.

	ningún aumento significativo y por el contrario en algunos casos su resistencia disminuyo.
<p>LUGAR DE ESTUDIO: MÉXICO. (JUNIO DE 2011). AUTORES: CARLOS JAVIER MENDOZA, CARLOS AIRE Y PAULA DÁVILA TITULO: INFLUENCIA DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADOS PLÁSTICO Y ENDURECIDO</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>Se estudió el efecto que tiene la incorporación de fibras cortas de polipropileno en las propiedades del concreto en estados fresco y endurecido. Las variables que se consideran son el tamaño máximo del agregado grueso, los finos en la arena y el contenido de fibras. Se fabricaron ocho mezclas de concreto las cuales se ensayaron en estado fresco y a las edades de 7 y 28 días.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. El empleo de fibras de polipropileno en las mezclas de concreto modifica su consistencia cuando los consumos de fibra son elevados (del orden de 5 kg/m³ o superiores). 2. Por su parte, los consumos de fibras de polipropileno igual o mayor a 3 kg/m³ de concreto, reducen en forma importante el agrietamiento por contracción plástica. 3. La resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y la deformación unitaria a la falla por compresión no se modifican en forma significativa por la inclusión de fibras hasta para consumos de 5 kg/m³. 4. La resistencia a tensión por flexión se modifica, aunque la tendencia no queda definida totalmente ya que en algunos casos la incrementa y en otros la reduce.
<p>LUGAR DE ESTUDIO: BOGOTÁ D.C.</p>	

Tabla 1 (continuación). Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.

<p>(2017) AUTORES: DIEGO ALEXANDER TORRES TITULO: DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA RESIDUAL PROMEDIO (ANÁLISIS POST- FISURACIÓN) DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRA SINTETICA DE PET+PP.</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>El trabajo pretendió realizar una comparación entre el concreto simple y reforzado con fibras, teniendo en cuenta varias dosificaciones y un mismo diseño de mezcla, calculando el esfuerzo residual y por medio de este establecer parámetros de comparación. Esto mediante el ensayo ASTM 13993 el esfuerzo residual de una mezcla de concreto con fibras sintéticas, y su comportamiento post-fisuración.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mediante el uso de fibras de polipropileno se reduce las pequeñas fisuras por contracción que se desarrollan en el concreto. 2. las fibras sintéticas mejoran el comportamiento en casos de microfisuración ocasionada por efectos de temperatura, fraguado, endurecimiento o contracción y expansión térmica. 3. La falla de las viguetas sin fibra evidencio que el concreto falla en 0.01 mm y con fibra fallan en promedio en 0,2 mm, lo que indica un leve aumento de la resistencia en la flexión a la fisuración. 4. La relación agua/cemento es el principal factor que se debe cuidar en el diseño de mezclas ya que afecta de manera directa a la contracción por secado, teniendo efectos negativos sobre el $f'c$ de diseño, así como las condiciones futuras del concreto.
<p>LUGAR DE ESTUDIO: REGIÓN METROPOLITANA DE CHILE (MARZO DE 2018) AUTORES:</p>	

Tabla 1 (continuación). Investigaciones y estudios sobre morteros y concretos adicionados-reforzados con fibras.

ERNEST BERNAT-MASOA Y OTROS. TITULO: ADICIÓN DE FIBRAS DE ESPARTO EN MORTERO DE CEMENTO.	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>En la investigación se utilizó dos tipos distintos de materiales, cemento portland y fibras alfa. Las fibras alfa fueron secadas industrialmente sumergido en soluciones químicas de NaOH y NaClO, y secado nuevamente para producir finalmente un cable de fibra alfa que es presentado en rollo.</p> <p>Para realizar los ensayos se realizaron dos tipos diferentes de pruebas, para determinar la respuesta mecánica de las fibras. Uno de ellos orientado a determinar el comportamiento de compresión, realizado en muestras cubicas. El segundo destinado a determinar la respuesta a la flexión del material compuesto, es decir el mortero fibrorreforzado.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La mejor resistencia a la flexión se obtiene para dos combinaciones: la dosis mínima de las fibras más largas y La dosis máxima de las fibras más cortas. 2. Considerando el procedimiento de producción y los resultados obtenidos, se sugiere utilizar una longitud máxima de 10 mm al agregar fibras alfa al mortero fresco particular usado. 3. Agregar 5 kg / m³ o más de fibra alfa causa problemas de mezcla con el mortero Portland considerado y requiere energía extra para compactar el mortero en los moldes. 4. La longitud de las fibras puede contribuir a la adherencia entre las fibras y el mortero. Se deduce indirectamente del análisis de los resultados generales, pero las pruebas de adherencia de fibra de mortero fueron necesarias para confirmar este punto. 5. Las técnicas experimentales propuestas podrían ser aplicables para otros materiales reforzados con fibra además del cemento. Por lo tanto, la metodología presentada es exportable a otros materiales sólidos, cuya disipación de energía de craqueo debe medirse.

Fuente: propia.

1.1.2. Investigaciones y estudios sobre simulaciones numéricas de materiales compuestos

Algunos estudios e investigaciones sobre las simulaciones numéricas de materiales compuestos (ver tabla 2).

Tabla 2. Investigaciones y estudios sobre simulaciones de materiales compuestos.⁷

<p>LUGAR DE ESTUDIO: GAZA, PALESTINA. (JUNIO DE 2019)</p> <p>AUTORES: MAHER AL-TAYEB MUSTAFA Y OTROS.</p> <p>TITULO: EFFECT OF PARTIAL REPLACEMENT OF SAND BY PLASTIC WASTE ON IMPACT RESISTANCE OF CONCRETE: EXPERIMENT AND SIMULATION (EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE ARENA POR RESIDUOS PLÁSTICOS SOBRE LA RESISTENCIA AL IMPACTO DE HORMIGÓN: EXPERIMENTO Y SIMULACIÓN)</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>En la investigación se analizó el comportamiento del hormigón frente al impacto por caída de un peso de aproximadamente 30 Newton, en muestras con diferentes cantidades de adiciones plásticas (0%, 5%, 10% y 20%) como suplente de agregado fino. Se desarrolló de manera experimental mediante la aplicación de pruebas de compresión y módulo de elasticidad (ASTM C 39 y ASTM C 78 respectivamente) en cilindros de 200 mm de altura y un diámetro de 100 mm, y pruebas de carga a flexión por impacto de 3 puntos en vigas de 50 mm X 100 mm X 400 mm, con tramos de carga de 300 mm (todas las probetas fueron ensayadas a los 90 días de curado).</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La trabajabilidad del concreto se ve comprometida frente a la adición de elementos de policarbonato, de igual manera se observó que el asentamiento disminuyó en presencia de las partículas plásticas. 2. El aumento de plástico en el hormigón en reemplazo de la arena en general representó la disminución en la resistencia a la compresión del concreto. 3. Es posible predecir de forma correcta la carga en comportamientos de desplazamiento de hormigón plano a través del modelado y simulación de elementos finitos.

⁷ Fuente propia.

Tabla 2 (continuación). Investigaciones y estudios sobre simulaciones de materiales compuestos.

<p>Una segunda parte del estudio consistió en la simulación numérica mediante la formulación de elementos finitos en el software LUSAS. Con una representación de la viga mediante 8 elementos hexaédricos que simbolizan las esquinas o nodos de esta en el sistema coordenado de la interfaz.</p>	<p>4. La simulación del problema es un avance que permite el ahorro de recursos económicos y de tiempo, en cuanto que proporciona resultados precisos y realistas.</p>
<p>LUGAR DE ESTUDIO: REPUBLICA DE CHINA (JUNIO DE 2019) AUTORES: XINJIAN SUN Y OTROS. TITULO: MECHANICAL PROPERTIES TESTS AND MULTISCALE NUMERICAL SIMULATIONS FOR BASALT FIBER REINFORCED CONCRETE (ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y SIMULACIONES NUMÉRICAS MULTIESCALA PARA HORMIGÓN ARMADO CON FIBRA DE BASALTO)</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>En el estudios se analizó la incidencia del contenido y la longitud de fibras de basalto en las propiedades mecánicas del hormigón, tanto de forma experimental como por simulación.</p> <p>En la parte experimental se ensayó el comportamiento a la compresión y a la división en especímenes cubicas de 150 mm de lado, de igual forma se estudió el comportamiento a flexión en 3 puntos en vigas de 100 mm X 100 mm x 400 mm. La fabricación de estos se hizo por mezcla en seco, para distintas dosificaciones de fibra y distintas longitudes de fibra de 0%, 1%, 2%, 3%, 4% y 5%.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <p>1. La adición de fibras de basalto en el hormigón aumenta su resistencia a compresión y división. Pero por el contrario la adición de porcentajes altos hace disminuir la resistencia.</p> <p>2. La inclusión de fibras de 6 mm, apporto mejores resultados en cuanto a tracción por compresión y división que las fibras de 12 mm.</p> <p>3. Se pudo establecer el modelo de daño progresivo del hormigón por medio de la teoría de homogenización de Mori – Tanaka, obteniendo la información necesaria para elaborar la simulación de elementos finitos.</p>

Tabla 2 (continuación). Investigaciones y estudios sobre simulaciones de materiales compuestos.

<p>La simulación numérica fue de tipo multi escala, desarrollando un modelo mesoscópico según la teoría de la homogenización el cual fue llevado a escala macroscópica para su modelado por elementos finitos en el software de simulación DIGIMAT.</p>	<p>4. La inclusión del 2% de fibras de basalto de 6 mm de longitud, mejora las características mecánicas del concreto,</p> <p>5. Se pudo establecer una ecuación parabólica que representa el comportamiento del hormigón en presencia de fibras de basalto, la cual encaja de manera acertada con los resultados de la simulación numérica.</p>
<p>LUGAR DE ESTUDIO: REPUBLICA ARGENTINA (JUNIO DE 2012)</p> <p>AUTORES: PEDASTA, Juan Manuel.</p> <p>TITULO: SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN SIMPLE APLICANDO LA TÉCNICA DE LA HOMOGENIZACIÓN</p>	
<p>DESCRIPCIÓN:</p> <p>El análisis del comportamiento del hormigón se basó en el análisis del elemento de volumen representativo EVR. Donde la estructura heterogénea debida al compuesto, se reemplaza por un medio homogéneo el cual se comporta de manera elástica.</p> <p>Para establecer el volumen apropiado se analizaron distintos tamaños de celdas constituidos por el mismo compuesto: 10x10, 15x15, 20x20, 30x30 y 40x40. Dando como resultado un tamaño óptimo para una celda de 30x30.</p>	<p>CONCLUSIONES:</p> <p>1. Los costos computacionales de modelar materiales heterogéneos son muy elevados en comparación de los materiales homogenizados.</p> <p>2. Realizar análisis estadísticos sobre simulaciones con discretizaciones homogenizadas, es mucho más sencillo que si se hicieran sobre discretizaciones de manera heterogénea.</p> <p>3. Mediante esta metodología es posible implementar de mejor manera algoritmos que brinden propiedades elásticas efectivas en función de</p>

Tabla 2 (continuación). Investigaciones y estudios sobre simulaciones de materiales compuestos.

<p>Posteriormente se incorporó en el modelo macroscópico las propiedades elásticas efectivas, como lo son el módulo de elasticidad y la relación de poisson mediante una subrutina UMAT y ABAQUS.</p> <p>La simulación se realizó sobre un modelo de una probeta de hormigón de 150 mm de diámetro y 3000 mm de altura.</p>	<p>medidas constructivas y de tipo estructural.</p>
---	---

Fuente: propia.

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1. Características y propiedades de los materiales

1.2.1.1. Propiedades intrínsecas de los materiales

El comportamiento mecánico de una mezcla o material compuesto, está en función de dos tipos distintos de propiedades que presentan cada uno de sus componentes, las cuales terminaran por determinar el desempeño del compuesto. En primer lugar se tienen las propiedades intrínsecas, que abarcan características como la estructura a escala macro, la forma de enlace, y la tipología de la estructura de cada material (amorfos o cristalinos), etc.⁸

1.2.1.2. Propiedades extrínsecas de los materiales

Las propiedades extrínsecas de los componentes de una mezcla son de especial importancia en trabajos sobre simulaciones numéricas de comportamiento constitutivo, ya que características como su tamaño, distribución, cantidad, condiciones de esfuerzos, etc. son a las cuales la simulación logra brindar un aporte que lleve a optimar el desempeño de la sustancia.⁹

1.2.1.3. Mortero

El mortero o matriz cementicia, es una pasta conformada en la mayoría de los casos por un conglomerante hidráulico, agua y arena. El agua y el conglomerante que por lo general es cemento, debido a su composición de caliza, arcilla y yeso, que hace que su precio de producción sea relativamente bajo, ya que son minerales que abundan en casi todas las partes del mundo, serán los que caractericen la mezcla junto con las reacciones que se producen en el proceso de fraguado. En la tabla se muestran algunos tipo de cemento tipo portland, los más utilizados a nivel mundial.¹⁰

⁸ OLLER, Sergio. *Simulación numérica del comportamiento mecánico de los materiales compuesto*. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.scipedia.com/wd/images/9/90/Draft_Samper_578209959_9447_M74-BUENO.pdf

⁹ *Ibid.*

¹⁰ FERNANDEZ, María Esther. *Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo*. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://riunet.upv.es/handle/10251/27551>

Tabla 3. Tipos de cemento según norma NTC 30.¹¹

TIPO DE CEMENTO	CARACTERÍSTICAS
Portland tipo 1	Normal
Portland tipo 1-A	Inclutor de aire
Portland tipo 1-M	Mayores resistencias
Portland tipo 1-M A	Mayores resistencias e inclutor de aire
Portland tipo 2	Resistencia moderada a sulfatos
Portland tipo 2-A	Resistencia moderada a sulfatos e inclutor de aire
Portland tipo 3	Alta resistencia inicial
Portland tipo 3-A	Alta resistencia inicial e inclutor de aire
Portland tipo 4	Bajo calor de hidratación
Portland tipo 5	Resistencia elevada a los sulfatos
Portland tipo blanco	Color blanco, tipo 1 o 3

Fuente: Adaptación de la tecnología del concreto. Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Asocreto.

Como se observa en la tabla anterior, el cemento portland tiene una amplia variedad de tipos, lo que denota claramente su amplio uso a nivel mundial, el termino portland no tiene sus orígenes en bases científicas, pero debido a su aceptado uso, este término a acabado por ser aceptado. El termino portland fue acuñado por John Aspdin, un albañil inglés, para comercializar un cemento de su invención, él lo nombro de esta forma, debido a que su color era muy similar a una piedra caliza oolítica extraída como piedra de construcción en la isla de Portland, Inglaterra.¹²

La diversidad de tipos distintos de cementos atiende a la necesidad de satisfacer las características específicas, que hoy en día presentan las obras civiles en su proceso de construcción, siempre en función del buen desempeño y la economía.

El cemento utilizado en mezclas cementicias (morteros – hormigón) debe cumplir con al menos una de las siguientes normas: Especificaciones estándar para

¹¹ Adaptación de la tecnología del concreto. Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Asocreto.

¹² D. Gene Daniel and Colin L. Lobo. User's Guide to ASTM Specification C 94 on Ready-Mixed Concrete. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://www.academia.edu/download/41299140/Users_Guide_to_ASTM_Specification_C94_on_ReadyMixed_Concrete_ASTM_Manual_Astm_Manual_Series_Mnl_49.pdf

cementos portland (ASTM C 150), Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados (ASTM C 595), Especificación estándar para cemento hidráulico expansivo (ACTM C 845), Especificación de rendimiento estándar para cemento hidráulico (ASTM 1157).¹³

1.2.1.4. Los plásticos

El plástico es un material inorgánico que tiene alta durabilidad. Se calcula que puede tardar entre 100 y 1000 años para degradarse dependiendo del tipo de plástico.¹⁴

Tabla 4. Clasificación de plásticos.¹⁵

CODIGO O SPI	TIPO DE PLÁSTICO	PRODUCTOS	PRODUCTOS ELABORADOS CON MATERIAL RECUPERADO
1 PET	Polietileno tereftalato	Botellas de bebidas	Tejas, Escobas, Fibras para la fabricación de hilos
2 PEAD	Polietileno de alta densidad	Envases, Canastas de bebidas y alimentos. Bolsas resistentes, Baldes, Plato de comida de mascotas	Canastas de bebidas Materas, Envases, Mangueras
3 PVC	Policloruro de vinilo	Tubos de PVC, Tarjetas débito y crédito, Envases de aceite	Llaveros, Señalización de vías, Mangueras
4 PEBD	Polietileno de baja densidad	Empaques (de la harina, leche) Invernaderos, Embalaje	Bolsas para la basura, Mangueras

¹³ American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318 R – 05). [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://books.google.es/books?id=oa8XnnvX6BgC&lpg=PA1&ots=36_QANukU&dq=aci%20318&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q=aci%20318&f=false

¹⁴ TÉLLEZ MALDONADO, Alejandra. La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://bdigital.unal.edu.co/7080/1/905077.2012.pdf>

¹⁵ Ibid.

Tabla 4 (continuación). Clasificación de plásticos.

5 PP	Polipropileno	Paquetes de pasabocas, esferos, cepillos, pitillos, canastillas de plástico, muebles plásticos	Hebillas para el pelo, ganchos para colgar ropa
6 PS	Poliestireno	Empaque de Alpinito, Alpinette, cubiertos desechables	Tejas, Cintas de empacado, Balacas, Pulseras
6 PS	Poliestireno expandido	Empaques de icopor	
7 OTROS	Otros	Botellón de agua, biberones, cds, carcasas para electrodomésticos	Hebillas de pelo

Fuente: TÉLLEZ MALDONADO, Alejandra. *La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá.*

1.2.1.5. Fibras de PET (tereftalato de polietileno)

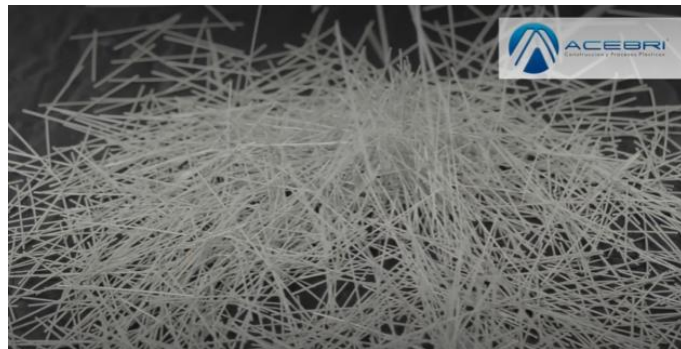
Se tratan de fibras sintéticas, que en el campo de la ingeniería civil aportan propiedades estructurales a mezclas de morteros y concretos, debido a su composición de polímeros de alta resistencia, lo que significa una contribución significativa en el comportamiento mecánico de los elementos con fibrorreforzados. Estas fibras se adhieren al concreto o mortero formando una conexión importante entre la pasta de cemento y los agregados, evitando de esta forma, la aparición de fisuras y el aumento de sus bondades mecánicas.¹⁶ Algunos de sus beneficios más relevantes son:

- El control de la retracción que produce fisuración en las mezclas que han fraguado.

¹⁶ ACEBRI. <https://www.cebri.com/fibrarefuerzodeconcreto>

- Las fibras actúan como un refuerzo dentro de la mezcla, reaccionado de manera eficiente ante las tracciones en la mezcla.
- Las fibras PET, no presentan alteraciones físicas o químicas al contacto con los elementos que constituyen el mortero o el concreto.
- Reduce significativamente problemas de segregación y exudación en las mezclas.
- Si las fibras son implementadas en losas de pavimento rígido, o losas de entepiso, reduce de manera significativa los daños por alabeo.
- Las fibras de polietileno tereftalato, presentan una resistencia al fuego mayor, que otras fibras presentes en el mercado.
- La implementación de fibras como refuerzo en las mezclas, disminuye costos operacionales y aumenta el rendimiento.
- Se reutiliza apropiadamente los desechos plásticos tipo pet, contribuyendo al manejo responsable de residuos contaminantes.

Figura 2. Fibras de PET (polietileno tereftalato)¹⁷



Fuente: ACEBRI.

¹⁷ *Ibid.*

1.2.2. Características y propiedades de los materiales reforzados con fibras

1.2.2.1. Macrofibras como refuerzo

El concepto de macrofibra para el uso como reforzamiento en concretos o morteros, puede definirse como un elemento tipo monofilamento o multifilamento de pequeñas dimensiones (alrededor de 2 pulgadas), de materiales de distinta naturaleza, como, acero, vidrio, sintético, etc. En donde su sección puede ser, circular, ovalada o rectangular, diseñadas especialmente para poder ser incorporadas en a las mezclas de concreto o mortero en estado fresco (fluido).¹⁸

Algunos tipos de fibras y sus características principales se presentan en la tabla 4.

Tabla 5. Características físicas y mecánicas de fibras.¹⁹

Fibra	Diámetro (μ m)	Módulo de elasticidad (Gpa)	Resistencia a tracción (Gpa)	Elongación en rotura (%)
Aceero	5-500	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Acrílico	18	14-19,5	0,4-1,0	3
Aramida (kevlar)	10-12	63-120	2,3-3,5	2-4,5
Asbestos	0,02-0,4	164-196	3,1-3,5	2,0-3,0
Carbón	8-9	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
celulosa	---	10	0,3-0,5	
madera	---	71,0	0,9	
Nylon	23-400	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
Polietileno	25-1000	5	0,08-0,60	3-100
Polipropileno	20-400	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Sisal	10-50		0,8	3
Vidrio	9-15	70-80	2-4	2-3,5
Matriz cementicia	---	10-45	0,003-0,007	0,02

Fuente: FERNANDEZ, María Esther. Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo.

¹⁸ TORRES, Diego Alexander. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA RESIDUAL PROMEDIO (ANÁLISIS POST- FISURACIÓN) DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRA SINTETICA DE PET+PP. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15338>

¹⁹ FERNANDEZ, María Esther. Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://riunet.upv.es/handle/10251/27551>

1.2.2.2. Matriz fibrosa

Una matriz fibrosa es un elemento que actúa uniendo las fibras y que además se comporta como un medio, en la transmisión de cargas externas aplicadas sobre esta. La protección de la fibra es también una función secundaria de la matriz, evitando el deterioro producido por la abrasión mecánica o por la misma interacción con el medio ambiente. De igual forma la matriz separa las fibras, impidiendo la propagación de grietas de fibra a fibra, aun si algunas fibras individuales logran romperse, evitando la rotura del material compuesto.²⁰

1.2.2.3. Morteros fibrorreforzados

En los morteros o matrices cementantes fibrorreforzadas, es importante tener en cuenta el comportamiento de los distintos factores que intervienen en la composición de este, es decir, las características de la matriz propiamente dicha y las características de la fibras a incorporar en la mezcla, ya que el trabajo conjunto de ambos materiales dependerá de la resistencia, deformaciones individuales, el tipo y grado de adherencia entre uno y otro, etc.²¹

1.2.2.4. Relación fibra/matriz

Debido a que el comportamiento de un mortero adicionado con macrofibras está en función tanto del mortero como de las fibras, cada relación fibra/matriz diferente, debe tener un análisis particular. La interacción del mortero con fibras que tengan diferentes características físicas y mecánicas será distinta en cada caso, lo mismo sucede con las fibras, las cuales presentaran distinta respuesta en función de la composición de la matriz a la cual estén fibrorreforzado.²²

²⁰ MUÑOZ CEBRIÁN, Fernando. *Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento: influencia del porcentaje de fibra adicionado*. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13552/PFG%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

²¹ FERNANDEZ, María Esther. *Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo*. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://riunet.upv.es/handle/10251/27551>

²² Ibid.

1.2.2.5. Tamaño de las fibras

Durante el proceso de transmisión de cargas en los morteros adicionados con fibras, el comportamiento de estos no solo dependerá de las características mecánicas de sus componentes, sino también del grado en que la carga se transmite a la fibra por medio de la matriz. Cuando se aplica esfuerzos de tracción sobre los morteros adicionados con fibras, la unión entre la fibra y la matriz cesa en los extremos, es decir en los extremos de la fibra no existe transmisión de cargas desde la matriz cementicia. Por lo cual es fundamental determinar una longitud mínima de las fibras que garantice resistencia y rigidez del material compuesto. Esta longitud mínima o crítica depende del diámetro de la fibra, de la resistencia a la tracción y de la resistencia del material compuesto es decir la resistencia al cizalle del mortero adicionado con fibras.²³

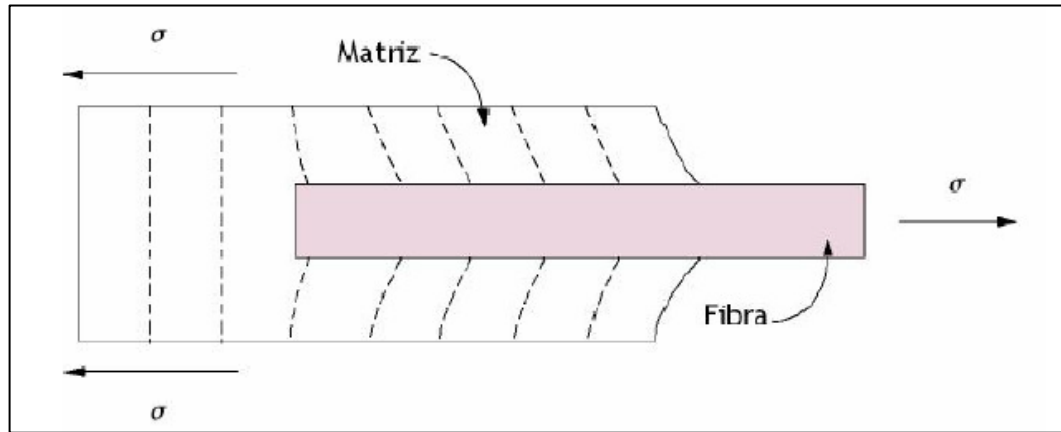
Surgiendo a partir de este criterio las denominadas fibras continuas (significativamente de mayor longitud que las fibras discontinuas) y discontinuas (fibras cortas). Un fenómeno que se presenta en los morteros adicionado con fibras discontinuas es que la matriz se deformara alrededor de la fibra, siendo insignificante la transmisión de cargas entre el mortero y la fibra (anulando las propiedades reforzantes de esta).²⁴

²³ 23. MUÑOZ CEBRIÁN, Fernando. Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento: influencia del porcentaje de fibra adicionado. [en línea] Disponible vía internet: <URL:

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13552/PFG%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

²⁴ Ibid.

Figura 3. Deformación de una matriz que rodea una fibra sometida a un esfuerzo a tracción.²⁵



Fuente: MUÑOZ CEBRIÁN, Fernando. *Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento: influencia del porcentaje de fibra adicionado.*

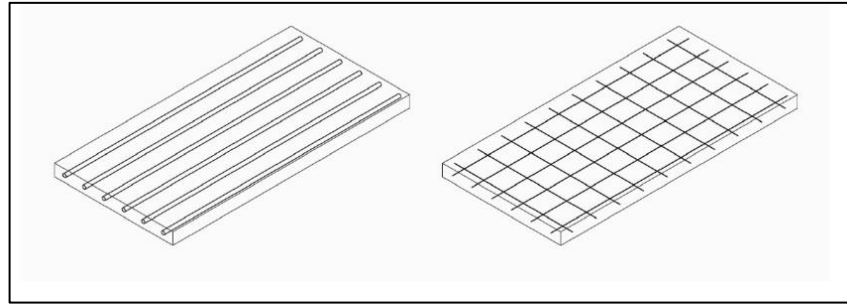
1.2.2.6. Orientación de las fibras

La posición y distribución que adopten las fibras dentro de la matriz cementicia, influirá en las propiedades y comportamiento del material compuesto (mortero-fibra). Deben evitarse dos situaciones críticas en las cuales la respuesta del material no será la óptima. La alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras y la alineación al azar.²⁶

²⁵ Ibid.

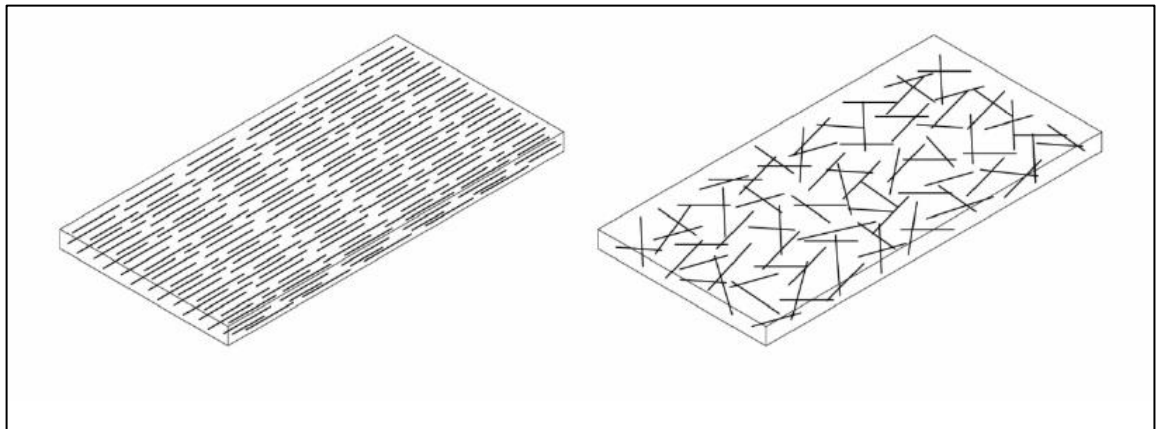
²⁶ Ibid.

Figura 4. Distribución continua de fibras en barras y en malla.²⁷



Fuente: FERNANDEZ, María Esther. Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo.

Figura 5. Distribución discontinua de fibras alineadas y dispersas.²⁸



Fuente: FERNANDEZ, María Esther. Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo.

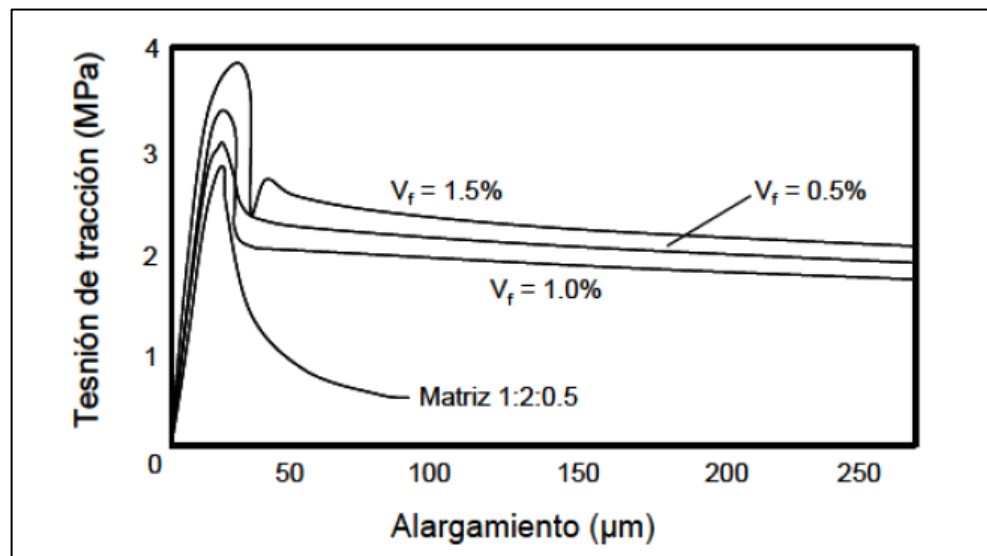
²⁷ FERNANDEZ, María Esther. Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://riunet.upv.es/handle/10251/27551>

²⁸ *Ibid.*

1.2.2.7. Resistencia residual a la tracción

La presencia de fibras en una matriz cementicia, como lo es la del mortero, entre otros aspectos, aporta dando un efecto rigidizador al elemento en la etapa previa a que se genere la falla. Por otro lado, cuando se presentan los procesos de rotura producto de la exposición a cargas, las fibras actúan, dando un aporte adicional de resistencia al material, debido a la conexión que se genera entre ambas caras de la fisura a través de las fibras.²⁹

Figura 6. Curva de resistencia residual a la tracción de morteros con fibras (ACI).³⁰



Fuente: Mármol Salazar, patricia. Hormigones con fibras de acero características mecánicas.

²⁹ Mármol Salazar, patricia. Hormigones con fibras de acero características mecánicas. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://oa.upm.es/4510/1/TESIS_MASTER_PATRICIA_CRISTINA_MARMOL_SALAZAR.pdf

³⁰ *Ibid.*

1.2.3. Teorías para el estudio de materiales compuestos

1.2.3.1. Modelos

Para el estudio del comportamiento mecánico de materiales compuestos, existen múltiples enfoques para múltiples propósitos. En algunos casos solo es necesario evaluar el desempeño de un material y sus componentes en el rango elástico (limitando en cierta manera la resistencia real que puede alcanzar el compuesto) al entender la composición como un solo material. Mientras que en situaciones específicas se requiere conocer la respuesta del combinado aun y después de que uno de sus componentes haya llegado a la falla, entendiendo cada material del compuesto de forma independiente y no como uno solo.³¹

1.2.3.2. Teoría de mezclas clásica

Esta teoría fue desarrollada por Trusdell y Toupin, la cual les permitía conocer el desempeño de una sustancia compuesta, basados en la mecánica del sólido continuo local y bajo dos hipótesis fundamentales:

- La totalidad de los constituyentes de la mezcla soportan deformaciones de igual magnitud.
- La cantidad ocupada en volumen por un componente del compuesto es directamente proporcional a su contribución respecto a los esfuerzos tensionales finales.

Debido a la relativa simplicidad de la formulación, la aplicación de la misma queda restringida a ser utilizada en análisis de materiales compuestos laminados de fibras largas. Por otro lado debido a esta misma razón es viable simular el comportamiento

³¹ MARTÍNEZ, Xavier; OLLER, Sergio; RASTELLINI, Fernando. *Análisis no – lineal de materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie – paralelo. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.researchgate.net/publication/299221412_Analisis_no-lineal_de_materiales_compuestos_mediante_la_teoría_de_mezclas_serie-paralelo*

de estructuras con una magnitud considerable, ya que el costo computacional no es muy elevado.³²

1.2.3.3. Teoría de mezclas generalizada

Como su nombre lo indica esta formulación es mucho más general que su antecesora clásica, ya que no contiene la restricción de la primera teoría en cuanto a la interacción de los constituyentes de la mezcla, dando libertad a que pueda ser en serie o en paralelo. De igual forma está basada en la mecánica del sólido continuo local y supone tres hipótesis principales:

La primera de ellas parte de la interacción existente entre todos los componentes de la mezcla:

- Se estableció que sin importar el volumen analizado del compuesto, participaran todos sus constituyentes.
- De igual forma la contribución que un material puede aportar al comportamiento del compuesto depende de la cantidad del mismo en la matriz.
- También fue definida una única ecuación de compatibilidad para todos los materiales de la mezcla, es decir, todos presentan deformaciones equivalentes.
- Consistentemente se precisó que los volúmenes que pueden ocupar individualmente los constituyentes del compuesto, deben ser siempre inferiores al volumen total de la mezcla.

³² MARTÍNEZ, Xavier; OLLER, Sergio; RASTELLINI, Fernando. *Análisis no – lineal de materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie – paralelo*. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.researchgate.net/publication/299221412_Analisis_no-lineal_de_materiales_compuestos_mediante_la_teor%C3%ADa_de_mezclas_serie-paralelo

La segunda contempla una colocación de forma uniforme de los constituyentes a lo largo de toda la mezcla. Además de la independencia de comportamiento entre los componentes, ya que esta será dada por la correspondiente ley constitutiva de cada material, teniendo estos una repercusión sobre el material compuesto directamente proporcional a la cantidad empleada en este. En base a lo anterior es viable estudiar composiciones de materiales que no necesariamente se comporten de la misma forma.

La última define la relación que existe entre las deformaciones de la mezcla compuesta y los componentes de la misma, mediante una ecuación de compatibilidad.³³

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{ij})_1 = (\varepsilon_{ij})_2 = \dots = (\varepsilon_{ij})_n \quad (1.1)^{34}$$

Donde:

ε_{ij} , es la deformación sufrida por la mezcla compuesta.

$(\varepsilon_{ij})_n$, es la deformación sufrida por la mezcla compuesta para su enésimo constituyente.

1.2.3.4. Teoría de mezclas serie – paralelo

La teoría de mezclas serie - paralelo es una de las formulaciones que permite analizar el desempeño del material compuesto en un rango no lineal, partiendo de la teoría de mezclas clásica. En la nueva teoría se establece un comportamiento de los constituyentes de la mezcla en forma de serie – paralelo, lo que significa un

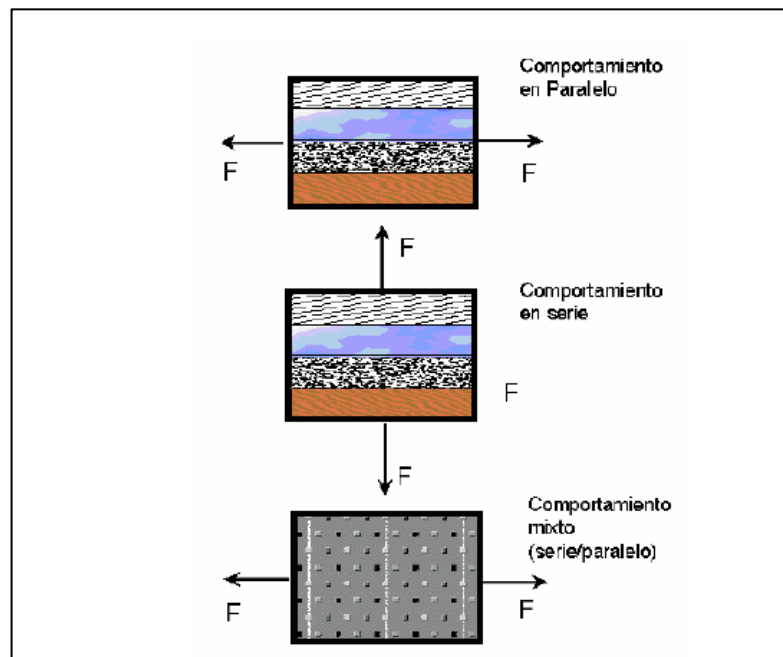
³³ OLLER, Sergio. Simulación numérica del comportamiento mecánico de los materiales compuesto. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.scipedia.com/wd/images/9/90/Draft_Samper_578209959_9447_M74-BUENO.pdf>

³⁴ *Ibid.*

reorganización de las características globales de la composición, al tener presente la singularidad de los materiales de la mezcla.³⁵

El material compuesto por lo tanto podrá presentar diferentes magnitudes de deformación para cada tipo de constituyente, en un lugar específico de la mezcla. En la figura 7, se muestra el material compuesto en función del tipo de comportamiento de sus componentes.

Figura 7. Esquema de comportamientos serie - paralelo de un material compuesto laminado.³⁶



Fuente: MARTÍNEZ, Xavier; OLLER, Sergio; RASTELLINI, Fernando. Análisis no – lineal de materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie – paralelo

³⁵ MARTÍNEZ, Xavier; OLLER, Sergio; RASTELLINI, Fernando. Análisis no – lineal de materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie – paralelo. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.researchgate.net/publication/299221412_Analisis_no-lineal_de_materiales_compuestos_mediante_la_teor%C3%ADa_de_mezclas_serie-paralelo

³⁶ *Ibid.*

La base de esta formulación recae en la integración de un nuevo concepto que no está presente en la teoría clásica, se trata de un campo que tiene en cuenta las deformaciones del compuesto, a partir de las deformaciones de componentes trabajando en serie y componentes trabajando en paralelo.

$$\varepsilon_{ij} = (1 - \aleph)\varepsilon_{ij}^{par} + (1 - \aleph)\varepsilon_{ij}^{ser} \quad (1.2)^{37}$$

Donde:

ε_{ij} , es la deformación sufrida por la mezcla compuesta.

ε_{ij}^{par} , es la deformación en paralelo.

ε_{ij}^{ser} , es la deformación en serie.

\aleph , es el parámetro de acoplamiento serie – paralelo.

Las expresiones que contemplan la deformaciones en serie y paralelo, pueden ser reescritas con las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{ij}^{par} \cong \frac{1}{n} \sum_{c=1}^n (\varepsilon_{ij})_c \quad y \quad \varepsilon_{ij}^{ser} \cong \frac{1}{n} \sum_{c=1}^n K_c (\varepsilon_{ij})_c \quad (1.3)^{38}$$

1.2.3.5. Teoría de homogenización clásica

A diferencia de la teoría de mezclas que se basa en la suposición de un medio continuo y de la idealización de materiales homogéneos, la teoría de la homogenización parte de la micromecánica de materiales heterogéneos, en donde es posible analizar la mecánica de los materiales a una escala determinada, en

³⁷ *Ibid.*

³⁸ *Ibid.*

función del tamaño de las inclusiones agregadas al medio, como puede ser el caso del tamaño del agregado grueso en el hormigón o el tamaño de las fibras sintéticas en un mortero fibrorreforzado.

Con esto se busca lograr establecer el desempeño que tendría el material compuesto en una escala normal es decir macroscópica, a partir del análisis realizado a los componentes a una escala microscópica. Esta teoría busca ser más exacta que la teoría de mezclas, ya que esta última al considerar la homogeneidad del medio, esta forzada a dar solamente una aproximación del problema.³⁹

Esta teoría establece dos principios en relación a los campos de tensiones y deformaciones y el aporte de estos a escalas diferentes:

- El cambio experimentado por los campos de tensiones y deformaciones a una escala micro repercute directamente en la escala macro del compuesto, en cuanto a su participación en volumen.
- La variación de los campos de tensiones y deformaciones a escala macro no repercuten en el análisis a escala micro, ya que en esta su comportamiento puede ser considerado invariable.

Lo formulado en las dos anteriores afirmaciones se logra representar matemáticamente con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma(x) = \sigma + \sigma'(x) \quad (1.4)^{40}$$

³⁹ PODESTÁ, Juan Manuel. *Simulación del comportamiento microestructural del hormigón simple aplicando técnicas de homogenización*. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://ing.unne.edu.ar/mecap/Investigacion/Tesis/TesinaPodesta.pdf>

⁴⁰ *Ibid.*

Donde:

σ , es la componente del campo de tensión a escala macro.

σ' , es la componente del campo de tensión a escala micro.

$$\varepsilon(x) = \varepsilon + \varepsilon'(x) \quad (1.5)$$

Donde:

ε , es la componente del campo de deformación a escala macro.

ε' , es la componente del campo de deformación a escala micro.

3.1. Mecánica del medio continuo

La mecánica del medio continuo parte de la forma numérica de la tensión y de la deformación del medio, teniéndose en cuenta la velocidad de esta última. Además es necesario para su correcto estudio contemplar parámetros adicionales, como la naturaleza y el tipo de material analizado.⁴¹

Tanto la tensión como la deformación del medio, pueden ser descritas a través de ecuaciones matemáticas de diferente tipo en cada caso. Siendo las ecuaciones denominadas de equilibrio, las encargadas de las tensiones del medio y las ecuaciones de compatibilidad las de describir el comportamiento de las deformaciones. Por otro lado las ecuaciones que dan las características intrínsecas de cada diferente tipo de material, son llamadas ecuaciones constitutivas, deben su

⁴¹ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250131/2012/Elasticitat-Plasticitat.pdf>

nombre debido a que permiten conocer el comportamiento macroscópico del material estudiado, a partir de la constitución que se presenta al interior del mismo.⁴²

3.2. Teoría clásica de elasticidad lineal

La formulación de esta teoría parte del concepto de materiales idealmente elásticos, algunos materiales son denominados de esta forma cuando poseen la capacidad de retornar a su forma original, luego de retirar los esfuerzos responsables de la deformación a la que fueron inicialmente expuestos. Otra características típica de materiales que se comportan conforme a esta teoría, es que obedecen a una relación directamente proporcional entre los esfuerzos aplicados y la deformación que sufre el sólido.⁴³

La teoría de la elasticidad es posible modelarla matemáticamente por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(U_{i,j} + U_{j,i}) \quad (3.3)^{44}$$

Donde:

ε_{ij} , son las deformaciones sufrida por el material.

U , es el vector de desplazamientos.

$$\text{Ecuación de equilibrio:} \quad \sigma_{ij,j} + b_i = 0 \quad (3.4)^{45}$$

$$\text{Ecuación de compatibilidad:} \quad \varepsilon_{ij,kl} + \varepsilon_{kl,ij} - \varepsilon_{ik,jl} - \varepsilon_{jl,ik} = 0 \quad (3.5)^{46}$$

⁴² UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250131/2012/Elasticitat-Plasticitat.pdf>

⁴³ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250131/2012/Elasticitat-Plasticitat.pdf>

⁴⁴ *Ibid.*

⁴⁵ *Ibid.*

⁴⁶ *Ibid.*

$$\text{Ecuación de contorno:} \quad \sigma_{ij}n_j = \sigma_{ji}n_j = T_j \quad (3.6)^{47}$$

$$\text{Ecuación constitutiva:} \quad \sigma_{ij} = E_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (3.7)^{48}$$

Donde:

σ , son los tensores de tensiones.

b , es un vector de fuerza másica.

T , es el vector de tensiones en el contorno.

n , es el vector normal al contorno.

E , es el tensor de rigidez de cuarto orden.

3.3. Teoría clásica de la plasticidad

El uso de la teoría de elasticidad lineal puede ser implementada en el análisis de materiales, siempre y cuando las condiciones del ejercicio permitan estar debidamente alejados de la condición de rotura del material. En la mayoría de los casos se necesita un modelo que pueda tener en cuenta las deformaciones permanentes y establecer el estado de rotura.⁴⁹

Es a partir de estas consideraciones que a mediados de 1930 se desarrolla la teoría de la plasticidad, en la cual el material tiene un comportamiento elástico lineal hasta llegar a su límite de proporcionalidad, cuyo valor es intrínseco de cada sustancia , y a partir de este cambiara su tipo de deformación. Se presentaran deformaciones de gran magnitud, mientras que los esfuerzos que las producen se entienden como constantes o de poco cambio respecto al tiempo, de esta manera el material entra en el campo elastoplástico.⁵⁰

En la figura x pude observarse un comportamiento de esfuerzos contra deformaciones de un material con un comportamiento elastoplástico perfecto,

⁴⁷ *Ibid.*

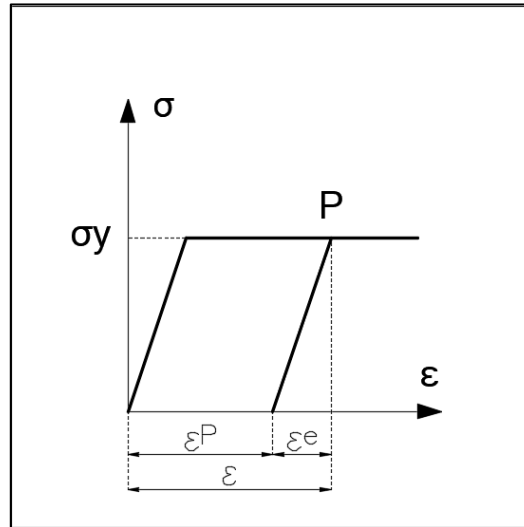
⁴⁸ *Ibid.*

⁴⁹ *Ibid.*

⁵⁰ *Ibid.*

donde se aprecia que luego de alcanzar σ_y (punto crítico), se presentaran deformaciones con recuperación es decir elásticas y deformaciones que no se recuperan llamadas plásticas. La suma de estos dos tipos de deformaciones, da como resultado la deformación total en un punto dado (P).⁵¹

Figura 8. Comportamiento elastoplástico perfecto.⁵²



Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^P \quad (3.8^{53})$$

Donde:

ε , deformación total.

ε^e , deformaciones elásticas.

ε^P , deformaciones plásticas.

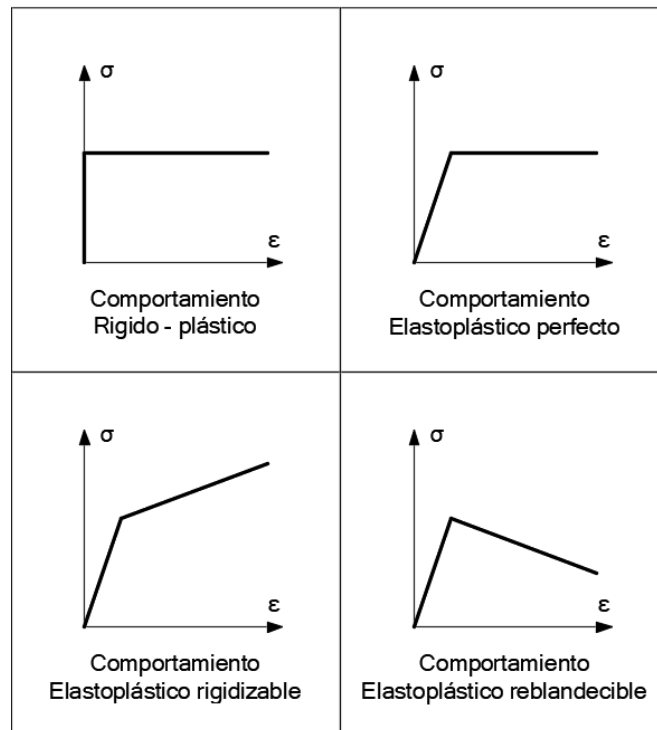
⁵¹ *Ibid.*

⁵² *Ibid.*

⁵³ *Ibid.*

Otros comportamientos plásticos también pueden presentarse en función de las características intrínsecas de cada material. En el caso de que no existan deformaciones recuperables el material se comportaría como un *Rígido – plástico*, sufriendo únicamente deformaciones de tipo plástico. Por otro lado si al llegar al punto crítico de fluencia, los esfuerzos varían y van en aumento, el material tendrá un comportamiento *elastoplástico rigidizable*. Caso contrario, si al llegar al punto crítico los esfuerzos varían y van en descenso, el comportamiento sería de tipo elastoplástico reblandecible.⁵⁴

Figura 9. Deformaciones plásticas ideales.⁵⁵



Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad.

⁵⁴ *Ibid.*

⁵⁵ *Ibid.*

3.3.1. Superficie de fluencia

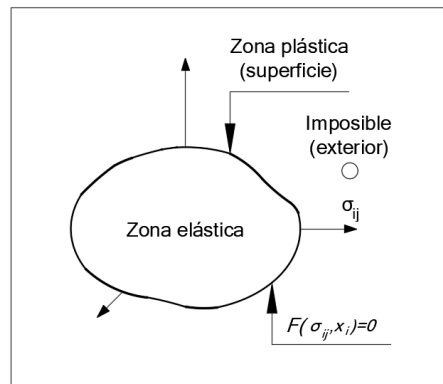
Un término necesario para entender el grupo de tensiones admisibles en un material de comportamiento elastoplástico, es el de *superficie de fluencia*. Esta superficie depende principalmente de los esfuerzos tensionales a los que se ve sometido el sólido y es la encargada de señalar y diferenciar en el espacio tridimensional, los esfuerzos tensionales capaz de producir deformaciones permanentes (plásticas) y los esfuerzos tensionales que generan deformaciones recuperables (elásticas). La ecuación que describe la superficie de fluencia de un material es:⁵⁶

$$F(\sigma_{IJ}, x_i) = 0 \quad (3.9)^{57}$$

Donde:

x_i , son parámetros que condicionan la dimensión.

Figura 10. Deformaciones plásticas ideales .⁵⁸



Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad.

⁵⁶ *Ibid.*

⁵⁷ *Ibid.*

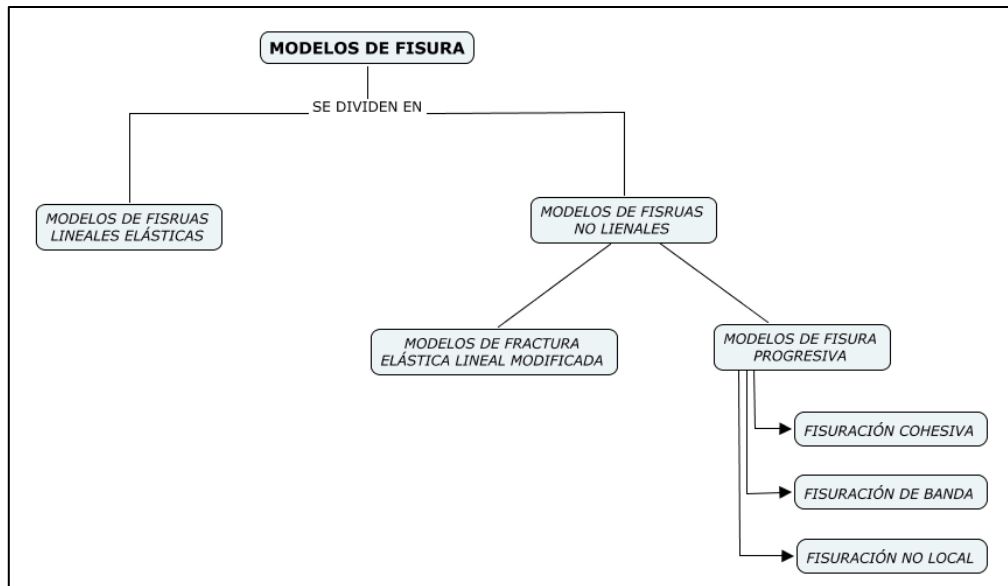
⁵⁸ *Ibid.*

En base a las posibles condiciones de la superficie de fluencia, se dan las siguientes situaciones:

- Régimen elástico: $F(\sigma_{IJ}, x_i) < 0$ (4.0)⁵⁹
- Régimen elastoplástico: $F(\sigma_{IJ}, x_i) = 0$ (4.1)⁶⁰
- Imposible: $F(\sigma_{IJ}, x_i) > 0$ (4.2)⁶¹

3.4. Modelo de fisuración discreta

Figura 11. Modelos numéricos de fisura.⁶²



Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad.

⁵⁹ *Ibid.*

⁶⁰ *Ibid.*

⁶¹ *Ibid.*

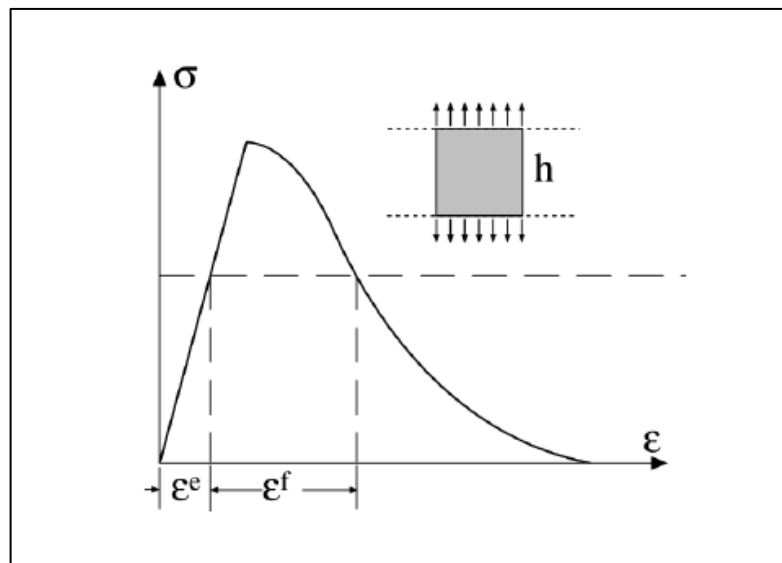
⁶² LÓPEZ LANCHEROS, Pedro Augusto. Simulación numérica de vigas en concreto reforzado con barras longitudinales, transversales y fibras cortas de acero mediante el método de los elementos finitos. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://www.bdigital.unal.edu.co/7824/1/pedroaugustolopezlancheros.2012.pdf>>

3.5. Modelo de fisuración distribuida

El modelo de fisuración distribuida, hace parte de los modelos analíticos que permiten el estudio del comportamiento de rotura de materiales de tipo cuasi – frágiles (concreto, mortero, cerámica, etc.), con la particularidad de que parte de los principios de la mecánica del medio continuo.

- Modelos de gradientes
- Modelos no locales
- Modelos de banda
- Modelos de singularidad fuerte

Figura 12. Curva de tensión – deformación con ablandamiento.⁶³



Fuente: LÓPEZ SALINAS, Elvira Mercedes. *modelos de fisura cohesiva difusa y fisura cohesiva discreta para materiales cuasifrágiles.*

⁶³ LÓPEZ SALINAS, Elvira Mercedes. *MODELOS DE FISURA COHESIVA DIFUSA Y FISURA COHESIVA DISCRETA PARA MATERIALES CUASIFRÁGILES.* [en línea] Disponible vía internet: http://oa.upm.es/9488/1/Tesis_master_Elvira_Lopez_Salinas.pdf

3.6. Modelo de fractura de William y Warnke

El modelo de fractura de William y Warnke se elaboró para describir el área de falla del hormigón sin restricciones de desplazamiento, bajo esfuerzos de tracción y compresión en el campo de esfuerzos principal. Esta teoría considera un comportamiento isotrópico del material, es decir materiales que presenten las mismas características mecánicas en todos sus ejes principales.⁶⁴

La ecuación que describe el modelo de fractura es la siguiente:

$$\frac{F}{f'_c} - S \geq 0^{65}$$

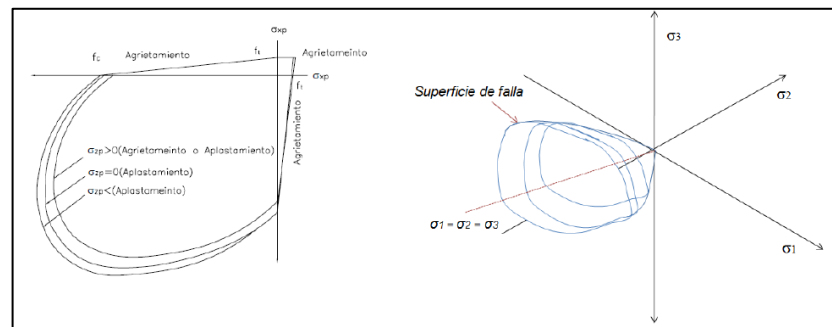
Donde:

F , está en función de los estados de esfuerzos principales.

f'_c , esfuerzo ultimo a compresión del material frágil.

S , representa la superficie de falla.

Figura 13. Superficie de falla de William (William & Warnke 1975).⁶⁶



Fuente: LÓPEZ LANCHEROS, Pedro Augusto. Simulación numérica de vigas en concreto reforzado con barras longitudinales, transversales y fibras cortas de acero mediante el método de los elementos finitos.

⁶⁴ LÓPEZ LANCHEROS, Pedro Augusto. Simulación numérica de vigas en concreto reforzado con barras longitudinales, transversales y fibras cortas de acero mediante el método de los elementos finitos. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://www.bdigital.unal.edu.co/7824/1/pedroaugustolopezlancheros.2012.pdf>

⁶⁵ *Ibid.*

⁶⁶ *Ibid.*

3.7. Modelo de Von Mises

Como se observó de los modelos de plasticidad perfecta, resulta provechoso representar la superficie de fluencia en función de las invariantes del sistema, resultando la siguiente expresión:

$$F = F(p, j, \theta)^{67}$$

Donde:

F , superficie de fluencia.

p , deformaciones elásticas.

j , deformaciones plásticas.

θ , ángulo de Lode.

Este modelo al ser de tipo plástico, relaciona la superficie de fluencia y las tensiones sobre esta de la siguiente manera ($F=G$), al mismo tiempo que se desvincula de la última invariante del modelo de plasticidad perfecta es decir del ángulo de Lode. Resultando la siguiente ecuación que describe la superficie de fluencia del modelo:

$$F = j^2 - \frac{Y^2}{3} = 0^{68}$$

Donde:

F , superficie de fluencia.

Y , Tensión de comparación.

⁶⁷ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250131/2012/Elasticitat-Plasticitat.pdf

⁶⁸ *Ibid.*

j , deformaciones plásticas.

Posteriormente puede definirse las deformaciones plásticas del material, según el modelo, como

$$d\varepsilon_{ij}^p = s_{ij}d\lambda$$

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_x^p \\ d\varepsilon_y^p \\ d\varepsilon_z^p \\ d\gamma_{xy}^p \\ d\gamma_{xz}^p \\ d\gamma_{yz}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \\ 2\tau_{xy} \\ 2\tau_{xz} \\ 2\tau_{yz} \end{bmatrix}$$

Donde:

$d\varepsilon_{ij}^p$, superficie de fluencia.

$s_{ij}d\lambda$, Tensión de comparación.

La ecuación anterior describe las deformaciones totales que sufre un material de naturaleza dúctil, como lo son las fibras de tereftalato de polietileno (PET), es decir las deformaciones recuperables que sufre el material debido a los esfuerzos tensionales a los que se ve sometido, más las deformaciones permanentes que surgen por esfuerzos de mayor magnitud, que hacen transitar al sólido a la etapa plástica.⁶⁹

Una forma más simplificada de la expresión se logra al reemplazar el valor de λ , arrojando la ecuación conocida como Prandtl – Reuss (ecuación constitutiva o regla de flujo). En esta puede observarse en el primer término después de la igualdad la deformación elástica seguida por la plástica:

⁶⁹ *Ibid.*

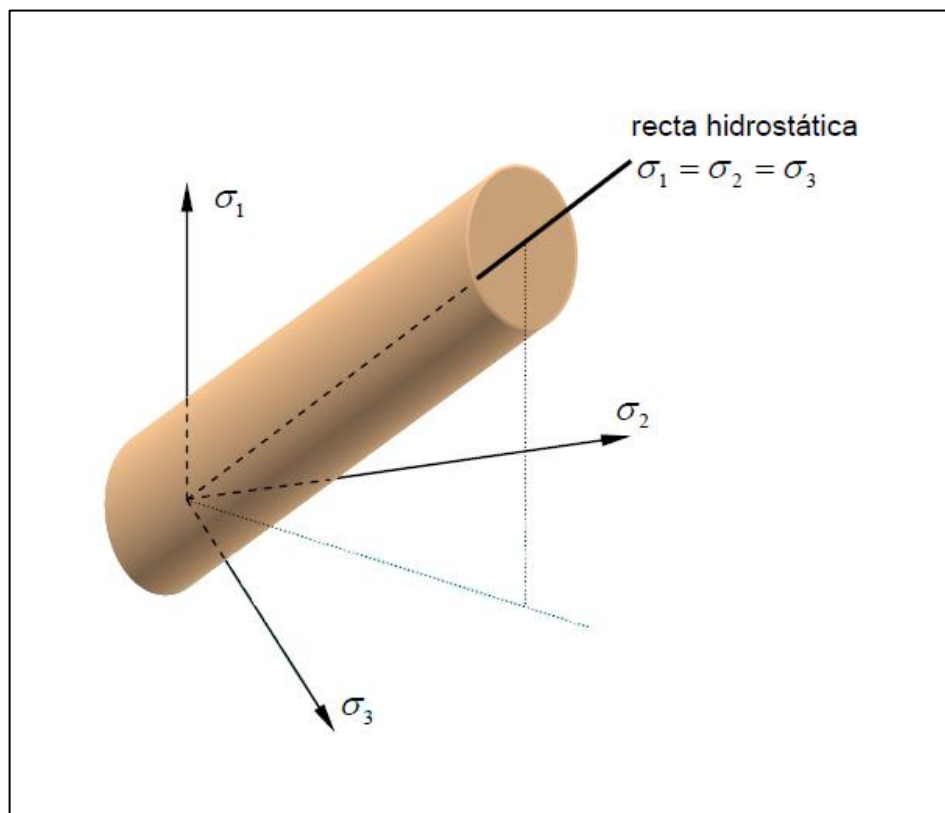
$$d\varepsilon_{ij} = C_{ijkl}d\sigma_{kl} + \frac{1}{H} \frac{S_{ij}}{4Y} \frac{S_{kl}}{Y} {}^{70}$$

Donde:

$d\varepsilon_{ij}^p$, superficie de fluencia.

$s_{ij}d\lambda$, Tensión de comparación.

Figura 14. Superficie de fluencia del modelo de Von Mises.⁷¹



Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad.

⁷⁰ Ibid.

⁷¹ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250131/2012/Elasticitat-Plasticitat.pdf>

3.7.1. Simulación numérica

Método de elementos finitos (MEF)

El denominado método de elementos finitos, surge a mediados de los años cincuenta, como otra alternativa a la resolución de problemas relacionados al análisis de la mecánica estructural de los materiales, gracias al notorio avance computacional que se venía dando después de la mitad del siglo XX. Este método está concebido bajo el principio de la mecánica del medio continuo, esto es, representar las infinitas partes de las que se compone una mezcla, como si no se desarrollaran discontinuidades entre las mismas, por lo cual se hace posible generar un proceso analítico de su comportamiento, a través de ecuaciones continuas.

La forma en que opera el método, consiste en separar en pequeñas partes la geometría del sólido en cuestión, el cual está siendo sometido a algún tipo de esfuerzo (flexión, compresión, tensión, etc.). Esto permite, que la dimensión total del caso de estudio, pueda descomponerse en partes más pequeñas, las cuales dan lugar a ser analizadas de forma independiente, siendo la suma de todas las soluciones de las partes parciales, la resolución general del sistema estudiado.

El proceso de desintegración (mallado) del sólido principal, en pequeños componentes, no significa que estos queden aislados unos de otros, sino que se transmitirán las respectivas fuerzas entre estos, por medio de nodos, los cuales pueden tener diferentes grados de libertad, según se haga necesario. Las formas espaciales principales del análisis con el método de elementos finitos son:⁷²

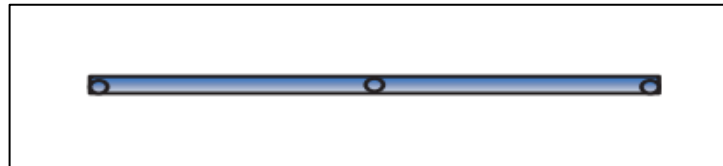
- Lineal (elemento de representación: punto)
- Bidimensional (elemento de representación: línea)

⁷² MARTÍNEZ BUSTAMANTE, Margarita Del Rocío; PATIÑO ZARATE, Diego Benigno. SIMULACIÓN POR ORDENADOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITOS Y OPTIMIZACIÓN POR EL MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA, DE CONECTORES PARA ESTANTERÍA METÁLICA. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7767/1/UPS-CT004623.pdf>

- Tridimensional (elemento de representación: superficie)

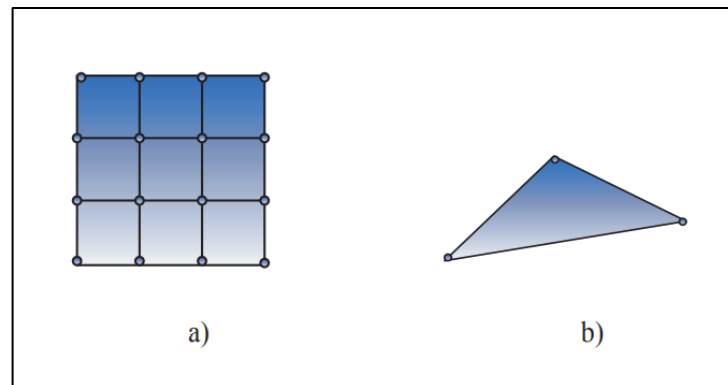
Algunas de las formas principales de elementos finitos se representan en las imágenes mostradas a continuación:

Figura 15. Elemento finito lineal.⁷³



Fuente: MARTÍNEZ BUSTAMANTE, Margarita Del Roció; PATIÑO ZARATE, Diego Benigno. *simulación por ordenador mediante el método de elemento finitos y optimización por el método de ingeniería robusta, de conectores para estantería metálica.*

Figura 16. Elementos finitos bidimensionales, a) cuadrilátero, b) triangular.⁷⁴

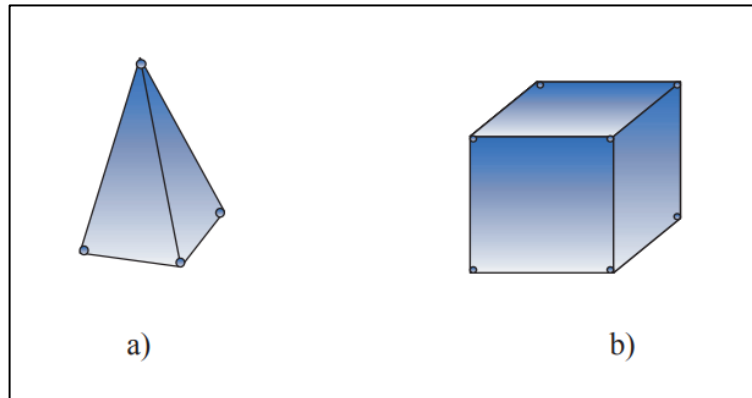


Fuente: MARTÍNEZ BUSTAMANTE, Margarita Del Roció; PATIÑO ZARATE, Diego Benigno. *simulación por ordenador mediante el método de elemento finitos y optimización por el método de ingeniería robusta, de conectores para estantería metálica.*

⁷³ MARTÍNEZ BUSTAMANTE, Margarita Del Roció; PATIÑO ZARATE, Diego Benigno. *SIMULACIÓN POR ORDENADOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITOS Y OPTIMIZACIÓN POR EL MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA, DE CONECTORES PARA ESTANTERÍA METÁLICA.* [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7767/1/UPS-CT004623.pdf>

⁷⁴ *Ibid.*

Figura 17. Elementos finitos tridimensionales, a) tetraedro, b) hexaedro.⁷⁵



Fuente: MARTÍNEZ BUSTAMANTE, Margarita Del Roció; PATIÑO ZARATE, Diego Benigno. *simulación por ordenador mediante el método de elemento finitos y optimización por el método de ingeniería robusta, de conectores para estantería metálica.*

3.7.2. SOLID65

Este elemento hace parte de la biblioteca de herramientas de ANSYS que sirven para modelaciones tipo 3D. El SOLID65 puede emplearse para simular materiales que contienen algún tipo de refuerzo en su interior, como es el caso del concreto reforzado con barras de acero, ya que este sólido cuando se ve sometido a esfuerzos de flexión o compresión, posee la capacidad de fisurarse o comprimirse respectivamente. Estas características hacen que la herramienta también pueda implementarse en la modelación de materiales compuestos, como es el caso de morteros fibrorreforzados.⁷⁶

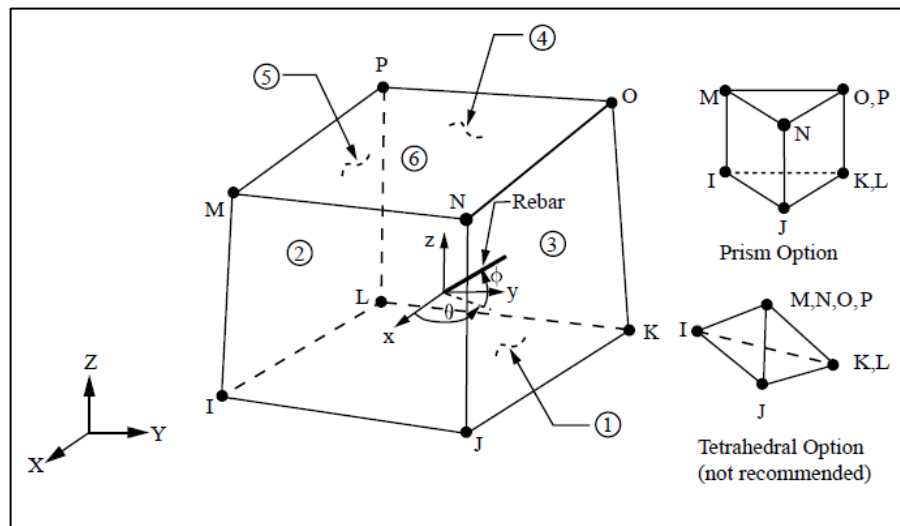
El elemento logra plantearse tridimensionalmente por medio de los ocho nodos con que cuenta el sólido, cada uno de estos posee tres grados de libertad

⁷⁵ *Ibid.*

⁷⁶ <https://ansyshelp.ansys.com>

correspondientes a las tres direcciones nodales principales X,Y y Z. Lo que permite precisar el refuerzo interior del sólido en distintas direcciones.⁷⁷

Figura 18. Geometría del elemento SOLID65 de ANSYS.⁷⁸



Fuente: <https://ansyshelp.ansys.com>

Dentro de las principales consideraciones a tener en cuenta para la implementación del elemento SOLID65, las más importantes se describen continuación:⁷⁹

- Los materiales del sólido se entienden como isotrópicos para el análisis.
- El refuerzo interior puede tener distintos ángulos de orientación.
- Es posible eliminar el refuerzo interior y analizar el sólido como un material simple.
- El sólido tiene la capacidad de representar grietas suaves o rugosas (tanto en grietas abiertas como cerradas).

⁷⁷ *Ibid.*

⁷⁸ *Ibid.*

⁷⁹ *Ibid.*

- Al momento en que el sólido falla agrietándose o aplastándose, este se rigidiza, logrando estabilizarse numéricamente hablando.
- Las cargas aplicadas al elemento se hacen a través de los nodos del sólido.
- Las presiones se logran ingresar por medio de cargas superficiales asociadas a las caras del modelado.
- La fluencia y temperatura intrínseca de los materiales puede idealizarse a través de cargas en el sólido.

3.8. MARCO CONCEPTUAL

3.8.1. Mortero

Mezcla de cemento, agua y arena. La cual puede tener o no una función estructural. como ejemplo de morteros utilizados con fines estructurales puede nombrarse los empleados en la pega y relleno de mampostería y como ejemplo de los no estructurales puede nombrarse los pañetes.⁸⁰

3.8.2. Agua

El agua utilizada en una mezcla de concreto o mortero, debe estar limpia y libre de sustancias perjudiciales como aceites, ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos. Es importante que en caso de que las mezclas de hormigón o similares, contengan incrustaciones de aluminio por su diseño, el agua utilizada para esta, deberá estar libre de iones de cloruro.⁸¹

3.8.3. Cemento

Conglomerante conformado por caliza y arcillas calcinadas (molidas) que al hacer contacto con el agua crea una reacción de endurecimiento (fraguado), adquiriendo un aspecto pétreo.⁸²

⁸⁰ SALAMANCA CORREA, Rodrigo. La Tecnología de los morteros. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1353/1081>

⁸¹ American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318 R – 05). [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://books.google.es/books?id=oa8XnnvX6BgC&lpg=PA1&ots=36_QANukU&dq=aci%20318&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q=aci%20318&f=false

⁸² VELA REQUEJO, Luis Gustavo, YOVERA LEÓN, Rogger Ernesto. evaluación de las propiedades mecánicas del concreto adicionado con fibra de estopa de coco. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/uss/3167/VELA_REQUEJO_LUIS_GUSTAVO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

3.8.4. Arena (agregado fino)

Material que compone entre el 60 y el 80% de una mezcla de concreto o mortero. Definido como las partículas de agregado menores de 4.75 mm y mayores de 75 mm, es decir el material que pasa el tamiz N° 4 y retiene en el tamiz N° 200. Estas partículas a demás deben ser durables, limpias, duras, resistentes, libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta al cemento.⁸³

3.8.5. Fisuración

Cuando un concreto o en su defecto una matriz cementicia se expande y se contrae debido a los cambios de humedad y temperatura, este sufrirá una deformación dependiendo de las cargas y las condiciones de apoyo del elemento.⁸⁴

3.8.6. Agregado fino

El agregado fino se refiere a todas las partículas, que pasan por el tamiz de abertura 9.5 mm (3/8") y son retenidas en el tamiz de abertura 4.75 mm o número 200.⁸⁵

3.8.7. Compresión

Es un mecánico que consiste en someter a un cuerpo a la acción de dos fuerzas opuestas para que disminuya su volumen, es decir el efecto que se tiene al someter un elemento a cargas axiales.⁸⁶

⁸³ Ibid.

⁸⁴ Ibid.

⁸⁵ Ibid.

⁸⁶ Ibid.

3.8.8. Ensayo

Prueba, experimento, intento que se hace para determinar si una cosa funciona o resulta como se esperaba, ayuda determinar la veracidad de una hipótesis.⁸⁷

3.8.9. Dosificación

Proceso de medición, por peso o por volumen, de los ingredientes y su introducción en la mezcladora para una cantidad de concreto, mortero, grout o revoque.⁸⁸

3.8.10. Fibras

Hilo o material en forma de hilo con un diámetro que varía de 0.05 a 4 mm (0.002 a 0.16 pulgadas) y con longitud entre 10 y 150 mm (0.5 a 6 pulgadas) y fabricado con distintos tipos de materiales como lo es el acero, vidrio, material sintético (plástico), carbono o material natural.⁸⁹

3.8.11. Fraguado

Momento en el cual el concreto fresco perdió su plasticidad debido a la reacción química entre el cemento y el agua y se endurece.⁹⁰

3.8.12. Módulo de elasticidad

Relación de proporcionalidad que existe entre las fuerzas aplicadas a un sólido y las deformaciones producidas en este, donde puede ser considerado o no la forma inicial del cuerpo.⁹¹

3.8.13. Invariante de tensión

Coeficiente constante que multiplica los valores de las tensiones principales de un sistema, que a su vez se comportan de forma independiente respecto al sistema de ejes que define las direcciones tensionales.⁹²

⁸⁷ Ibid.

⁸⁸ Ibid.

⁸⁹ Ibid.

⁹⁰ Ibid.

⁹¹ HERRERA, Lina Andrea. *Modelación numérica del concreto simple con elementos finitos usando un modelo constitutivo de daño*. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://bdigital.unal.edu.co/4118/1/294478.2011.pdf>>

⁹² Facultad de Ingeniería - U.N.N.E.

3.9. MARCO LEGAL

3.9.1. Normas ASTM

Las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), es una organización sin ánimo de lucro desarrolladora de normas aplicables a materiales, productos y servicios, creada en 1898. Estas normas representan a productores, usuarios, consumidores, el gobierno y el mundo académico, llegando a ser sus normas aceptadas y utilizadas en más de 100 países.⁹³

Las normas se desarrollan, cuando los miembros de un comité técnico de ASTM identifican una necesidad, u otras partes interesadas hacen propuestas al comité. Los miembros del grupo de trabajo preparan un proyecto de norma, el cual es revisado por su subcomité pertinente a través de consulta pública. Después de que el subcomité aprueba el documento, se presenta conjuntamente al comité principal y a todos los miembros de ASTM.⁹⁴

Dentro del campo de investigación, que comprende el desarrollo del presente trabajo, la norma ASTM normatiza algunos temas de importancia para la ejecución de este, como:

- Cemento Portland
- Cemento mezclado
- Cemento de mampostería
- Puzolana
- Hormigón
- Mortero de Albañilería
- Unidades de mampostería de hormigón
- Barra de refuerzo de acero
- Reactividad alcalina de agregados (ASR)

⁹³ https://www.astm.org/america_latina/sp/index.html

⁹⁴ *Ibid.*

3.9.2. Normas INVIAS

El INVIAS (instituto nacional de vías), empezó su operación en el año 1994, con el objetivo de ejecutar las políticas y proyectos relacionados con la infraestructura vial a cargo de la Nación. Dentro de sus funciones se encuentra:

- Adelantar investigaciones, estudios, y supervisar la ejecución de las obras de su competencia conforme a los planes y prioridades nacionales.
- Definir la regulación técnica relacionada con la infraestructura de los modos de transporte carretero, fluvial, férreo y marítimo.
- Asesorar y prestar apoyo técnico a las entidades territoriales o a sus organismos descentralizados encargados de la construcción, mantenimiento y atención de emergencias en las infraestructuras a su cargo, cuando ellas lo soliciten.

Dentro de sus documentos técnicos, uno de los más importantes y usados actualmente son las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras.⁹⁵

3.9.3. Normas NTC

Las normas técnicas NTC, es la normatividad oficial de ICONTEC (instituto colombiano de normas técnicas y certificación), una organización privada creada en 1963 con el objetivo de responder a las necesidades de los diferentes sectores económicos, a través de servicios que contribuyen al desarrollo y competitividad de las organizaciones, mediante la confianza que se genera en sus productos y servicios. Dentro de sus funciones se encuentra:

- Normalización (en Colombia)
- Educación

⁹⁵ <https://www.invias.gov.co/>

- Servicios de Evaluación de la conformidad como Certificación Sistemas de Gestión y Producto e Inspección
- Servicios de Evaluación para el Cambio Climático
- Acreditación en Salud
- Metrología (en Colombia)
- Consulta y venta de Normas y Publicaciones

Las normas NTC, tienen como objetivo, garantizar la aptitud para el uso de un producto, un proceso o un servicio.⁹⁶

3.9.4. NSR – 10

La NSR-10, es la norma sismorresistente colombiana, que comprende, el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones en el país, el cual además se acompaña de otras leyes y resoluciones, que se complementan para conseguir los objetivos de dicha norma, como lo son:

- La ley 400 de 1997.
- La ley de 1229 de 2008.
- Las resoluciones expedidas por la “comisión asesora permanente del régimen de construcciones sismorresistentes “del gobierno nacional, adscrita al ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, creada por el artículo 39 de la ley 400 de 1997.

Dentro de los temas que aborda la norma de sismo resistencia colombiana (NSR-10), se encuentra:

- Título A: Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente.
- Título B: Cargas.
- Título C: Concreto Estructural.
- Título D: Mampostería Estructural.

⁹⁶ <https://www.icontec.org/normalizacion/>

- Título E: Casas de Uno y Dos Pisos.
- Título F: Estructuras Metálicas.
- Título G: Estructuras en Madera y Guadua.
- Título H: Estudios Geotécnicos.
- Título I: Supervisión Técnica.
- Título J: Requisitos de protección contra incendios en edificaciones.
- Título K: Requisitos Complementarios.

Teniendo como objetivo primordial, reducir a un mínimo el riesgo de la pérdida de vidas humanas y defender en lo posible el patrimonio del Estado y de los ciudadanos.⁹⁷

⁹⁷ *Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial .NSR-10(Norma sismorresistente colombiana)*

3.10.CONCLUSIONES PARCIALES

- La implementación del mortero en aspectos constructivos, a pesar de originarse milenios atrás, hoy prevalece y con más aplicaciones que nunca. Esto gracias al avance técnico que han presentado sus principales componentes, especialmente a partir del siglo XVII.
- El uso desmedido e irresponsablemente controlado de plásticos tipo PET (tereftalato de polietileno), representa uno de los más graves problemas ambientales alrededor del mundo. Por este motivo se hace necesario implementar alternativas de reutilización del plástico, que ayuden a disminuir el impacto negativo en el entorno.
- El estudio del comportamiento mecánico de materiales compuestos puede ser abordado desde distintos campos, uno de los más comúnmente utilizados, es el de la ejecución de ensayos experimentales. En contraposición a este, el análisis del comportamiento mecánico puede estudiarse a través de modelos matemáticos que buscan idealizar el problema, lo cual permite obtener resultados similares, sumado a ventajas de tipo económico, temporal y espacial.
- Los avances tecnológicos en cuanto a las ciencias computacionales, representa una valiosa herramienta alternativa para el estudio de materiales compuestos como es el caso de los morteros fibrorreforzados, permitiendo estudiar y analizar su comportamiento de manera acertada, a través de simulaciones numéricas.

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

Para que se logre construir una simulación numérica exitosa del comportamiento mecánico a flexión y compresión de morteros adicionados con fibras de tereftalato de polietileno (PET), se requiere seguir un procedimiento ordenado y secuencial de carácter teórico – científico, desarrollado en tres diferentes etapas:

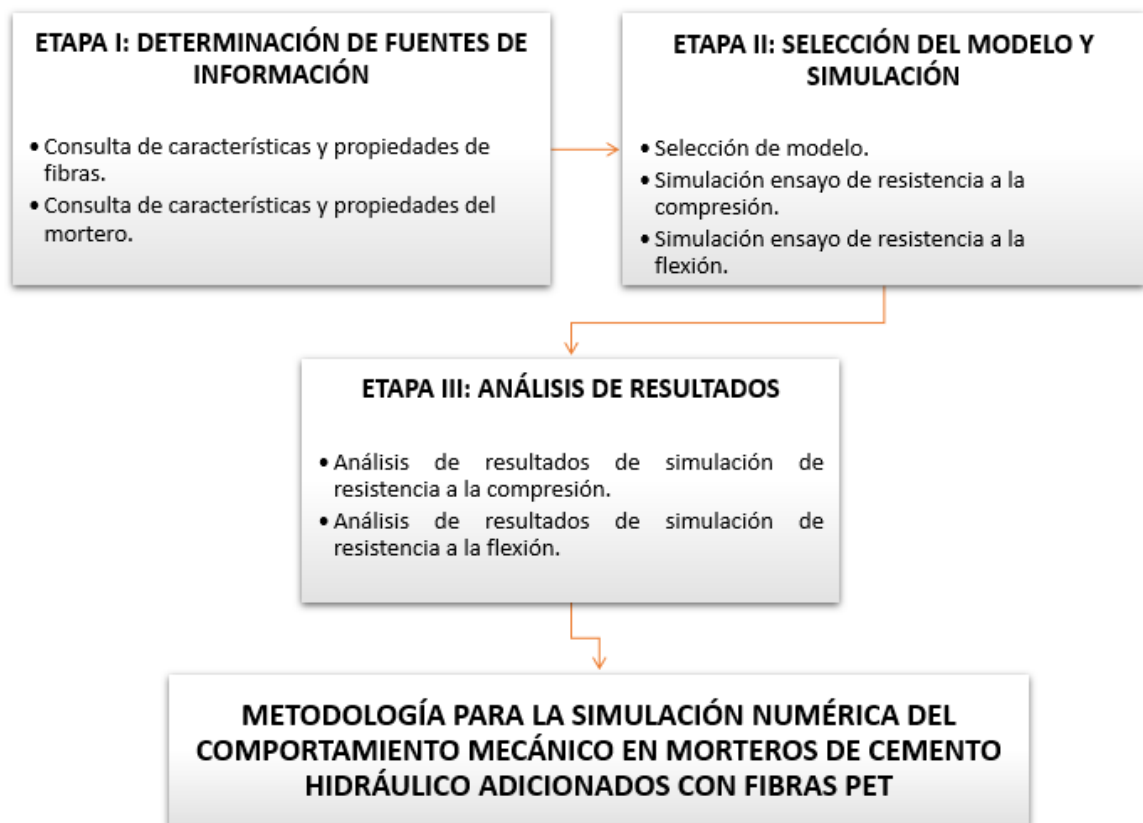
En la primera etapa, denominada “ *determinación de fuentes de información* ” se establecen las características intrínsecas de cada tipo de material a utilizar. Para efectos de este estudio se hace necesario consultar las propiedades del mortero que será la matriz del compuesto y de las fibras las cuales serán el componente o inclusión de la mezcla. Estos datos junto con otros como la localización de los nodos del sólido o la forma geométrica del mismo, serán las variables de entrada que caracterizaran al modelo seleccionado con las particularidades que demanda el análisis de un compuesto de este tipo.

En la segunda etapa de desarrollo metodológico, identificada como “ *selección del modelo y simulación* ”, se determina el modelo constitutivo a emplear, que permita definir las condiciones necesarias para una correcta simulación, teniendo en cuenta aspectos como el de los esfuerzos y las deformaciones, los criterios de fallas y las leyes constitutivas que gobiernan el modelo.

Por último en la fase final de la metodología, se presentan los resultados obtenidos producto de la simulación numérica en el software para el análisis de comportamiento de materiales ANSYS. Donde se examinan los resultados arrojados para cada tipo de ensayo contemplado en la simulación y estos a su vez se contrastan con datos consultados en la literatura, buscando denotar la proximidad existente entre los dos tipos de datos y/o resultados.

En la figura mostrada a continuación se presenta el hilo conductor empleado para el desarrollo de la metodología de la investigación sobre la simulación numérica del comportamiento mecánico en morteros de cemento hidráulico adicionados con fibras PET:

Figura 19. Hilo conductor para el desarrollo de la metodología.⁹⁸



Fuente: Propia.

⁹⁸ Fuente propia.

2.1. ETAPA I:

DETERMINACIÓN DE FUENTES DE INFORMACIÓN

El inicio del desarrollo metodológico planteado para la investigación, presentado a través de la *etapa I*, se desarrolla a partir de la consulta de la literatura correspondiente a temas asociados al comportamiento mecánico de materiales compuestos y más específicamente como se verá en las siguientes secciones, a la búsqueda de información relevante en cuanto a las características y propiedades intrínsecas del mortero (matriz) y de las fibras (inclusión).

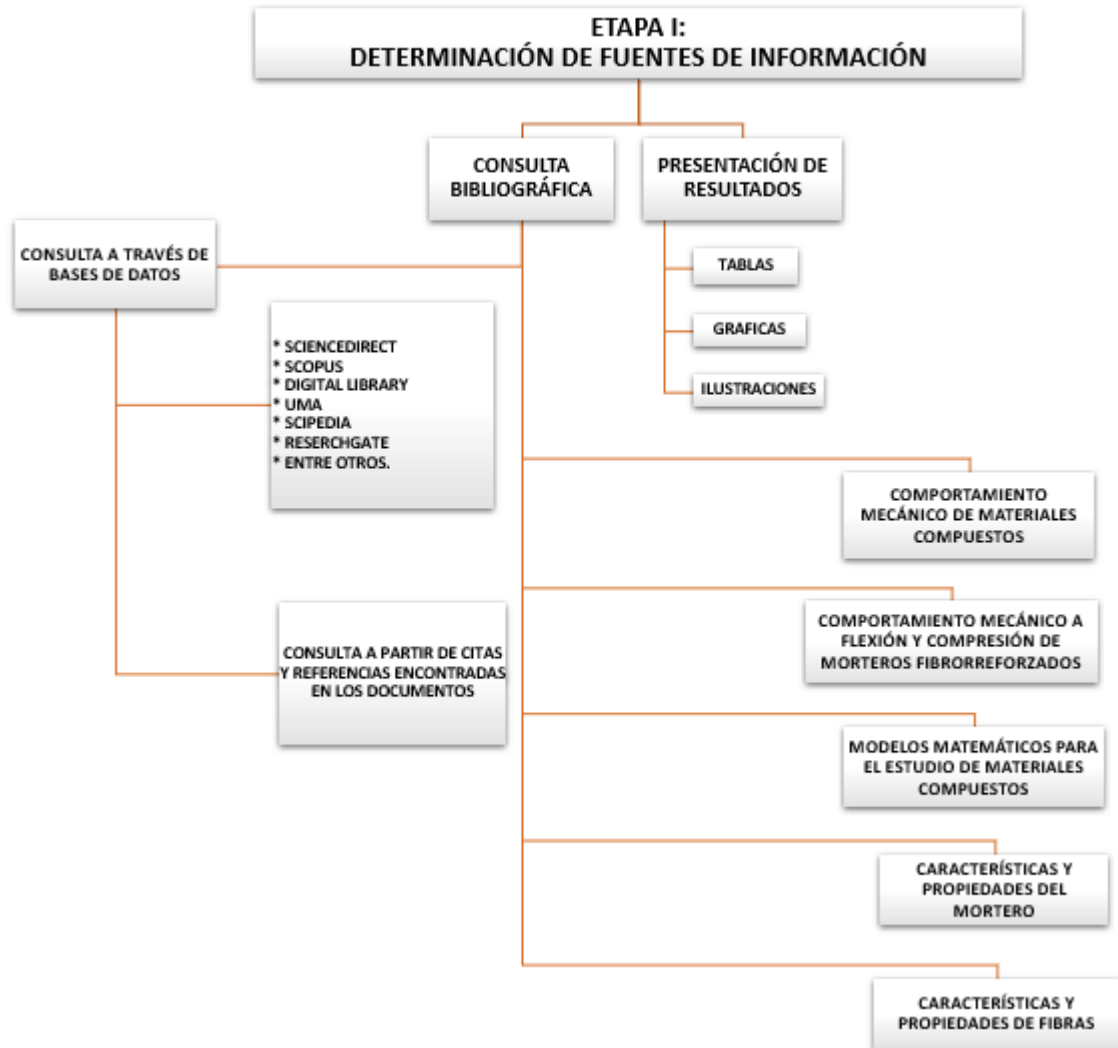
La consulta bibliográfica de los temas de interés, se dio por medio de bases de datos de tipo académico, que garantizan encontrar información de fuentes confiables, como artículos, publicaciones e investigaciones de carácter científico. Es importante recalcar la importancia de trabajar con fuentes de información válidas, que avalen los datos empleados en la simulación numérica y en el análisis de resultados. El proceso de búsqueda y selección de la información se ilustra en la figura 17.

Con lo anterior queda claro que el desarrollo del trabajo se hará tomando como base, los datos teóricos y/o experimentales encontrados en la literatura escogida, los cuales sean derivados de procesos y condiciones similares, a los estudiados en esta investigación. Es decir, magnitudes obtenidas por medio de procesos que conlleven a obtener el comportamiento mecánico a flexión y compresión de materiales compuestos, iguales o aproximados a la composición mortero – fibra.

Los resultados obtenidos en esta etapa, se presentan en el siguiente capítulo “Aplicación de la metodología” en forma de tablas e ilustraciones, que puedan ayudar a interpretar de forma práctica y acertada, los resultados encontrados en la etapa I.

En la figura mostrada a continuación se presenta el desarrollo de la primera etapa del modelo metodológico, para la investigación sobre la simulación numérica del comportamiento mecánico en morteros de cemento hidráulico adicionados con fibras PET:

Figura 20. Desarrollo de la primera etapa metodológica.⁹⁹



Fuente: Propia.

⁹⁹ Fuente propia.

2.1.1. Consulta de características y propiedades de compuestos bajo esfuerzos de compresión

En la presente sub - etapa del proceso de obtención de fuentes confiables de información, se buscó adquirir las características y propiedades mecánicas de los compuestos (matriz / componentes) bajo esfuerzos de compresión, que servirán como base para desarrollar el proceso de modelamiento y simulación del caso particular en el que este deba ser sometido a cargas / esfuerzos compresivos, esto de forma posterior a la selección de la literatura apropiada (fuentes confiables de información), teniendo en cuenta la finalidad de la investigación (obtener datos cuantitativos y calificativos del comportamiento mecánico a flexión y compresión de una simulación de mortero de cemento hidráulico adicionado con fibras PET).

La razón fundamental de este segmento del desarrollo metodológico, es el poder identificar, analizar y seleccionar, los datos que puedan servir para dotar de las particularidades necesarias, al modelo que servirá para simular el comportamiento mecánico del mortero fibrorreforzado. Es a partir de esto que se podrá garantizar la coherencia de la simulación numérica con la realidad. Para esto, es necesario en lo posible, identificar tanto las propiedades intrínsecas de los compuestos sometidos a compresión, como las extrínsecas, a su vez que estas últimas servirán para detectar la influencia directa en la mezcla, por parte de condiciones específicas de la inclusión (fibras PET), como su longitud y cantidad en la matriz.

Figura 21. *Fibras pet comercializadas por ACEBRI.*¹⁰⁰



Fuente: ACEBRI.

¹⁰⁰ ACEBRI. <https://www.acebri.com/fibrarefuerzodeconcreto>

La siguiente tabla muestra el formato en el que se registrarán los datos seleccionados:

Tabla 6. Cuadro para el registro de la información seleccionada sobre los materiales compuestos sometidos a compresión.¹⁰¹

Tipo de estudio: (este espacio está reservado para aclarar el tipo de estudio consultado: experimental, teórico, simulación, etc.)	
Compuestos: (este espacio está reservado para definir el tipo de compuesto de estudio del trabajo consultado)	
Composición: (este espacio está reservado para precisar la relación o relaciones matriz – componente)	
<p>Título: (este espacio está reservado para el título del trabajo de investigación consultado)</p> <p>Autor: (este espacio está reservado para el nombre del autor del trabajo de investigación consultado)</p> <p>Ciudad y año: (este espacio está reservado para la ciudad y el año de publicación título del trabajo de investigación consultado)</p>	<p>(este espacio está reservado para describir las características mecánicas más importantes del compuesto y sus constituyentes, obtenidas a partir del trabajo de investigación consultado)</p>

Fuente: Propia.

¹⁰¹ Fuente propia.

2.1.2. Consulta de características y propiedades de compuestos bajo esfuerzos de flexión

De igual forma que en la sección anterior, en la presente sub – etapa del proceso, se busca elegir de los datos encontrados en la literatura consultada, los que puedan representar un aporte en el proceso de idealización del modelo y que a su vez permitan entender la atribución de las propiedades mecánicas del mortero y la participación dada de fibras, en el desempeño del material compuesto (mortero fibrorreforzado con fibras tipo PET) cuando se enfrenta a esfuerzos de flexión

La siguiente tabla muestra el formato en el que se registraran los datos seleccionados:

Tabla 7. Cuadro para el registro de la información seleccionada sobre los materiales compuestos sometidos a flexión.¹⁰²

Tipo de estudio: (este espacio está reservado para aclarar el tipo de estudio consultado: experimental, teórico, simulación, etc.)	
Compuestos: (este espacio está reservado para definir el tipo de compuesto de estudio del trabajo consultado)	
Composición: (este espacio está reservado para precisar la relación o relaciones matriz – componente)	
<p>Título: (este espacio está reservado para el título del trabajo de investigación consultado)</p> <p>Autor: (este espacio está reservado para el nombre del autor del trabajo de investigación consultado)</p> <p>Ciudad y año: (este espacio está reservado para la ciudad y el año de publicación título del trabajo de investigación consultado)</p>	(este espacio está reservado para describir las características mecánicas más importantes del compuesto y sus constituyentes, obtenidas a partir del trabajo de investigación consultado)

Fuente: Propia.

¹⁰² Fuente propia.

2.2. ETAPA II:

SELECCIÓN DEL MODELO Y SIMULACIÓN

En la segunda etapa del desarrollo de la metodología se buscó identificar un modelo matemático, que pudiera idealizar y describir el comportamiento mecánico de una mezcla de mortero adicionada / reforzada con fibras. Para ello se remitió a la literatura escogida, indagando de manera especial en aquellos artículos o documentos académicos que estudiaran el comportamiento de materiales compuestos, es decir que estén constituidos por una matriz y una o más inclusiones.

Como puede observarse en el marco de referencia del presente documento, las teorías y métodos de estudio de mezclas compuestas hacen parte de un amplio campo de estudio de la mecánica de materiales. Por lo cual fue preciso establecer el método que mejor se ajustara a las necesidades de la investigación, en función de la menor incidencia posible en factores importantes como gastos computacionales y limitaciones de tipo temporal y económico, sin comprometer la calidad de los resultados esperados en la simulación numérica.

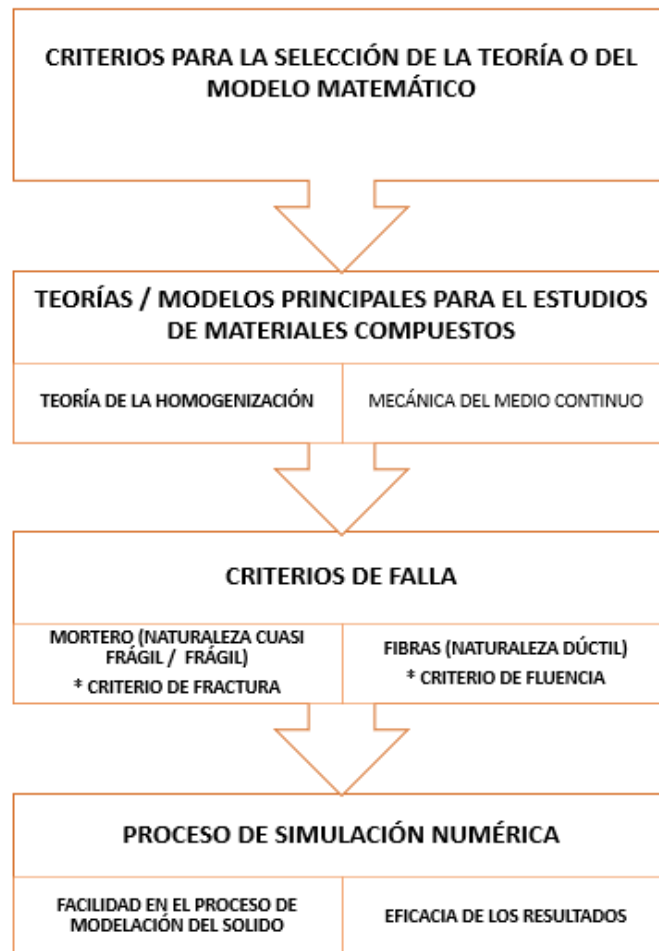
Para tener claridad en la forma en que se seleccionó el correspondiente modelo para cada una de las situaciones particulares, que requiere la simulación numérica de los ensayos a flexión y compresión de la mezcla, se muestra el diagrama de la forma de elección de este, en la sección 2.3.1 *selección de modelos*.

Una vez fueron determinada las teorías que servirán como base matemática, para cada una de las situaciones en que se deberá desempeñar la composición (mortero fibrorreforzado con PET), se buscó una herramienta de software para análisis del comportamiento de materiales, que implementara las bases teóricas seleccionadas previamente en la primera parte de la etapa II, con lo cual se tenga la certeza, de que los resultados arrojados producto de la simulación numérica del sólido, sometido a esfuerzos de flexión y compresión, estén acertadamente sustentados en principios comprobables matemáticamente, esta será la segunda parte de la etapa II de la presente metodología.

2.2.1. Selección de modelos

Para que exista una correcta selección del modelo o la teoría matemática en al que se basara el desarrollo de la simulación numérica, se determinaron ciertos criterios de diferenciación, que ayudaron a preferir a los modelos que mejor se ajustaran a las necesidades propias de la investigación, teniendo en cuenta los alcances y limitaciones del mismo. A continuación se presenta el diagrama empleado para definir las bases teóricas del modelo:

Figura 22. Criterios para la selección de la teoría o del modelo matemático.¹⁰³



Fuente: Propia.

¹⁰³ Fuente propia.

2.2.1.1. Modelo constitutivo del mortero

En esta unidad del desarrollo metodológico, se buscó la teoría / modelo, que mejor se adaptara a las necesidades específicas que requiere la idealización del mortero como matriz de una composición (material compuesto), en el proceso de desarrollo del trabajo, para obtener los resultados deseados. Para ello y como lo indica la ilustración 20 “*Criterios para la selección de la teoría o del modelo matemático*”, en primer lugar se debió determinar a través de que alternativa del campo de estudio de los materiales compuestos, se abordaría la problemática, considerando sus ventajas y desventajas.

Luego de la respectiva consulta en la literatura, se apreció que tanto la teoría de la mecánica del medio continuó (modelos constitutivos) y la teoría de la homogenización (análisis a múltiples escalas), son las opciones predilectas de los autores, al momento de evaluar el desempeño mecánico de un material compuesto. Por lo cual se estimó las fortalezas y debilidades que cada uno de los modelos ofrecía frente a las necesidades solicitadas para la investigación.

2.2.1.2. Criterio de falla del mortero

En esta sección, después de la respectiva elección de la teoría para el estudio de la mezcla, se definió el criterio por el cual se determinara la forma o el modo de falla de la matriz cementicia (mortero), para ello se tuvo que considerar las características y propiedades intrínsecas de este material, como las presentadas a continuación:

- Naturaleza del material (dúctil, frágil, cuasi - frágil, etc.)
- Tipo de cargas a resistir (impacto, flexión, compresión ,etc.)
- Forma de comportamiento del material (elástico, inelástico, plástico, etc.)

2.2.1.3. Modelo constitutivo de las fibras

Esta parte de la metodología coincide con las consideraciones tenidas en cuenta en la sección 2.3.1.2. *modelo constitutivo del mortero*, en cuanto a los criterios que se debió emplear para la elección del modelo, que describa el comportamiento de las fibras bajo los esfuerzos aplicados (flexión y compresión). Considerando las particularidades propias de las fibras como elemento inclusivo de la mezcla (mortero adicionado con fibras tipo PET) y la elección ya establecida, sobre si el problema será abordado por medio de la teoría de la homogenización (análisis multiescalar) o por el contrario a través de los principios de la mecánica del medio continuo (modelos constitutivos). Los resultados arrojados, se pueden evidenciar más adelante en el capítulo cuatro.

Cabe aclarar que la decisión de estudiar el comportamiento del compuesto (mortero reforzado con fibras) por una de las dos principales corrientes mencionadas, debe hacerse para la totalidad de los procesos que lo ameriten, es decir, deberá analizarse totalmente la problemática por medio de principios de homogenización o por el contrario, partiendo de la mecánica del medio continuo.

2.2.1.3.1. Criterio de fluencia

De igual forma que se estableció el criterio de falla para el material cementicio (mortero), para determinar el modelo que describa el modo de falla de las fibras, se asumió las consideraciones necesarias propuestas en la sección 2.3.1.2. *Criterio de falla del mortero*, teniendo en cuenta que para evaluar el comportamiento de las fibras de PET, debe hacerse después de que el material al verse sometido a esfuerzos sobrepase el límite elástico, es decir cuando se produzcan deformaciones permanentes. Ya que la naturaleza de las fibras es de tipo dúctil, contrario al caso del mortero, donde el elemento se dañara por una fractura de carácter frágil. Es este aspecto lo que impide que pueda ser usado un único modo o teoría de evaluación de daño, para ambos tipos de material tanto la matriz (mortero) como la inclusión (fibras PET) del material compuesto.

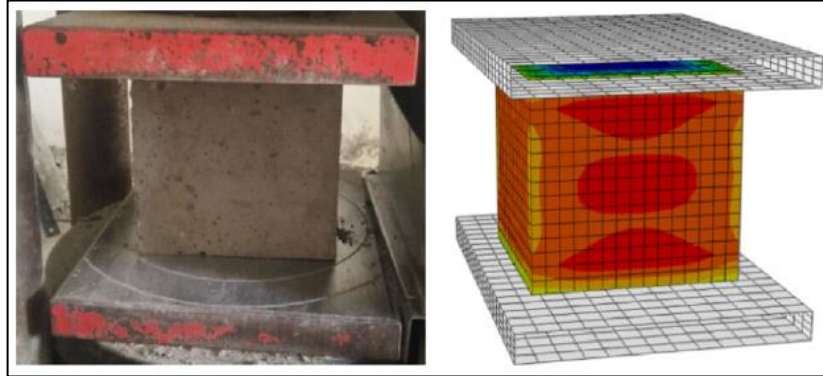
2.2.2. Simulación numérica

2.2.2.1. Simulación ensayo de resistencia a la compresión

Para que pueda existir un desarrollo de la simulación numérica, acorde a las necesidades propias de la problemática estudiada, debe de determinarse los tipos de variables necesarias para la definición y modelamiento de la situación. Se propone entonces hacer uso de un software para el análisis del comportamiento de materiales, el cual este basado en los conceptos teóricos, que debieron definirse en la etapa de selección de modelos para cada material y que además permita dotar de las características intrínsecas de los materiales (mortero y fibras PET) a los sólidos que representaran la composición de manera virtual.

Se hace igualmente necesario determinar de qué forma estará trabajando (flexión / compresión) la mezcla simulada, es por esto que se definirán las condiciones de borde, como cada situación lo amerite. En este caso, para el escenario en que el sólido deba desempeñarse frente a esfuerzos compresivos. Algunas de las variables que deberán utilizarse para simular la situación, se enlistan en la sección *2.3.3. Simulación ensayo de resistencia a flexión*, ya que son las mismas para ambas condiciones, con el diferenciador de que las condiciones de borde deben ser diferentes, si se están simulando esfuerzos de compresión o de flexión sobre el sólido.

Figura 23. Imagen de referencia ensayo y simulación de elemento sometido a compresión.¹⁰⁴



Fuente: Propia.

2.2.2.2. Simulación ensayo de resistencia a la flexión

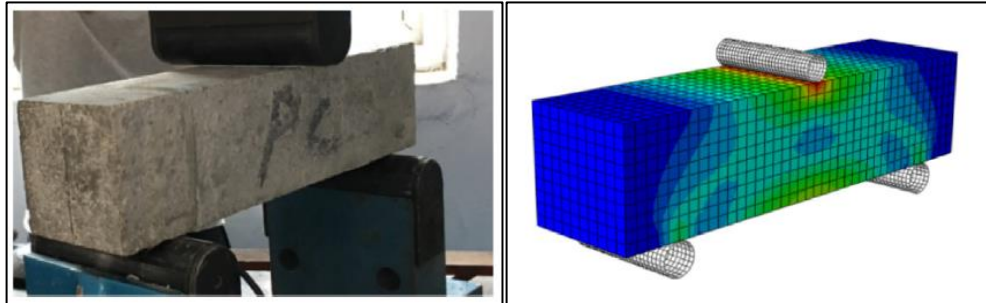
Como lo menciona el segmento anterior, uno de los diferenciadores entre ambas situaciones, serán las condiciones de borde propias de cada situación (flexión / compresión). Del mismo modo otra característica propia de cada escenario, es la geometría del sólido que servirá para la simulación virtual, no debe utilizarse geometrías similares para los dos ensayos establecidos, ya que como se evidencio en la literatura, se hace necesario condiciones geométricas particulares, que ayuden a obtener las mediciones esperadas. Se propone entonces, adoptar las medidas propuestas por normativas, que tengan como objetivo establecer la resistencia a la flexión y compresión de materiales cementicos. A continuación se enlistan algunas de las variables a tener en cuenta en el proceso de simulación:

- Geometría del sólido.
- Geometría de las fibras.
- Ubicación de nodos.
- Sistema de coordenadas.

¹⁰⁴ SUN, Xinjian y otros. *Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete*. [en línea] Disponible via internet: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.018>

- Condiciones de borde.
- Características intrínsecas de los materiales.
- Características extrínsecas de los materiales.
- Colocación de esfuerzos / cargas.

Figura 24. Imagen de referencia ensayo y simulación de elemento sometido a flexión.¹⁰⁵



Fuente: Propia.

¹⁰⁵ XINJIAN, Sun y otros. *Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete.* [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat>

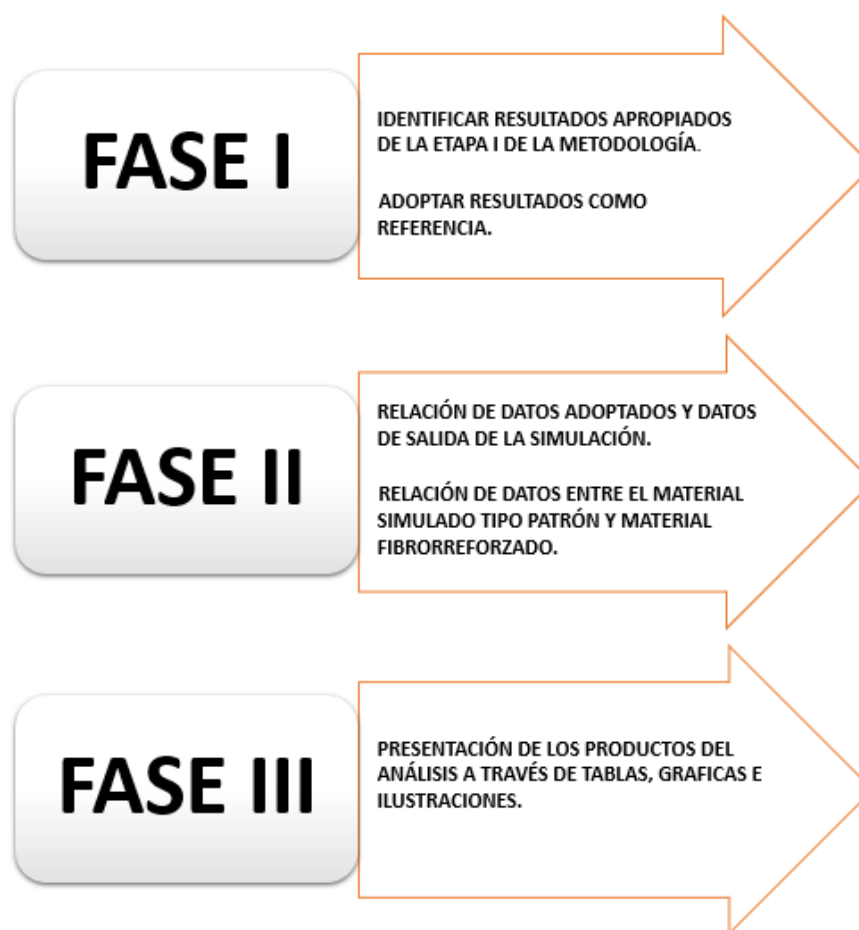
2.3. ETAPA III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este punto una vez obtenidos los resultados de las etapas I y II, se hace necesario comprobar o medir la confiabilidad de estos, es decir, considerar los resultados conseguidos a través de la simulación numérica del comportamiento mecánico a flexión y compresión de morteros de cemento hidráulico adicionados con fibras tipo PET , frente a los consultados en la literatura, producto de un proceso experimental (ensayos de laboratorio), con el fin de contrastar ambos tipos de magnitudes.

Para esto, se propone un proceso de tres fases ilustrado en el diagrama 23. En la primera parte, se propone identificar y adoptar como referencia los resultados obtenidos de la etapa I, que guarden mayor similitud con el proceso y objetivos de la presente investigación, es decir, los documentos que permitan comprender el efecto que produce la adición de fibras, sobre el desempeño de un mortero de cemento hidráulico. Posteriormente en la fase II, se relacionaran los datos adoptados en la fase I, con los obtenidos en la etapa II del proceso metodológico de la investigación, esto es los datos de salida de la simulación numérica, a partir de lo cual se analizara el contraste encontrado entre ambos tipos de magnitudes. De igual forma se efectuara el análisis referente a la diferencia encontrada en los datos de simulación realizada con el material tipo patrón y el material fibrorreforzado. Por ultimo en la fase número III, se pretende exponer los resultados y conclusiones del análisis de distintas maneras, a través de tablas, graficas e ilustraciones, que permitan contemplar de manera acertada los productos del trabajo investigativo.

En la figura mostrada a continuación se presentan las fases para el análisis de resultados, de la tercera etapa del modelo metodológico, para la investigación sobre la simulación numérica del comportamiento mecánico en morteros de cemento hidráulico adicionados con fibras PET:

Figura 25. Fases para el análisis de resultados de la etapa III, del desarrollo metodológico.¹⁰⁶



Fuente: Propia.

¹⁰⁶ Fuente propia.

2.4. CONCLUSIONES PARCIALES

- Debe existir una efectiva selección de documentos de tipo académico – científicos, con el propósito de trabajar sobre bases de información confiables, que permitan emplear, teorías, modelos, datos, resultados, conclusiones y recomendaciones, con total seguridad.
- Se hace necesario, a partir de la respectiva investigación de antecedentes, literatura, bibliografía, etc. Implementar los criterios básicos, que lleven a definir los modelos o teorías que mejor se adapten a las necesidades propias de la investigación, los cuales servirán para darle un respaldo matemático, a la resolución de la situación de estudio.
- A pesar de que el objetivo final es establecer el comportamiento del compuesto (mortero adicionado con fibras), según las teorías de estudio de mezclas, debe de tenerse en cuenta las características intrínsecas de cada tipo de material (matriz / inclusión), para establecer debidamente los modelos que permitan describir el desempeño de cada uno de estos, frente a los esfuerzos previstos.
- En el proceso de simulación numérica, esta debe de particularizarse en función de las necesidades previstas para cada escenario (ensayo a compresión / ensayo a flexión), aspectos como las condiciones de borde y la geometría del sólido son un diferenciador importante, que debe ser tenido en cuenta, para obtener los resultados esperados. Por lo cual se aconseja remitirse a las normativas establecidas, para ensayos que determinen la resistencia a la compresión y a la flexión de materiales cementicios, logrando generar un ambiente virtual óptimo, que brinde los resultados deseados.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para obtener los resultados esperados según la finalidad de la investigación, es imprescindible aplicar un procedimiento ordenado y secuencial de carácter teórico – científico, desarrollado por fases y / o etapas, que respondan a los objetivos propuestos para el trabajo. Por esto, en el presente capítulo se aplica el proceso metodológico propuesto en el capítulo dos “*METODOLOGÍA*”, para el estudio de la simulación numérica del comportamiento mecánico en morteros de cemento hidráulico adicionados con fibras PET.

En este el capítulo final de la investigación se obtienen los datos necesarios para lograr responder a las tres etapas planteadas en el capítulo anterior, mostrando los procesos necesarios, para satisfacer las necesidades propias de cada segmento. De igual manera se exponen los resultados arrojados y las conclusiones globales sobre los resultados obtenidos.

3.1. ETAPA I:

DETERMINACIÓN DE FUENTES DE INFORMACIÓN

Se decidió incluir datos obtenidos de investigaciones sobre morteros fibrorreforzados, no solo que contengan como inclusiones fibras tipo PET, si no también otras que empleen diferentes tipos de materiales fibrosos, con la finalidad de definir el aporte realizado a las propiedades mecánicas del mortero, por las fibras de tereftalato de polietileno (PET) frente a inclusiones fibrosas de otro tipo de materiales.

Los datos producto de la consulta a la literatura seleccionada, son presentados en las dos siguientes secciones, mostrando los resultados en cuanto a propiedades mecánicas de materiales compuestos, en dos partes. La primera de ellas aborda las propiedades mecánicas de materiales compuestos (matriz / inclusión) sometidos a esfuerzos de compresión. La segunda, las propiedades mecánicas de los materiales que contienen inclusiones y que se ven enfrentados a esfuerzos de flexión.

Es importante diferenciar los datos seleccionados para cada tipo de comportamiento a evaluar, ya que es a partir de estos que se modelara la simulación numérica para cada caso en cuestión. Las magnitudes obtenidas para cada situación son considerablemente diferentes, por lo que es preciso utilizar en el software para el análisis de materiales, datos de entrada según se haga necesario (simulación numérica para obtener el desempeño del compuesto a compresión o simulación numérica para obtener el comportamiento a flexión de la mezcla), obteniendo de esta manera resultados acordes a los esperados.

Algunas de las magnitudes seleccionadas serán empleadas de forma directa en el proceso de simulación, sin embargo y como se verá en la etapa III, es necesario derivar algunos datos, como es el caso de la cuantía de refuerzo equivalente, a partir de los resultados plasmados en la etapa I.

3.1.1. Consulta de características y propiedades de compuestos bajos esfuerzos de compresión

Tabla 8. Resumen de información - referencia (1) compresión.¹⁰⁷

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>					
Tipo de compuesto: <i>Mortero de cemento y cal adicionado con fibras de PET.</i>					
Composición: <i>0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%. Respectivamente.</i>					
<i>Los datos mostrados corresponden a los promediados para una proporción de mortero (1:6:6)</i>					
<i>Ensayos realizados sobre las probetas a los 7, 28 y 63 días de curada.</i>					
<p style="text-align: center;">Título: <i>PHYSICAL AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF RECYCLED PET FIBRE REINFORCED MORTAR (Comportamiento físico y mecánico del mortero reforzado con fibra de PET reciclada)</i></p> <p style="text-align: center;">Autor: <i>PEREIRA DE OLIVEIRA, Luiz A; CASTRO-GOMES, João P. Ciudad y año: Covilhã, (PORTUGAL), 2010</i></p>	Dimensiones de las fibras (mm):				
	Longitud		2.00		
	Ancho		0.50		
	Espesor		0.35		
	Densidad del material compuesto (Kg/m³) :				
	1450				
	Resistencia a la compresión a los 7 días – del compuesto (N/mm²):				
	3.27	5.19	3.64	3.84	
	Resistencia a la compresión a los 28 días – del compuesto (N/mm²):				
	5.69	4.92	5.44	5.80	
	Resistencia a la compresión a los 63 días – del compuesto (N/mm²):				
	4.84	6.34	5.48	5.69	
	Factores de resistencia residual del material compuesto a los 7 días:				
	R_{5,10}	86.3	104.2	136.1	
	R_{10,30}	62.3	91.9	128.2	
Factores de resistencia residual del material compuesto a los 28 días:					
R_{5,10}	80.7	86.3	99.1		
R_{10,30}	77.5	87.5	103.4		
Factores de resistencia residual del material compuesto a los 63 días:					
R_{5,10}	98.7	96.4	---		
R_{10,30}	---	---	120.7		

Fuente: Propia.

¹⁰⁷ Fuente propia.

Tabla 9. Resumen de información - referencia (2) compresión.¹⁰⁸

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>			
Tipo de compuesto: <i>Mortero aligerado con cascarilla de arroz</i>			
Composiciones: <i>M1, M2, M3, ..., M25.</i>			
<i>M1: (150.0 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M2: (75.0 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M3 – M19: (37.5 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M20: (0.0 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M21: (33.3 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M22 – M25: (25.0 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
Título: MORTEROS ALIGERADOS CON CASCARILLA DE ARROZ: DISEÑO DE MEZCLAS Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES Autor: TOMAS SERRANO Y OTROS Ciudad y año: VALENCIA (ESPAÑA), 2012	Nomenclatura	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la compresión (Mpa)
	M1	<i>No se produjo un mínimo nivel de fraguado, lo que hizo imposible practicar ensayos sobre las muestras</i>	
	M2		
	M3		
	M4		
	M5		
	M6		
	M7	0.96	0.87
	M8	1.14	1.81
	M9	1.06	1.99
	M10	<i>Sin fraguado</i>	
	M11	0.97	1.13
	M12	0.96	1.38
	M13	0.95	1.50
	M14	<i>Sin fraguado</i>	
	M15		
	M16	1.02	1.56
	M17	0.97	1.37
	M18	0.97	1.29
	M19	---	---
	M20	1.28	5.37
	M21	0.97	1.29
	M22	1.14	2.64
	M23	1.14	2.60
	M24	1.21	4.13
M25	1.28	2.03	

Fuente: *Propia.*¹⁰⁸ Fuente propia.

Tabla 10. Resumen de información - referencia (3) compresión.¹⁰⁹

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>					
Tipo de compuesto: <i>Mortero geopolimérico</i>					
Composiciones: <i>MR, MR-10T, MK, MK-3A y MK-5L. Respectivamente</i>					
<p style="text-align: center;">Título: MORTERO GEOPOLIMÉRICO PARA USO POTENCIAL COMO RECUBRIMIENTO EN CONCRETO</p> <p style="text-align: center;">Autor: OVIEDO SÁNCHEZ, Katherine; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby.</p> <p style="text-align: center;">Ciudad y año: ENVIGADO (COLOMBIA), 2019</p>	Fluidez del compuesto :				
	43.0	22.5	56.2	50.5	42.5
	Resistencia a la compresión del compuesto – día 1 (Mpa):				
	4.5	3.5	7.0	8.0	6.8
	Resistencia a la compresión del compuesto – día 28 (Mpa):				
	16.76	11.0	10.3	13.0	10.6
	Densidad del compuesto (Kg/m³):				
	2000	2100	1600	2300	2700
	Absorción (%):				
	11.0	13.0	15.0	15.0	15.0
Porosidad (%):					
15.0	21.0	20.0	25.0	30.0	

Fuente: Propia.

Tabla 11. Resumen de información - referencia (4) compresión.¹¹⁰

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>					
Tipo de compuesto: <i>Mortero adicionado con escombros de demolición</i>					
Composiciones: <i>1:4, 1:5, 1:6, 1:8 (cemento: escombros). Respectivamente</i>					
<p style="text-align: center;">Título: MORTEROS DE ALBAÑILERIA CON ESCOMBROS DE DEMOLICIÓN</p> <p style="text-align: center;">Autor: ALVAREZ CABRERA, Jorge L y otros</p> <p style="text-align: center;">Ciudad y año: (CUBA), 1997</p>	Resistencia a la compresión – a los 7 días (Mpa):				
	4.47	3.36	2.73	1.67	
	Resistencia a la compresión – a los 28 días (Mpa):				
	11.11	9.26	6.69	4.29	
	Resistencia a la compresión – a los 60 días (Mpa):				
14.51	11.43	9.14	5.77		

Fuente: Propia.

¹⁰⁹ Fuente propia

¹¹⁰ Fuente propia.

Tabla 12. Resumen de información - referencia (5) compresión.¹¹¹

Tipo de estudio: <i>Experimental.</i>				
Tipo de compuesto: <i>Mortero de escoria activada adicionado con fibra de vidrio.</i>				
Composición: <i>0.00%, 0.11%, 0.22%, 1.1%. Respectivamente.</i>				
<i>Matriz (OPC): Mortero de cemento Portland.</i>				
<i>Matriz (AAS): mortero de escoria activada alcalinamente.</i>				
<p style="text-align: center;">Título: ALKALI-ACTIVATED SLAG MORTARS REINFORCED WITH AR GLASSFIBRE. PERFORMANCE AND PROPERTIES <i>(morteros de escoria activada alcalinamente reforzados con fibra de vidrio ar. comportamiento y propiedades)</i></p> <p style="text-align: center;">Autor: <i>F. PUERTAS Y OTROS</i></p> <p style="text-align: center;">Ciudad y año: <i>MADRID (ESPAÑA), 2006</i></p>	Resistencia a la compresión – a los 2 días – OPC (Mpa):			
	---	49.0	48.0	46.0
	Resistencia a la compresión – a los 7 días – OPC (Mpa):			
	---	51.0	50.0	47.0
	Resistencia a la compresión – a los 28 días – OPC (Mpa):			
	---	61.0	59.0	58.0
	Resistencia a la compresión – a los 2 días – AAS (Mpa):			
	28.0	26.0	34.0	27.5
	Resistencia a la compresión – a los 7 días – AAS (Mpa):			
59.0	61.0	57.0	56.0	
Resistencia a la compresión – a los 28 días – AAS (Mpa):				
77.0	76.0	77.0	71.0	

Fuente: *Propia.*

¹¹¹ Fuente propia.

Tabla 13. Resumen de información - referencia (6) compresión.¹¹²

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>				
Tipo de compuesto: <i>Mortero geopolimérico adicionado con fibras de carbono.</i>				
Composición: <i>0.00%, 0.10%, 0.15%, 0.21%. Respectivamente.</i> <i>Muestras ensayadas a los 28 y a los 60 días de curado, con la incorporación de volúmenes indicada.</i>				
Título: MORTEROS GEOPOLIMERICOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO BASADOS EN UN SISTEMA BINARIO DE UN SUBPRODUCTO INDUSTRIAL Autor: BERNAL, Susan y otros. Ciudad y año: CALI (COLOMBIA), 2008	Resistencia a la tracción de las fibras de carbono (Mpa):			
	3790			
	Modulo elástico de las fibras de carbono (Gpa) :			
	234.4			
	Alargamiento de rotura de las fibras de carbono (%):			
	1.5			
	Diámetro de las fibras de carbono (µm):			
	12			
	Longitud de las fibras de carbono (mm):			
	5			
	Densidad de las fibras de carbono (g/cm³):			
	1.8			
	Resistencia a la compresión del material compuesto – a los 28 días (Mpa):			
59.0	56.0	57.0	41.0	
Resistencia a la compresión del material compuesto – a los 60 días (Mpa):				
71.0	67.0	61.0	60.5	

Fuente: Propia.

¹¹² Fuente propia.

Tabla 14. Resumen de información - referencia (7) compresión.¹¹³

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>					
Tipo de compuesto: <i>Mortero adicionado con fibras de bambú</i>					
Composición: <i>Patrón, 0.03, 0.1, 0.2, 0.3. Respectivamente.</i>					
<i>Valores promedios de la serie 1, a los 7 y a los 28 días.</i>					
<i>Valores promedios de la serie 2, a los 7 y a los 28 días.</i>					
Título: MORTEROS REFORZADOS CON FIBRAS DE BAMBÚ Autor: ANACILIA ARBELÁEZ ARCE Ciudad y año: MEDELLÍN (COLOMBIA), 1997	Longitud de las fibras (mm):	<i>Basal</i>	2.33		
		<i>Medio 1</i>	2.30		
		<i>Medio 2</i>	2.17		
		<i>Distal</i>	1.88		
	Diámetro de las fibras (mm):	<i>Basal</i>	0.074		
		<i>Medio 1</i>	0.066		
		<i>Medio 2</i>	0.063		
		<i>Distal</i>	0.062		
	Diámetro del lumen (mm):	<i>Basal</i>	0.025		
		<i>Medio 1</i>	0.016		
		<i>Medio 2</i>	0.012		
		<i>Distal</i>	0.011		
	Resistencia a la compresión del material compuesto – a los 7 días – serie 1 (Kg/cm²):				
	192.73	---	103.92	44.18	24.81
	Resistencia a la compresión del material compuesto – a los 28 días – serie 1 (Kg/cm²):				
	284.70	---	161.75	73.54	39.04
Resistencia a la compresión del material compuesto – a los 7 días – serie 2 (Kg/cm²):					
192.73	140.50	76.90	39.30	---	
Resistencia a la compresión del material compuesto – a los 28 días – serie 2 (Kg/cm²):					
284.70	218.40	118.40	54.70	---	

Fuente: Propia.

¹¹³ Fuente propia.

Tabla 15. Resumen de información - referencia (8) compresión.¹¹⁴

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>			
Tipo de compuesto: <i>Mortero de cemento adicionado con fibras de esparto.</i>			
Composición: <i>0 Kg/m³, 2.5 Kg/m³, 10 Kg/m³. Para especímenes enfrentados a compresión.</i>			
Longitudes de fibras: <i>10 mm, 25 mm, 50 mm, 75 mm . Para especímenes enfrentados a compresión. (Valores promedios)</i>			
Título: ADDITIONING ALFA FIBRES IN CEMENT MORTAR (Adición de fibras de esparto en mortero de cemento)	Resistencia a la compresión del material compuesto		
	Dosificación (Kg/m³)	Longitud de fibras (mm)	Resistencia (Mpa)
	0	---	12.7
	Resistencia a la compresión del material compuesto		
	Dosificación (Kg/m³)	Longitud de fibras (mm)	Resistencia (Mpa)
	2.5	10	11.2
		25	15.3
		50	11.0
		75	12.9
	Resistencia a la compresión del material compuesto		
	Dosificación (Kg/m³)	Longitud de fibras (mm)	Resistencia (Mpa)
	10	10	11.0
		25	11.2
50		11.2	
75		12.0	
Autor: BERNAT-MASOA, Ernest y otros Ciudad y año: TERRASSA (SPAIN)2016			

Fuente: Propia.

¹¹⁴ Fuente propia.

Tabla 16. Resumen de información - referencia (9) compresión.¹¹⁵

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>								
Tipo de compuesto: <i>Matriz de cemento Portland adicionado con fibras de PET.</i>								
Composición: <i>Patrón, PET, PET AHCa, PET AHNa, PET A1, PET A2, PET A3, PET A4.</i>								
<i>Con una inclusión del 2% (en peso) de fibras. Respectivamente. y una relación agua cemento de 0.4, para la matrices cementicias.</i>								
Título: <i>EFFECT OF AGING OF PET FIBRE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PET FIBRE REINFORCED CEMENT COMPOSITE (Efecto del envejecimiento de las fibras de PET en las propiedades mecánicas del compuesto de cemento reforzado con fibras PET)</i>	Longitud de fibras (mm):							
	10							
	Modulo elástico de las fibras de PET (Gpa) :							
	--	10.6	9.1	8.8	5.1	7.1	9.3	5.0
	Tensión máxima de las fibras de PET (Mpa) :							
	--	666.8	590.2	586.8	426.1	459.4	620.8	510.7
	Primera deformación de falla de las fibras de PET (%) :							
	--	10.79	11.79	12.21	18.30	11.52	12.20	17.40
	Ultima deformación de falla de las fibras de PET (%) :							
	--	11.50	13.90	14.31	18.61	13.90	12.82	19.88
Propiedades del material compuesto								
	Tipo:	Resistencia a la compresión (Mpa):			Módulo de elasticidad (Gpa):			
	Matriz cementicia	16.0			1.01			
	Matriz cementicia +PET	19.6			3.43			
	Matriz cementicia +PET AHCa	22.3			2.90			
	Matriz cementicia +PET AHNa	24.8			2.81			
	Matriz cementicia +PET A1	No fue posible determinarlo			1.32			
	Matriz cementicia +PET A2	No fue posible determinarlo			2.27			
	Matriz cementicia +PET A3	No fue posible determinarlo			2.81			
Autor: <i>MACHOVIÈ, Vladimír y otros</i>								
Ciudad y año: <i>PRAGA (REPUBLICA CHECA), 2008</i>								

¹¹⁵ Fuente propia.

Tabla 16 (continuación). Resumen de información - referencia (9) compresión.

	Matriz cementicia +PET A4	<i>No fue posible determinarlo</i>	1.62
--	----------------------------------	------------------------------------	------

Fuente: Propia.

Tabla 17. Resumen de información - referencia (10) compresión.¹¹⁶

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>				
Tipo de compuesto: <i>Mortero de cemento y cal adicionado con fibras de PET.</i>				
Composición: <i>0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%. Respectivamente.</i>				
<i>Los datos mostrados corresponden a los promediados para una proporción de mortero (1:6:6)</i>				
<i>Ensayos realizados sobre las probetas a los 7, 28 y 63 días de curada.</i>				
Título: <i>PHYSICAL AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF RECYCLED PET FIBRE REINFORCED MORTAR (Comportamiento físico y mecánico del mortero reforzado con fibra de PET reciclada)</i>	Dimensiones de las fibras (mm):			
	Longitud	2.00		
	Ancho	0.50		
	Espesor	0.35		
	Densidad del material compuesto (Kg/m³):			
	1450			
	Resistencia a la compresión a los 7 días – del compuesto (N/mm²):			
	3.27	5.19	3.64	3.84
	Resistencia a la compresión a los 28 días – del compuesto (N/mm²):			
	5.69	4.92	5.44	5.80
	Resistencia a la compresión a los 63 días – del compuesto (N/mm²):			
	4.84	6.34	5.48	5.69
	Factores de resistencia residual del material compuesto a los 7 días:			
	R_{5,10}	86.3	104.2	136.1
R_{10,30}	62.3	91.9	128.2	
Factores de resistencia residual del material compuesto a los 28 días:				

¹¹⁶ Fuente propia.

Tabla 17 (continuación). Resumen de información - referencia (10) compresión.

Autor: PEREIRA DE OLIVEIRA, Luiz A; CASTRO-GOMES, João P. Ciudad y año: Covilhã, (PORTUGAL), 2010				
	R_{5,10}	80.7	86.3	99.1
	R_{10,30}	77.5	87.5	103.4
	Factores de resistencia residual del material compuesto a los 63 días:			
	R_{5,10}	98.7	96.4	---
R_{10,30}	---	---	120.7	

Fuente: Propia.

Tabla 18. Resumen de información - referencia (11) compresión.¹¹⁷

Tipo de estudio: Experimental				
Tipo de compuesto: Mortero de cemento Portland adicionado con fibras de PET.				
Composición: 0.0%, 2.5%, 5.0%, 7.5%, de fibras en peso por la sustitución del cemento. Respectivamente. expuestos a la influencia de un ambiente agresivo (0,5%, 1% y 1,5% de HCl ácidos, 10% NH ₄ Cl, 5% H ₂ SO ₄ ácido y 10% (NH ₄) 2SO ₄ soluciones).				
Título: STUDIES ON CHEMICAL RESISTANCE OF PET-MORTAR COMPOSITES: MICROSTRUCTURE AND PHASE COMPOSITION CHANGES (Estudios de resistencia química del mortero - PET Compuestos: microestructura y fases de Cambios de composición) Autor: SOUFIANE BENOSMAN, Ahmed y otros Ciudad y año: (Argelia - Francia), 2013	Resistencia a la tracción a la rotura de las fibras (Mpa):			
	70			
	Módulo de flexión "rigidez" (Mpa):			
	2.0			
	Módulo de tracción de las fibras (Gpa):			
	2.9			
	Resistencia a la compresión del material compuesto – 28 días (Mpa):			
41.6	38.6	36.6	32.5	
Densidad del material compuesto (g/cm³):				
2.28	2.23	2.22	2.21	

Fuente: Propia.

¹¹⁷ Fuente propia.

Tabla 19. Resumen de información - referencia (12) compresión.¹¹⁸

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>				
Tipo de compuesto: <i>Mortero adicionado con gránulos de PET.</i>				
Composición: <i>0.0%, 3.0%, 6.0%, 16.0%, 23.0%.de gránulos en peso por la sustitución del árido. Respectivamente.</i>				
Título: <i>UTILIZATION OF WASTE PET BOTTLES AS AGGREGATE IN MASONRY MORTAR</i> <i>(Utilización de residuos de botellas de PET como áridos en morteros de mampostería)</i> Autor: <i>RAHMAN, M.M; MAHI, M.A; CHOWDHURY, T.U.</i> Ciudad y año: <i>(BANGLADESH), 2013</i>	Tamaño de la partícula de PET (mm):			
	<i>0.15 – 4.75</i>			
	Elongación promedio de las partículas de PET (%):			
	<i>130%</i>			
	Densidad de las partículas de PET (gm/cc):			
	<i>1.38</i>			
	Finura de las partículas de PET(mm):			
<i>1.00 – 7.00</i>				
Resistencia a la compresión del material compuesto (Mpa):				
<i>19.5</i>	<i>7.8</i>	<i>7.8</i>	<i>6.0</i>	<i>6.0</i>

Fuente: *Propia.*

Tabla 20. Resumen de información - referencia (13) compresión.¹¹⁹

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>		
Tipo de compuesto: <i>Mortero de cemento y arena adicionado con fibras (polipropileno, nailon y vidrio). Respectivamente.</i>		
Composición: <i>0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%.</i> <i>De igual forma se presentan distintas longitudes de fibras; 0.5 in, 1 in, 2 in.</i>		
Título: <i>MECHANICAL PROPERTIES OF SYNTHETIC FIBERS REINFORCED MORTARS</i> <i>(Propiedades mecánicas de los morteros reforzados con fibras sintéticas)</i>	Propiedades fibras de polipropileno	
	Esfuerzo de tensión (psi)	<i>80 - 110</i>
	Módulo de elasticidad (X10³ psi):	<i>0.5</i>
	Alargamiento ultimo (%):	<i>25</i>
	Propiedades fibras de nailon	

¹¹⁸ Fuente propia.

¹¹⁹ Fuente propia.

Tabla 20 (continuación). Resumen de información - referencia (13) compresión.

	Esfuerzo de tensión (psi)	110 - 120	
	Módulo de elasticidad (X10³ psi):	0.6	
	Alargamiento ultimo (%):	16.20	
Propiedades fibras de vidrio			
	Esfuerzo de tensión (psi)	150-550	
	Módulo de elasticidad (X10³ psi):	10.0	
	Alargamiento ultimo (%):	15 -3.5	
Resistencia a la compresión del material compuesto – 0.5 in y 0.5 % de contenido de fibras (psi):			
	3920	5600	1790
Resistencia a la compresión del material compuesto – 0.5 in y 1.0 % de contenido de fibras (psi):			
	4592	5712	2240
Resistencia a la compresión del material compuesto – 0.5 in y 2.0 % de contenido de fibras (psi):			
	6720	7056	2352
Resistencia a la compresión del material compuesto – 1.0 in y 0.5 % de contenido de fibras (psi):			
	5600	6384	2688
Resistencia a la compresión del material compuesto – 1.0 in y 1.0 % de contenido de fibras (psi):			
	7056	6272	3163
Resistencia a la compresión del material compuesto – 1.0 in y 2.0 % de contenido de fibras (psi):			
	7280	7056	3248

Tabla 20 (continuación). Resumen de información - referencia (13) compresión.

<p style="text-align: center;">Autor: HABIB, Ahsan; BEGUM, Razia y MYDUL ALAM, Mohammad Ciudad y año: 2013</p>	Resistencia a la compresión del material compuesto – 1.5 in y 0.5 % de contenido de fibras (psi):		
	4144	6272	4032
	Resistencia a la compresión del material compuesto – 1.5 in y 1.0 % de contenido de fibras (psi):		
	6384	7056	4144
	Resistencia a la compresión del material compuesto – 1.5 in y 2.0 % de contenido de fibras (psi):		
	7846	7840	4928

Fuente: Propia.

Tabla 21. Resumen de información - referencia (14) compresión.¹²⁰

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>		
Tipo de compuesto: <i>Morteros de cemento y arena</i>		
Composición: <i>Probetas prismáticas ensayadas a los 9 días de curado. Se realizaron mediciones en 6 probetas: 1, 2, 3, 4, 5, 6. Respectivamente. Los valores se adoptaron según ensayos de compresión.</i>		
<p style="text-align: center;">Título: MEDICION DEL MODULO DE YOUNG EN MORTEROS Y VIGAS DE HORMIGON UTILIZANDO LA TECNICA ESPI O TV HOLOGRAFICA</p> <p style="text-align: center;">Autor: GONZÁLEZ PEÑA ,Rolando y otros Ciudad y año: Valencia (ESPAÑA), 2001</p>	Propiedades del mortero	
	Módulo de elasticidad (Mpa)	Densidad (Kg/m³)
	4.50	1540
	4.84	1520
	4.55	1530
	4.84	1540
	4.89	1550
	4.73	1590

Fuente: Propia.

¹²⁰ Fuente propia.

3.1.2 Consulta de características y propiedades de compuestos

3.1.3 bajo esfuerzos de flexión

Tabla 22. Resumen de información - referencia (1) flexión.¹²¹

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>					
Tipo de compuesto: <i>Mortero de cemento y cal adicionado con fibras de PET.</i>					
Composición: <i>0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%. Respectivamente.</i>					
<i>Los datos mostrados corresponden a los promediados para una proporción de mortero (1:6:6)</i>					
<i>Ensayos realizados sobre las probetas a los 7, 28 y 63 días de curada.</i>					
<p>Título: PHYSICAL AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF RECYCLED PET FIBRE REINFORCED MORTAR (Comportamiento físico y mecánico del mortero reforzado con fibra de PET reciclada)</p> <p>Autor: PEREIRA DE OLIVEIRA, Luiz A; CASTRO-GOMES, João P. Ciudad y año: Covilhã, (PORTUGAL), 2010</p>	Dimensiones de las fibras (mm):				
	Longitud		2.00		
	Ancho		0.50		
	Espesor		0.35		
	Densidad del material compuesto (Kg/m³):				
	1450				
	Resistencia a la flexión a los 7 días – del compuesto (N/mm²):				
	0.80	1.63	1.31	1.56	
	Resistencia a la flexión a los 28 días – del compuesto (N/mm²):				
	1.03	---	1.23	1.37	
	Resistencia a la flexión a los 63 días – del compuesto (N/mm²):				
	1.83	2.05	1.73	2.70	
	Factores de resistencia residual del material compuesto a los 7 días:				
	R_{5,10}	86.3	104.2	136.1	
	R_{10,30}	62.3	91.9	128.2	
Factores de resistencia residual del material compuesto a los 28 días:					
R_{5,10}	80.7	86.3	99.1		
R_{10,30}	77.5	87.5	103.4		
Factores de resistencia residual del material compuesto a los 63 días:					
R_{5,10}	98.7	96.4	---		
R_{10,30}	---	---	120.7		

Fuente: *Propia.*

¹²¹ Fuente propia.

Tabla 23. Resumen de información - referencia (2) flexión.¹²²

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>					
Tipo de compuesto: <i>MORTERO GEOPOLIMÉRICO</i>					
Composiciones: <i>MR, MR-10T, MK, MK-3A y MK-5L respectivamente</i>					
Título: <i>MORTERO GEOPOLIMÉRICO PARA USO POTENCIAL COMO RECUBRIMIENTO EN CONCRETO</i> Autor: <i>OVIEDO SÁNCHEZ, Katherine; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby.</i> Ciudad y año: <i>ENVIGADO (COLOMBIA), 2019</i>	Fluidez del compuesto :				
	43.0	22.5	56.2	50.5	42.5
	Resistencia a la compresión del compuesto – día 1 (Mpa):				
	4.5	3.5	7.0	8.0	6.8
	Resistencia a la tracción del compuesto – día 28 (Mpa):				
	2.1	1.3	1.1	1.4	1.5
	Absorción (%):				
	11.0	13.0	15.0	15.0	15.0
	Porosidad (%):				
15.0	21.0	20.0	25.0	30.0	

Fuente: *Propia.*

Tabla 24. Resumen de información - referencia (3) flexión.¹²³

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>			
Tipo de compuesto: <i>Mortero adicionado con fibras acrílicas y de polipropileno</i>			
Composiciones: <i>patrón, matriz A, matriz B, matriz C, respectivamente. porcentaje de fibras respecto al volumen (0.2 y 1%)</i>			
Título: <i>BEHAVIOUR OF ALKALINE CEMENT MORTARS REINFORCED WITH ACRYLIC AND POLYPROPYLENE FIBRES (Comportamiento de morteros de cementos alcalinos reforzados con fibras acrílicas y de polipropileno)</i>	Propiedades de las fibras :		
	<i>Acrílicas</i>		<i>Propileno</i>
	Densidad (g/cc): 1.18		Densidad (g/cc): 0.9
	Diámetro (µm): 80		Diámetro (µm): 18
	Longitud (mm): 15		Longitud (mm): 12
	Índice de tenacidad a flexo tracción (fibra tipo acrílica al 0.2%):		
	---	4.13	1.62

¹²² Fuente propia.

¹²³ Fuente propia.

Tabla 24 (continuación). Resumen de información - referencia (3) flexión.

<p style="text-align: center;">Autor: F. PUERTAS, T; T. AMAT; T. VÁZQUEZ.</p> <p style="text-align: center;">Ciudad y año: (ESPAÑA), 2000</p>	Índice de tenacidad a flexo tracción (fibra tipo acrílica al 1%):			
	---	8.22	1.70	4.75
	Índice de tenacidad a flexo tracción (fibra tipo polipropileno al 0.2%):			
	---	4.95	1.74	3.23
	Índice de tenacidad a flexo tracción (fibra tipo polipropileno al 1%):			
	---	8.03	4.03	6.01
	Resistencia al impacto – fisura, fibra tipo acrílica al 0.2% (número de impactos):			
	---	3	2	2
	Resistencia al impacto – rotura, fibra tipo acrílica al 0.2% (número de impactos):			
	----	8	4	3
	Resistencia al impacto – fisura, fibra tipo acrílica al 0.2% (número de impactos):			
	---	1	2	3
Resistencia al impacto – fisura, fibra tipo acrílica al 0.2% (número de impactos):				
----	9	6	4	

Fuente: Propia.

Tabla 25. Resumen de información - referencia (4) flexión.¹²⁴

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>			
Tipo de compuesto: <i>Mortero aligerado con cascarilla de arroz</i>			
Composiciones: <i>M1, M2, M3, ..., M25.</i>			
<i>M1: (150.0 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M2: (75.0 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M3 – M19: (37.5 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M20: (0.0 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M21: (33.3 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
<i>M22 – M25: (25.0 g de cascarilla por cada 100 g de cemento)</i>			
Título: MORTEROS ALIGERADOS CON CASCARILLA DE ARROZ: DISEÑO DE MEZCLAS Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES Autor: TOMAS SERRANO Y OTROS Ciudad y año: VALENCIA (ESPAÑA), 2012	Nomenclatura	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la flexión (Mpa)
	M1	<i>No se produjo un mínimo nivel de fraguado, lo que hizo imposible practicar ensayos sobre las muestras</i>	
	M2		
	M3		
	M4		
	M5		
	M6		
	M7	0.96	<0.2
	M8	1.14	0.83
	M9	1.06	0.81
	M10	<i>Sin fraguado</i>	
	M11	0.97	0.73
	M12	0.96	0.70
	M13	0.95	0.67
	M14	<i>Sin fraguado</i>	
	M15	<i>Sin fraguado</i>	
	M16	1.02	0.73
	M17	0.97	0.73
	M18	0.97	0.73
	M19	---	---
	M20	1.28	2.24
	M21	0.97	0.71
	M22	1.14	1.37
	M23	1.14	1.40
	M24	1.21	1.85
M25	1.28	1.18	

Fuente: *Propia.*¹²⁴ Fuente propia.

Tabla 26. Resumen de información - referencia (5) flexión.¹²⁵

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>				
Tipo de compuesto: <i>Mortero adicionado con escombros de demolición</i>				
Composiciones: <i>1:4, 1:5, 1:6, 1:8 (cemento: escombros). Respectivamente</i>				
Título: <i>MORTEROS DE ALBAÑILERIA CON ESCONMBROS DE DEOMILICIÓN</i>	Resistencia a la flexión – a los 7 días (Mpa):			
	2.60	1.01	0.92	0.69
	Resistencia a la flexión – a los 28 días (Mpa):			
	2.63	2.59	1.84	1.37
Autor: <i>ALVAREZ CABRERA, Jorge L y otros</i>	Resistencia a la flexión – a los 60 días (Mpa):			
	3.06	2.86	2.04	1.52
Ciudad y año: <i>(CUBA), 1997</i>				

Fuente: *Propia.*

Tabla 27. Resumen de información - referencia (4) flexión.¹²⁶

Tipo de estudio: <i>Experimental.</i>				
Tipo de compuesto: <i>Mortero de escoria activada adicionado con fibra de vidrio.</i>				
Composición: <i>0.00%, 0.11%, 0.22%, 1.1%. Respectivamente.</i>				
<i>Matriz (OPC): Mortero de cemento Portland.</i>				
<i>Matriz (AAS): mortero de escoria activada alcalinamente.</i>				
Título: <i>ALKALI-ACTIVATED SLAG MORTARS REINFORCED WITH AR GLASSFIBRE. PERFORMANCE AND PROPERTIES (morteros de escoria activada alcalinamente reforzados con fibra de vidrio ar. comportamiento y propiedades)</i>	Resistencia a la flexión – a los 2 días – OPC (Mpa):			
	6.8	7.3	7.4	7.8
	Resistencia a la flexión – a los 7 días – OPC (Mpa):			
	7.4	8.3	8.4	8.7
	Resistencia a la flexión – a los 28 días – OPC (Mpa):			
	10.4	10.0	9.8	11.2
Resistencia a la flexión – a los 2 días – AAS (Mpa):				
4.5	5.3	6.0	5.2	

¹²⁵ Fuente propia.

¹²⁶ Fuente propia.

Tabla 27 (continuación). Resumen de información - referencia (4) flexión

Autor: F. PUERTAS Y OTROS Ciudad y año: MADRID (ESPAÑA), 2006	Resistencia a la flexión – a los 7 días – AAS (Mpa):			
	11.2	12.2	10.5	10.5
	Resistencia a la flexión – a los 28 días – AAS (Mpa):			
	11.5	12.8	12.6	11.8

Fuente: Propia.

Tabla 28. Resumen de información - referencia (6) flexión.¹²⁷

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>	
Tipo de compuesto: <i>Mortero geopolimérico adicionado con fibras de carbono.</i>	
Composición: <i>0.00%, 0.10%, 0.15%, 0.21%. Respectivamente. Muestras ensayadas a los 28 días con la incorporación de volúmenes indicada. En especímenes con y sin entalla.</i>	
Título: MORTEROS GEOPOLIMERICOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO BASADOS EN UN SISTEMA BINARIO DE UN SUBPRODUCTO INDUSTRIAL	Resistencia a la tracción de las fibras de carbono (Mpa):
	3790
	Modulo elástico de las fibras de carbono (Gpa) :
	234.4
	Alargamiento de rotura de las fibras de carbono (%):
	1.5
	Diámetro de las fibras de carbono (µm):
	12
Longitud de las fibras de carbono (mm):	
5	
Densidad de las fibras de carbono (g/cm³):	
1.8	

¹²⁷ Fuente propia.

Tabla 30. Resumen de información - referencia (7) flexión.¹²⁹

Tipo de estudio: Experimental			
Tipo de compuesto: Mortero de cemento adicionado con fibras de esparto.			
Composición: 0 Kg/m ³ , 2.5 Kg/m ³ , 5 Kg/m ³ , 10 Kg/m ³ . Para especímenes enfrentados a flexión.			
Longitudes de fibras: 10 mm, 25 mm, 50 mm, 75 mm . Para especímenes enfrentados a flexión. (Valores promedios)			
<p>Título: ADDITIONING ALFA FIBRES IN CEMENT MORTAR (Adición de fibras de esparto en mortero de cemento)</p> <p>Autor: BERNAT-MASOA, Ernest y otros Ciudad y año: TERRASSA (SPAIN)2016</p>	Resistencia a la flexión del material compuesto		
	Dosificación (Kg/m³)	Longitud de fibras (mm)	Resistencia (Mpa)
	0	---	0.892
	Resistencia a la flexión del material compuesto		
	Dosificación (Kg/m³)	Longitud de fibras (mm)	Resistencia (Mpa)
	2.5	10	1.492
		25	0.871
		50	0.959
		75	1.328
	Resistencia a la flexión del material compuesto		
	Dosificación (Kg/m³)	Longitud de fibras (mm)	Resistencia (Mpa)
	5	10	1.583
		25	1.089
		50	1.195
		75	1.392
	Resistencia a la flexión del material compuesto		
Dosificación (Kg/m³)	Longitud de fibras (mm)	Resistencia (Mpa)	
10	10	1.877	
	25	1.367	
	50	1.487	
	75	1.241	

Fuente: Propia.

¹²⁹ Fuente propia.

Tabla 31. Resumen de información - referencia (8) flexión.¹³⁰

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>								
Tipo de compuesto: <i>Matriz de cemento Portland adicionado con fibras de PET.</i>								
Composición: <i>Patrón, PET, PET AHCa, PET AHNa, PET A1, PET A2, PET A3, PET A4.</i>								
<i>Con una inclusión del 2% (en peso) de fibras. Respectivamente. y una relación agua cemento de 0.4, para la matrices cementicias.</i>								
Título: <i>EFFECT OF AGING OF PET FIBRE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PET FIBRE REINFORCED CEMENT COMPOSITE (Efecto del envejecimiento de las fibras de PET en las propiedades mecánicas del compuesto de cemento reforzado con fibras PET)</i>	Longitud de fibras (mm):							
	10							
	Modulo elástico de las fibras de PET (Gpa) :							
	--	10.6	9.1	8.8	5.1	7.1	9.3	5.0
	Tensión máxima de las fibras de PET (Mpa) :							
	--	666.8	590.2	586.8	426.1	459.4	620.8	510.7
	Primera deformación de falla de las fibras de PET (%) :							
	--	10.79	11.79	12.21	18.30	11.52	12.20	17.40
	Ultima deformación de falla de las fibras de PET (%) :							
	--	11.50	13.90	14.31	18.61	13.90	12.82	19.88
Propiedades del material compuesto								
	Tipo:	Resistencia a la flexión (Mpa):				Módulo de elasticidad (Gpa):		
	Matriz cementicia	1.0				1.01		
	Matriz cementicia +PET	9.1				3.43		
	Matriz cementicia +PET AHCa	7.3				2.90		
	Matriz cementicia +PET AHNa	11.6				2.81		
	Matriz cementicia +PET A1	6.6				1.32		
	Matriz cementicia +PET A2	4.1				2.27		
	Matriz cementicia +PET A3	10.1				2.81		
Autor: <i>MACHOVIÈ, Vladimír y otros</i>								
Ciudad y año: <i>PRAGA (REPUBLICA CHECA), 2008</i>								

¹³⁰ Fuente propia.

Tabla 31 (continuación). Resumen de información - referencia (8) flexión.

	Matriz cementicia +PET A4	5.9	1.62
--	--	-----	------

Fuente: Propia.

Tabla 32. Resumen de información - referencia (9) flexión.¹³¹

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>		
Tipo de compuesto: <i>Mortero de cemento y arena adicionado con fibras (polipropileno, nailon y vidrio). Respectivamente.</i>		
Composición: <i>0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%.</i> <i>De igual forma se presentan distintas longitudes de fibras; 0.5 in, 1 in, 2 in.</i>		
Título: MECHANICAL PROPERTIES OF SYNTHETIC FIBERS REINFORCED MORTARS <i>(Propiedades mecánicas de los morteros reforzados con fibras sintéticas)</i>	Propiedades fibras de polipropileno	
	Esfuerzo de tensión (psi)	80 - 110
	Módulo de elasticidad (X10³ psi):	0.5
	Alargamiento ultimo (%):	25
	Propiedades fibras de nailon	
	Esfuerzo de tensión (psi)	110 - 120
	Módulo de elasticidad (X10³ psi):	0.6
	Alargamiento ultimo (%):	16.20
	Propiedades fibras de vidrio	
	Esfuerzo de tensión (psi)	150-550
	Módulo de elasticidad (X10³ psi):	10.0
	Alargamiento ultimo (%):	15 -3.5

¹³¹ Fuente propia.

Tabla 32 (continuación). Resumen de información - referencia (9) flexión.

<p>Autor: HABIB, Ahsan; BEGUM, Razia y MYDUL ALAM, Mohammad Ciudad y año: 2013</p>	Resistencia a la flexión del material compuesto – 0.5 in y 0.5 % de contenido de fibras (psi):		
	999	1190	853
	Resistencia a la flexión del material compuesto – 0.5 in y 1.0 % de contenido de fibras (psi):		
	1490	1610	1610
	Resistencia a la flexión del material compuesto – 0.5 in y 2.0 % de contenido de fibras (psi):		
	1580	1672	1425
	Resistencia a la flexión del material compuesto – 1.0 in y 0.5 % de contenido de fibras (psi):		
	1140	1420	736
	Resistencia a la flexión del material compuesto – 1.0 in y 1.0 % de contenido de fibras (psi):		
	1210	1480	1240
	Resistencia a la flexión del material compuesto – 1.0 in y 2.0 % de contenido de fibras (psi):		
	1870	1890	1572
	Resistencia a la flexión del material compuesto – 1.5 in y 0.5 % de contenido de fibras (psi):		
	1150	1370	864
	Resistencia a la flexión del material compuesto – 1.5 in y 1.0 % de contenido de fibras (psi):		
1440	1790	1580	
Resistencia a la flexión del material compuesto – 1.5 in y 2.0 % de contenido de fibras (psi):			
1890	1904	1611	

Fuente: Propia.

Tabla 33. Resumen de información - referencia (10) tracción.¹³²

Tipo de estudio: <i>Experimental</i>			
Tipo de compuesto: <i>Mortero adicionado con fibras de PET</i>			
Composición: <i>0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15%, de adición de fibras PET. Respectivamente.</i>			
<i>Valores tomados a probetas de 28 días de curado</i>			
Título:	Valor mínimo (Mpa)	Valor máximo (Mpa)	Valor promedio (Mpa)
EVALUACIÓN DEL TEREFALATO DE POLIETILENO (PET) COMO AGREGADO EN LA ELABORACIÓN DE MORTERO PARA LADRILLOS Y CONCRETO	1.66	3.14	2.34
	2.31	2.75	2.57
	3.28	3.85	3.60
	1.80	2.91	2.34
	1.86	3.34	2.78
	2.77	3.47	3.06
	2.66	2.99	2.87
	1.89	3.63	2.91
	1.93	2.25	2.07
	1.73	2.83	2.41
	2.90	3.28	3.09
	2.23	3.11	2.82
	2.56	3.00	2.81
	1.55	3.52	2.65
	1.72	3.29	2.59
1.26	3.39	2.73	

Autor:
ZÚÑIGA DÍAS, Andrés Felipe

Ciudad y año:
Bogotá (COLOMBIA), 2015

Fuente: *Propia.*

¹³² Fuente propia.

3.2. ETAPA II:

SELECCIÓN DEL MODELO Y SIMULACIÓN

3.2.1. Selección de modelos

Siguiendo el proceso esquematizado en la figura 20 “*Criterios para la selección de la teoría o del modelo matemático*”, plasmada en el capítulo dos de la investigación, se optó por elegir modelos acordes a las necesidades de cada tipo de material que trabajen a través de la mecánica del medio continuo, es decir considerando el material compuesto, desde una escala macroscópica como homogéneo. Esta decisión permitirá obtener un resultado bastante acertado, además de reducir el costo computacional y temporal, de manera significativa. En contraste a lo anterior, analizar el problema desde la perspectiva de la homogenización, garantizaría un resultado mucho más preciso, al evaluar el desempeño de los materiales de estudio a múltiples escalas, identificando las características heterogéneas de cada uno de estos a nivel microscópico, para definir su comportamiento a escala macro. Pero en contraposición a las ventajas brindadas por la teoría de la homogenización, el costo computacional y temporal que conlleva un análisis de este tipo, hace que este fuera de los alcances definidos. A continuación se presenta el resumen de los modelos analíticos a emplear:

Tabla 34. Resumen de modelos constitutivos y criterios de falla a emplear.¹³³

Mortero (comportamiento frágil o cuasi – frágil)	
Modelo constitutivo	Criterio de falla
<i>Modelo de fisuración distribuida</i>	<i>Criterio de fractura de William & Warnke.</i>
Fibras PET (comportamiento dúctil)	
Modelo constitutivo	Criterio de falla
<i>Modelo de plasticidad bidimensional (curva bilineal).</i>	<i>Criterio de fluencia de Von Misses.</i>

Fuente: Propia.

¹³³ Fuente propia.

3.2.1.1. Modelo constitutivo del mortero

El modelos constitutivo para el estudio del mortero es el modelo de fisuración distribuida, analizado en el capítulo uno de la investigación.

3.2.1.2. Criterio de falla del mortero

El criterio de falla se seleccionado para estudiar el mortero es el modelo de fractura de William y Warnke, analizado en el capítulo uno de la investigación.

3.2.1.3. Modelo constitutivo de las fibras

El modelo constitutivo seleccionado para el estudio de las fibras de PET, es el modelo de plasticidad bidimensional de curva bilineal, analizado en el capítulo uno de la investigación.

3.2.1.4. Criterio de falla de las fibras

El criterio de falla seleccionado para estudiar las fibras que servirán como inclusión de la mezcla, es el modelo de fluencia de Von Misses. Estudiado en el capítulo uno de la investigación.

3.2.2. Simulación numérica

En esta fase del desarrollo metodológico, se pretende simular el comportamiento mecánico a flexión y compresión de un mortero de cemento hidráulico que ha sido reforzado con fibras sintéticas a base de PET (tereftalato de polietileno). Para ello y considerando los resultados arrojados en la etapa I de la metodología y los métodos analíticos escogidos en la sección 3.2.1. *selección de modelos*, para el estudio del desempeño mecánico de los materiales, se emplea como herramienta para el análisis del comportamiento del compuesto, el software ANSYS, que como se vio en el marco de referencia, permite realizar análisis lineales y no lineales del desempeño de los sólidos estudiados, por medio del método de los elementos finitos (MEF) .

Luego de haber estudiado la biblioteca de herramientas de ANSYS y considerando lo consultado en la literatura, se resolvió modelar la situación de estudio a través de la herramienta SOLID65, debido a la implementación que hace esta, de las teorías / modelos para el análisis matemático de los materiales compuestos, definidos en la etapa 2 del presente capítulo. Esto es, que el sólido geométrico concebido mediante la herramienta SOLID65, responderá a los esfuerzos a los que se vea sometido, según sea el caso (flexión / compresión), desenvolviéndose como una composición (matriz e inclusión), que sufrirá de daño, conforme los criterios de falla establecidos en función de la naturaleza propia de cada material (frágil / dúctil).

Por otro lado una característica adicional de la herramienta, es que permite tener en cuenta el carácter aleatorio que presentan las fibras en la mezcla, respecto al volumen total del sólido. Empleando un tipo de refuerzo equiparable a las fibras sintéticas, el cual se incorpora al volumen posicionándose en las tres direcciones principales del espacio, como lo muestra la figura 24. El refuerzo debe ser calculado en función de las propiedades de resistencia que presenten, el compuesto y a su vez cada componente, como se verá más adelante. La construcción de la simulación numérica, se presenta de forma esquemática en la figura 24.

En la figura mostrada a continuación se presenta el proceso de simulación numérica, para la investigación sobre la simulación numérica del comportamiento mecánico en morteros de cemento hidráulico adicionados con fibras PET:

Figura 26. Desarrollo del proceso de simulación numérica.¹³⁴



Fuente: Propia.

¹³⁴ Fuente propia.

3.2.2.1. Simulación ensayo de resistencia a la compresión

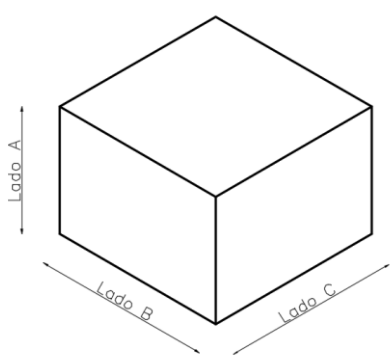
Fase I : Condiciones previas

- **Normatividad**

Con la finalidad de estandarizar los parámetros técnicos en cuanto a las características de los especímenes y la manera de ensayarlos, para obtener datos acertados sobre la resistencia a la compresión del material compuesto, se remite a la norma técnica colombiana *NTC 3356 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO* y a la *NTC 220 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO*, de donde se logró establecer lo mostrado en la tabla.

Tabla 35. Condiciones de borde y dimensiones de probeta según normatividad para determinar la resistencia a la compresión.¹³⁵

DIMENSIONES		CONDICIONES DE BORDE
Lado A	50 mm	Debe centrarse el cubo debajo del bloque superior (cabeza superior) de la máquina de ensayo. El centro del bloque superior deber formar un ángulo recto respecto a la probeta.
Lado B	50 mm	
Lado C	50 mm	



El diagrama muestra un cubo tridimensional. Una línea vertical a la izquierda indica 'Lado A'. Una línea diagonal hacia abajo y a la izquierda indica 'Lado B'. Una línea diagonal hacia abajo y a la derecha indica 'Lado C'.

Fuente: Propia.

¹³⁵ Fuente propia.

- **Dosificación**

Tabla 36. Modelos y dosificación a emplear para simulación numérica de comportamiento a compresión.¹³⁶

DOSIFICACIÓN PARA GEOMETRÍAS CUBICAS A COMPRESIÓN				
SÓLIDO	CANTIDAD DE FIBRAS (%)	PROPIEDAD A EVALUAR	MODELOS ANALÍTICOS	CRITERIOS DE FALLA
C – 1 (Patrón)	0.00	Compresión	Modelo de fisuración distribuida	Criterio de fractura de William & Warnke
C – 2	0.5	Compresión	Modelo de fisuración distribuida	Criterio de fractura de William & Warnke
			Modelo de plasticidad bidimensional	Criterio de fluencia de Von Mises
C – 3	1.0	Compresión	Modelo de fisuración distribuida	Criterio de fractura de William & Warnke
			Modelo de plasticidad bidimensional	Criterio de fluencia de Von Mises
C – 4	1.5	Compresión	Modelo de fisuración distribuida	Criterio de fractura de William & Warnke
			Modelo de plasticidad bidimensional	Criterio de fluencia de Von Mises
<p>Nota: El modelo constitutivo “Modelo de fisuración distribuida” aplica para la matriz del compuesto. El modelo constitutivo “Modelo de plasticidad bidimensional (curva bilineal).” aplica para la inclusión del compuesto.</p>				

¹³⁶ Fuente propia.

Tabla 36 (continuación). Modelos y dosificación a emplear para simulación numérica de comportamiento a compresión.

El criterio de falla “Criterio de fractura de William & Warnke.” aplica para la matriz del compuesto.

El criterio de falla “Criterio de fluencia de Von Misses.” aplica para la inclusión del compuesto.

Fuente: Propia.

Fase II : Modelado

- **Propiedades de los materiales**

Para la correcta representación por medio de la simulación numérica de los materiales que constituyen el compuesto (mortero adicionado con fibras) de estudio y teniendo en cuenta el uso del elemento SOLID65 de la biblioteca del software ANSYS para su modelado, se seleccionan los parámetros mostrados en la tabla “”, los cuales permitirán en primera medida determinar la cuantía de refuerzo equivalente que se ingresara en la simulación, en representación de la inclusión de fibras de PET.

Cada uno de estos parámetros se encuentran en función de la cantidad o el volumen de inclusión que presenta la matriz, es decir el porcentaje de fibras agregadas, que para esta investigación será de 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5%, tanto en las simulaciones para la evaluación del mortero a compresión como para cuando sea evaluado a flexión. El proceso de cómo se obtuvieron los respectivos datos, se presenta a continuación:

- **Módulo de elasticidad del material compuesto:**

Para la determinación del módulo de elasticidad del material compuesto, sabiendo que esta propiedad junto con otras características de naturaleza mecánica, pueden ser obtenidas partiendo de las propiedades individuales de cada componente de la

mezcla, se empleó el siguiente método (regla de mezclas) ampliamente utilizado en el estudio de materiales compuestos:

$$E_l = E_f * V_f + E_m * V_m \quad ()^{137}$$

Donde:

E_l , Módulo de elasticidad del material compuesto.

E_f , Módulo de elasticidad de la inclusión (fibras) .

E_m , Módulo de elasticidad de la matriz (mortero)

V_f , relación de volumen de la inclusión (fibras).

V_m , relación de volumen de la matriz (mortero).

Por lo tanto para el caso particular de estudio y tomando los datos consignados en la tabla *Características mecánicas del mortero para la creación del material compuesto en la simulación* y la tabla *Características mecánicas de las fibras de PET para la creación del material compuesto en la simulación*, se tiene:

- Dosificación 0.5% de contenido de fibras:

$$E_l = 10.6 \text{ Gpa} * 0.005 + 4.73 \text{ Gpa} * 0.995$$

$$E_l = 4.76 \text{ Gpa}$$

- Dosificación 1.0% de contenido de fibras:

$$E_l = 10.6 \text{ Gpa} * 0.0100 + 4.73 \text{ Gpa} * 0.990$$

$$E_l = 4.78 \text{ Gpa}$$

¹³⁷ GRIMALDI PASTORIL, Rocío; ALCALÁ FAZIO, Enrique. Modelos de elementos finitos de componentes de autobuses fabricados en materiales compuestos. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://oa.upm.es/7798/1/INVE_MEM_2010_79158.pdf

- Dosificación 1.5% de contenido de fibras:

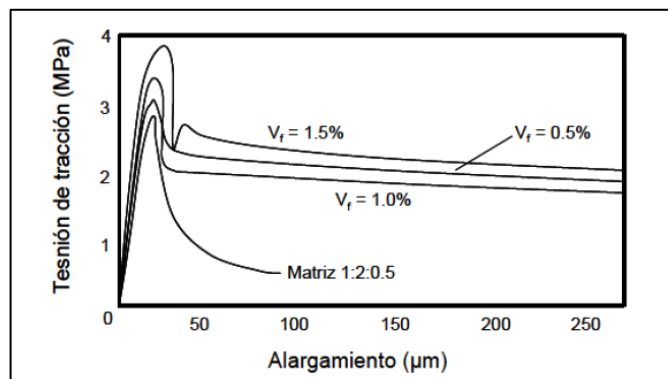
$$E_l = 10.6 \text{ Gpa} * 0.0150 + 4.73 \text{ Gpa} * 0.985$$

$$E_l = 4.81 \text{ Gpa}$$

- **Resistencia residual a la tracción del material compuesto:**

Debido a que no se contó en la literatura consultada, con estudios que arrojaran datos sobre la resistencia residual a la tracción desarrollada por el material compuesto (mortero / fibra PET), encontrándose únicamente resultados de índices que miden esta propiedad (información contenida en las tablas de características y propiedades de compuestos), se optó por tomar el valor de este parámetro como de 2.0 Mpa. Esto a partir de la información contenida en la figura 25, donde se representa los posibles valores de la resistencia residual a tracción que puede adoptar un mortero adicionado con fibras (0.5%, 1.0% o 1.5%), observándose que la magnitud puede variar desde 0 a aproximadamente 4 Mpa, por lo que se optó por adoptar el valor medio de este, para obtener el valor de la cuantía de refuerzo que reemplazara la fibras tipo PET en la simulación:

Figura 27. Curva de resistencia residual a la tracción de morteros con fibras (ACI).¹³⁸



Fuente: Mármol Salazar, patricia. *Hormigones con fibras de acero características mecánicas.*

¹³⁸ Mármol Salazar, patricia. *Hormigones con fibras de acero características mecánicas.* [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://oa.upm.es/4510/1/TESIS_MASTER_PATRICIA_CRISTINA_MARMOL_SALAZAR.pdf>

- **Resistencia a la tracción del material compuesto:**

Para definir la magnitud de la resistencia a la tracción del material compuesto, se adoptó la información aportada por la investigación de *GONZÁLEZ PEÑA, Rolando y otros (2001)*. En esta se presentan los valores máximos, mínimos y promedios de la resistencia a tracción de la mezcla (mortero / fibra PET), para distintos porcentajes de inclusión (fibras de PET). Se encontró que en esta investigación no se evaluó la respuesta del material para una adición del 0.5% y del 1.5% de fibras, por lo cual y contando con los valores para una adición del 1.0% y del 2.0% , se optó por realizar un proceso de interpolación para encontrar un valor aproximado de la resistencia a la tracción del compuesto, para los porcentajes de fibras mencionados, con lo que se tiene lo siguiente:

Para el 0% de inclusión se tiene una respuesta de 0 Mpa

Para el 1% de inclusión se tiene una respuesta de 2.34 Mpa

Para el 2% de inclusión se tiene una respuesta de 3.60 Mpa

- Estimación del valor de resistencia a la tracción del material compuesto para una inclusión del 0.5%:

$$\frac{(0 - 1.0\%)}{(0 - 2.34 \text{ Gpa})} = \frac{(0 - 0.5\%)}{(0 - X)}$$

$$X = 1.17 \text{ Mpa}$$

- Estimación del valor de resistencia a la tracción del material compuesto para una inclusión del 1.5%:

$$\frac{(1.0\% - 2.0\%)}{(2.34 \text{ Gpa} - 3.60 \text{ Gpa})} = \frac{(1.0\% - 1.5\%)}{(2.34 \text{ Gpa} - X)}$$

$$X = 2.97 \text{ Mpa}$$

Tabla 37. Parámetros seleccionados para el modelado de la respuesta a compresión y flexión del compuesto .¹³⁹

PARÁMETROS SELECCIONADOS (DESEMPEÑO A COMPRESIÓN)		
DOSIFICACIÓN = 0.5% DE CONTENIDO DE FIBRAS PET		
PARÁMETRO	VALOR	FUENTE
f'_{mc} (Resistencia a la tracción del material compuesto) – (Mpa)	1.17	GONZÁLEZ PEÑA, Rolando y otros. 2001
f'_{Rmc} (Resistencia residual a la tracción del material compuesto) – (Mpa)	2.0	Mármol Salazar, patricia. 2007
E_{mc} (Módulo de elasticidad del material compuesto) – (Gpa)	4.76	Determinación a partir de la regla de mezclas
DOSIFICACIÓN = 1.0% DE CONTENIDO DE FIBRAS PET		
PARÁMETRO	VALOR	FUENTE
f'_{mc} (Resistencia a la tracción del material compuesto) – (Mpa)	2.97	GONZÁLEZ PEÑA, Rolando y otros. 2001
f'_{Rmc} (Resistencia residual a la tracción del material compuesto) – (Mpa)	2.0	Mármol Salazar, patricia. 2007
E_{mc} (Módulo de elasticidad del material compuesto) – (Gpa)	4.78	Determinación a partir de la regla de mezclas
DOSIFICACIÓN = 1.5% DE CONTENIDO DE FIBRAS PET		
PARÁMETRO	VALOR	FUENTE
f'_{mc} (Resistencia a la tracción del material compuesto) – (Mpa)	3.60	GONZÁLEZ PEÑA, Rolando y otros. 2001
f'_{Rmc} (Resistencia residual a la tracción del material compuesto) – (Mpa)	2.0	Mármol Salazar, patricia. 2007
E_{mc} (Módulo de elasticidad del material compuesto) – (Gpa)	4.81	Determinación a partir de la regla de mezclas

Fuente: Propia.

¹³⁹ Fuente propia.

- **Refuerzo equivalente**

El elemento SOLID65 tiene la capacidad de incluir hasta cuatro tipos diferentes de materiales (uno de tipo matriz y hasta tres componentes), lo que permite llevar a cabo de manera efectiva la simulación del compuesto. Para modelar la inclusión (fibras de PET repartidas a lo largo del sólido) se emplea el concepto de refuerzo equivalente, lo que indica que las fibras que deben estar presentes en la composición, serán sustituidas por barras de refuerzo, en las tres direcciones principales del sistema de coordenadas (para representar la forma de distribución accidental de estas en el compuesto).

Para determinar la cuantía de refuerzo equivalente se implementan las dos siguientes ecuaciones:

$$B_s = \frac{f'_{mc}}{E_{mc}} * E_f \quad (3.1.)^{140}$$

Donde:

B_s , es la resistencia equivalente de la fibra.

f'_{mc} , es la resistencia a la compresión del mortero adicionado con fibras.

E_{mc} , es módulo de elasticidad del concreto adicionado con fibras.

E_f , es módulo de elasticidad del material fibroso.

$$\rho_{eq} = \frac{f'_{Rmc}}{B_s} \quad (3.1.)^{141}$$

¹⁴⁰ LÓPEZ LANCHEROS, Pedro Augusto. Simulación numérica de vigas en concreto reforzado con barras longitudinales, transversales y fibras cortas de acero mediante el método de los elementos finitos. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://www.bdigital.unal.edu.co/7824/1/pedroaugustolopezlancheros.2012.pdf>

¹⁴¹ LÓPEZ LANCHEROS, Pedro Augusto. Simulación numérica de vigas en concreto reforzado con barras longitudinales, transversales y fibras cortas de acero mediante el método de los elementos finitos. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://www.bdigital.unal.edu.co/7824/1/pedroaugustolopezlancheros.2012.pdf>

Donde:

ρ_{eq} , cuantía de refuerzo equivalente.

f'_{Rmc} , es la resistencia residual a la compresión del mortero adicionado con fibras.

B_s , es la resistencia equivalente de la fibra.

Según lo anterior y contemplando las propiedades que se determinaron para la investigación, obtenidas luego de la respectiva consulta, análisis y selección de resultados examinados en la literatura, se estima el refuerzo equivalente para cada uno de los porcentajes de inclusión de fibras propuestos, como sigue:

- Estimación del valor de la cuantía de refuerzo equivalente para una inclusión del 0.5%:

$$B_s = \frac{1.17 \text{ Mpa}}{4760 \text{ Mpa}} * 10600 \text{ Mpa} = 2.61 \text{ Mpa}$$

Por lo cual la resistencia equivalente de la fibra es 2.61 Mpa.

$$\rho_{eq} = \frac{2.0 \text{ Mpa}}{2.61 \text{ Mpa}} = 0.77$$

Siendo la magnitud 1.30 la cuantía de refuerzo equivalente.

Una vez definida la cuantía de refuerzo que reemplazara la adición original de la fibras de PET, debe de tenerse en cuenta que esta expresión del volumen de refuerzo a incorporar en la simulación, se tendrá que dividir en cada una de las tres principales direcciones del sistema coordinado (ejes x,y,z), con el fin de generar un efecto lo más parecido posible, al de la distribución de las fibras en una mezcla, esto es replicar la posición de estas al azar en el compuesto, lo que se esperaría en una situación real. Por lo tanto la cantidad volumétrica necesaria para cada dirección es la que se muestra a continuación:

$$\rho_{eq}(\text{para cada dirección}) = \frac{0.77}{3}$$

$$\rho_{eq}(\text{dirección } X) = 0.26$$

$$\rho_{eq}(\text{dirección } Y) = 0.26$$

$$\rho_{eq}(\text{dirección } Z) = 0.26$$

- Estimación del valor de la cuantía de refuerzo equivalente para una inclusión del 1.0%:

$$B_s = \frac{2.97 \text{ Mpa}}{4780 \text{ Mpa}} * 10600 \text{ Mpa} = 6.59 \text{ Mpa}$$

Por lo cual la resistencia equivalente de la fibra es 2.61 Mpa.

$$\rho_{eq} = \frac{2.0 \text{ Mpa}}{6.59 \text{ Mpa}} = 0.30$$

Siendo la magnitud 1.30 la cuantía de refuerzo equivalente.

Cuantía de refuerzo equivalente para cada dirección:

$$\rho_{eq}(\text{para cada dirección}) = \frac{0.30}{3}$$

$$\rho_{eq}(\text{dirección } X) = 0.10$$

$$\rho_{eq}(\text{dirección } Y) = 0.10$$

$$\rho_{eq}(\text{dirección } Z) = 0.10$$

- Estimación del valor de la cuantía de refuerzo equivalente para una inclusión del 1.5%:

$$B_s = \frac{3.60 \text{ Mpa}}{4810 \text{ Mpa}} * 10600 \text{ Mpa} = 7.93 \text{ Mpa}$$

Por lo cual la resistencia equivalente de la fibra es 2.61 Mpa.

$$\rho_{eq} = \frac{2.0 \text{ Mpa}}{7.93 \text{ Mpa}} = 0.25$$

Siendo la magnitud 1.30 la cuantía de refuerzo equivalente.

Cuantía de refuerzo equivalente para cada dirección:

$$\rho_{eq}(\text{para cada dirección}) = \frac{0.25}{3}$$

$$\rho_{eq}(\text{dirección X}) = 0.08$$

$$\rho_{eq}(\text{dirección Y}) = 0.08$$

$$\rho_{eq}(\text{dirección Z}) = 0.08$$

Tabla 38. Valores de la cuantía de refuerzo equivalente en función del porcentaje de inclusión en la matriz .¹⁴²

CUANTÍA DE REFUERZO EQUIVALENTE	
DOSIFICACIÓN	CUANTÍA PARA CADA EJE
Inclusión del 0.5% de fibras PET	0.26
Inclusión del 1.0% de fibras PET	0.10
Inclusión del 1.5% de fibras PET	0.08

Fuente: Propia.

De manera posterior a la definición de la cantidad de cuantía equivalente, que se empleara dentro de las constantes reales del elemento SOLID65 (ANSYS), para cada una de las dosificaciones propuestas en la tabla *Modelos y dosificación a emplear para simulación numérica de comportamiento a compresión*. Se define las propiedades mecánicas de cada uno de los componentes del material compuesto (mortero / fibra), ya que son estos los que condicionaran el comportamiento mecánico del conjunto de materiales dentro de la simulación.

Tabla 39. Características mecánicas del mortero para la creación del material compuesto en la simulación.¹⁴³

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL MORTERO		
PARÁMETRO	MAGNITUD	FUENTE
Módulo de elasticidad (E_m) – (Gpa)	4.73	GONZÁLEZ PEÑA, Rolando y otros. 2001
Módulo de Poisson (ν_m) – (adimensional)	0.2	TINOCO GUEVARA, Julver Nilo. 2014

¹⁴² Fuente propia.

¹⁴³ Fuente propia.

Tabla 39 (continuación). Características mecánicas del mortero para la creación del material compuesto en la simulación

Densidad (γ_m) - (Kg/m³)	1545	GONZÁLEZ PEÑA, Rolando y otros. 2001
Nota: para la densidad y el módulo de elasticidad se adoptaron los valores promedios del estudio.		

Fuente: Propia.

Tabla 40. Características mecánicas de las fibras de PET para la creación del material compuesto en la simulación.¹⁴⁴

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS FIBRAS DE PET		
PARÁMETRO	MAGNITUD	FUENTE
Módulo de elasticidad (E_f) – (Gpa)	10.6	MACHOVIĚ, Vladimír y otros. 2008
Módulo de Poisson (ν_f) – (adimensional)	0.31	VÁZQUES GRECIANO, Andrea. 2018
Densidad (γ_f) - (Kg/m³)	1350	SOUFIANE BENOSMAN, Ahmed y otros 2013

Fuente: Propia.

¹⁴⁴ Fuente propia.

- **Geometría**

La geometría empleada para la simulación del sólido para su comportamiento a compresión, se basó en los datos plasmados en la tabla “*Condiciones de borde y dimensiones de probeta según normatividad para determinar la resistencia a la compresión*”, que a su vez fueron seleccionados de la información contenida en las normas técnicas colombiana (NTC) concernientes a este tipo de ensayos. Para la construcción del mismo puede nombrarse los siguientes pasos:

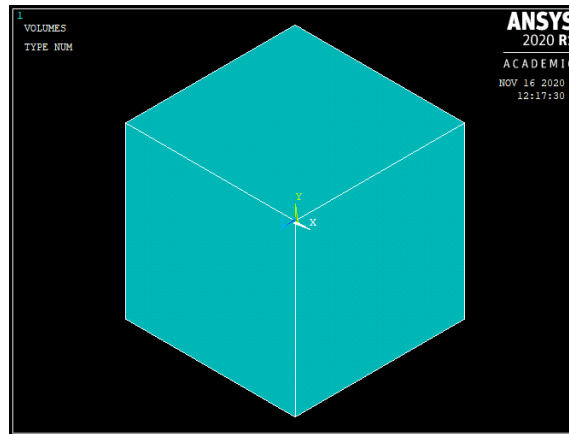
Establecer sistema de coordenadas: Debe de conocerse el sistema de coordenadas en que está trabajando el software, ya que serán estas las que definirán la forma en que se construirá el modelo.

Creación de elemento bidimensional (área): El primer elemento a emplear será uno de tipo superficie, el cual se ubicara en el origen del sistema de coordenadas (0,0,0 (componentes X,Y,Z respectivamente)). Con dimensiones de 0.05 m para cada uno de sus lados, en el plano(X,Y).

Ubicación de nodos: Otra opción podría ser la de ubicar de forma individual cada uno de los ocho nodos que constituirán el sólido, pero al emplear un elemento tipo superficie para el modelado, la creación de los nodos se hace automáticamente. Los nodos se hacen necesarios *en la asignación de condiciones de contorno*.

Extracción de la superficie: Una vez creada y ubicada la superficie, se procede mediante la herramienta de extracción de áreas, a generar el volumen en dirección paralela al eje Z, con una profundidad en este caso de 0.05m.

Figura 28. Geometría final del sólido para desempeño freten a esfuerzos de compresión.¹⁴⁵

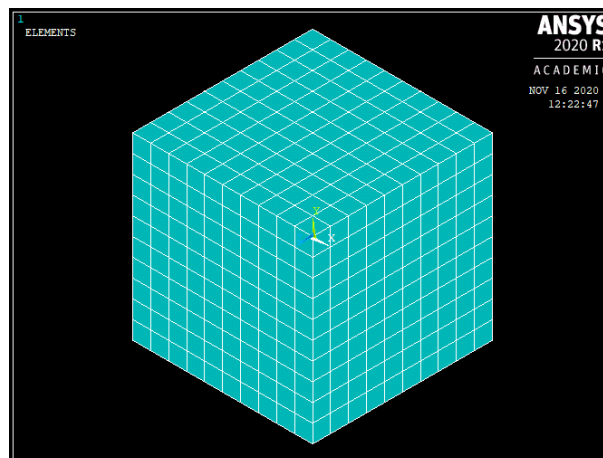


Fuente: Propia.

- **Mallado**

Se empleó un enmallado de tipo hexaédrico de tamaño 0.005 m lo que da como resultado la creación de 1000 elementos, que servirán en el análisis mediante el método de elementos finitos:

Figura 29. Proceso de mallado hexaédrico para la geometría del sólido a compresión.¹⁴⁶



Fuente: Propia.

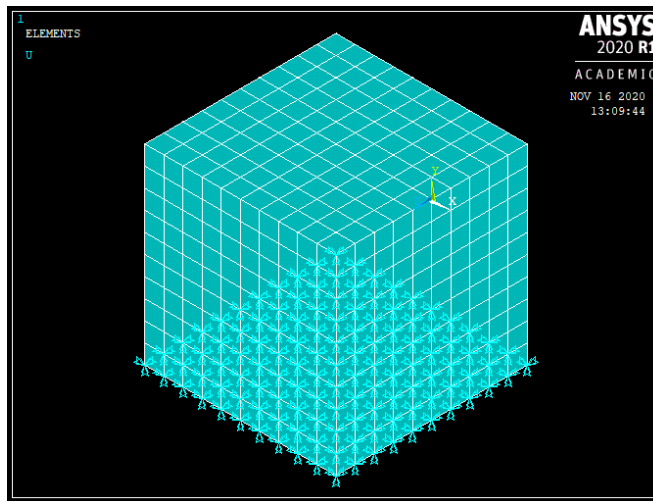
¹⁴⁵ Fuente propia.

¹⁴⁶ Fuente propia.

- **Condiciones de borde**

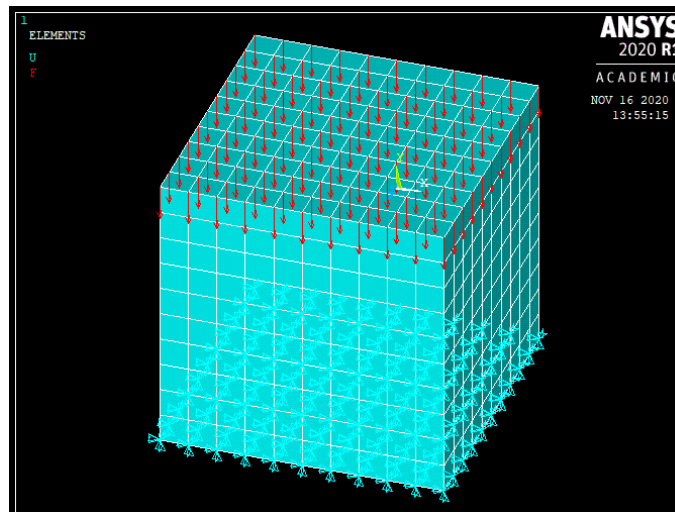
Las condiciones de borde son las que definirán la forma en que el elemento se comportara, a partir de la definición de las restricciones de desplazamiento y de la asignación de cargas.

Figura 30. Restricción de desplazamiento en la base del sólido.¹⁴⁷



Fuente: Propia.

Figura 31. Asignación de cargas de compresión (b).¹⁴⁸



Fuente: Propia.

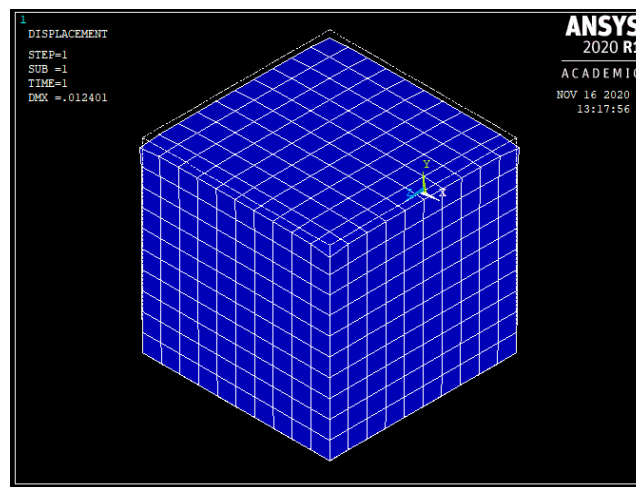
¹⁴⁷ Fuente propia.

¹⁴⁸ Fuente propia.

Fase III : Datos de salida

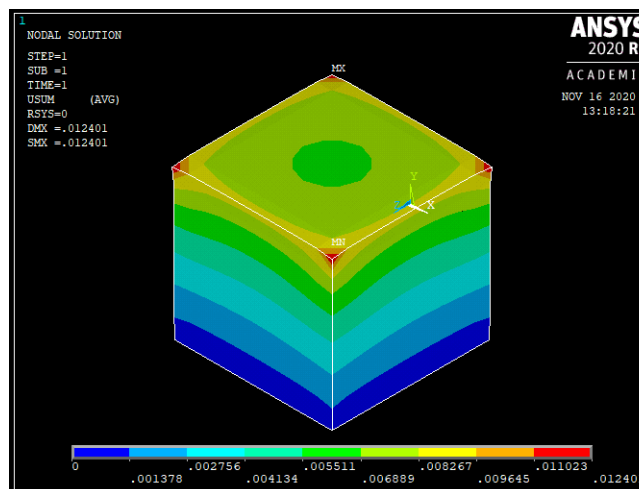
- Resultados obtenidos para el mortero sin fibrorrefuerzo (0.0% de PET)

Figura 32. Deformación del solido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.¹⁴⁹



Fuente: Propia.

Figura 33. Deformación máxima del solido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.¹⁵⁰



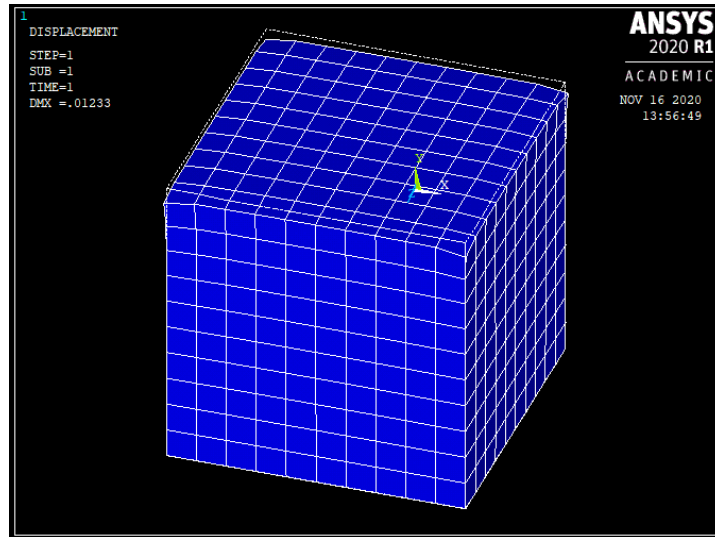
Fuente: Propia.

¹⁴⁹ Fuente propia.

¹⁵⁰ Fuente propia.

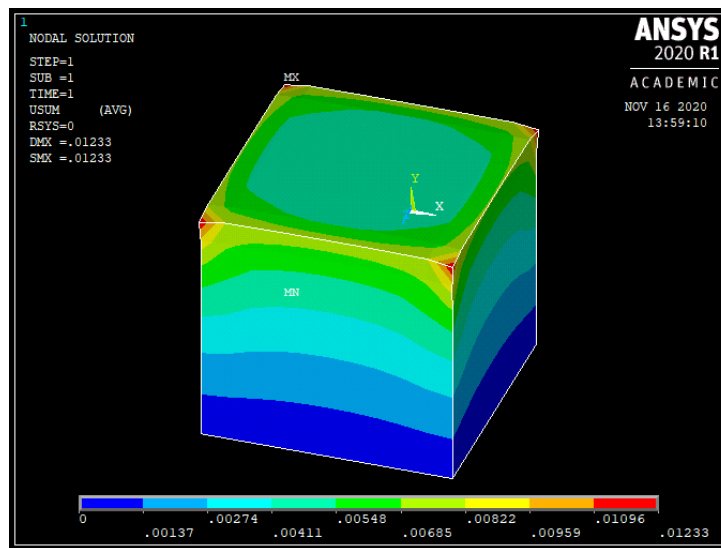
- Resultados obtenidos para el mortero con fibrorrefuerzo (0.5% de PET)

Figura 34. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.¹⁵¹



Fuente: Propia.

Figura 35. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.¹⁵²



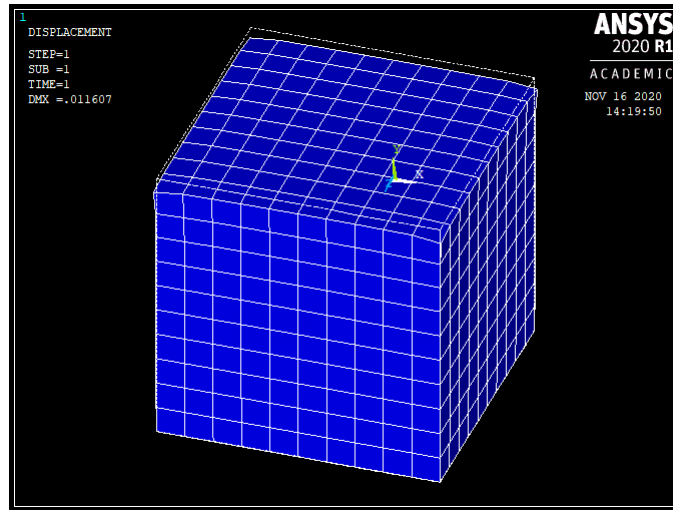
Fuente: Propia.

¹⁵¹ Fuente propia.

¹⁵² Fuente propia.

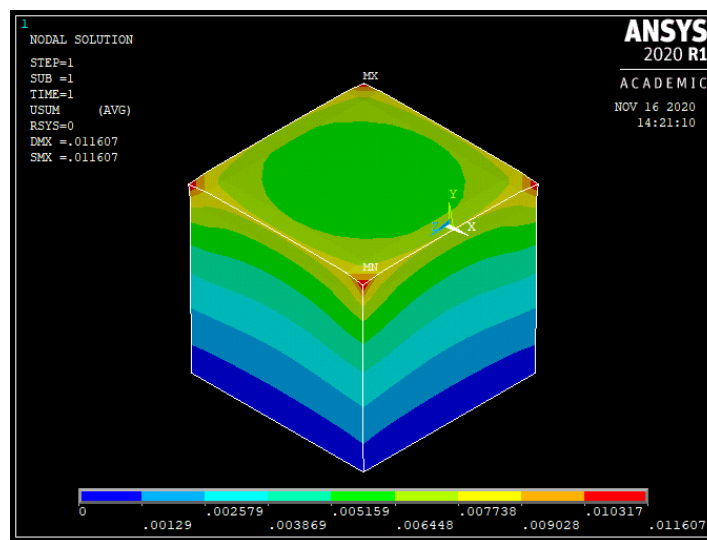
- Resultados obtenidos para el mortero con fibrorrefuerzo (1.0% de PET)

Figura 36. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 1.0% de inclusión.¹⁵³



Fuente: Propia.

Figura 37. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 1.0% de inclusión.¹⁵⁴



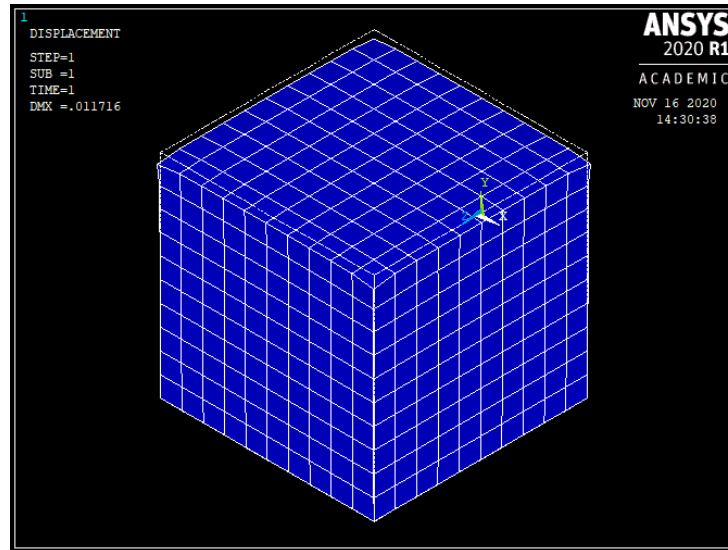
Fuente: Propia.

¹⁵³ Fuente propia.

¹⁵⁴ Fuente propia.

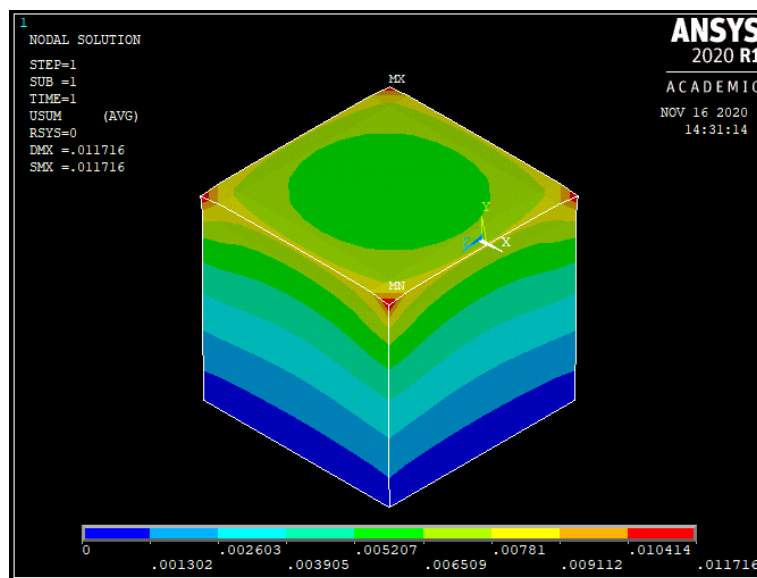
- Resultados obtenidos para el mortero con fibrorrefuerzo (1.5% de PET)

Figura 38. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 1.5% de inclusión.



Fuente: Propia.

Figura 39. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 1.5% de inclusión.¹⁵⁵



Fuente: Propia.

¹⁵⁵ Fuente propia.

- **Recopilación de datos**

Tabla 41. Datos de salida de la simulación numérica – compresión.¹⁵⁶

DATOS DE SALIDA DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA (COMPRESIÓN)		
Porcentaje de inclusión de fibras PET (%)	Carga aplicada (Pa)	Deformación máxima (mm)
0.0	15000	124.01
0.5	15000	123.30
1.0	15000	116.07
1.5	15000	117.16

Fuente: Propia.

¹⁵⁶ Fuente propia.

3.2.2.2. Simulación ensayo de resistencia a la flexión

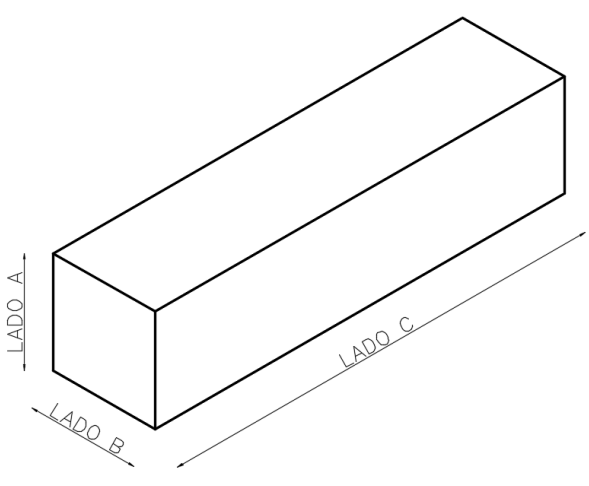
Fase I : Condiciones previas

Normatividad

Con la finalidad de estandarizar los parámetros técnicos en cuanto a las características de los especímenes y la manera de ensayarlos, para obtener datos acertados sobre la resistencia a la flexión del material compuesto, se remite a la norma técnica colombiana *NTC 120 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO*, de donde se logró establecer lo mostrado en la tabla.

Tabla 42. Condiciones de borde y dimensiones de probeta según normatividad para determinar la resistencia a la flexión.¹⁵⁷

DIMENSIONES		CONDICIONES DE BORDE
Lado A	40 mm	Debe colocarse la probeta sobre los cilindros de apoyo, en los puntos medios de estos. El dispositivo de carga deberá formar un ángulo recto respecto el prisma y ubicarse en el punto medio del mismo.
Lado B	40 mm	
Lado C	160 mm	



Fuente: Propia.

¹⁵⁷ Fuente propia.

- **Dosificación**

Tabla 43. Modelos y dosificación a emplear para simulación numérica de comportamiento a flexión.¹⁵⁸

DOSIFICACIÓN PARA GEOMETRÍAS CUBICAS A FLEXIÓN				
SÓLIDO	CANTIDAD DE FIBRAS (%)	PROPIEDAD A EVALUAR	MODELOS ANALÍTICOS	CRITERIOS DE FALLA
V – 1 (Patrón)	0.00	Compresión	Modelo de fisuración distribuida	Criterio de fractura de William & Warnke
V – 2	0.5	Compresión	Modelo de fisuración distribuida	Criterio de fractura de William & Warnke
			Modelo de plasticidad bidimensional	Criterio de fluencia de Von Mises
V – 3	1.0	Compresión	Modelo de fisuración distribuida	Criterio de fractura de William & Warnke
			Modelo de plasticidad bidimensional	Criterio de fluencia de Von Mises
V – 4	1.5	Compresión	Modelo de fisuración distribuida	Criterio de fractura de William & Warnke
			Modelo de plasticidad bidimensional	Criterio de fluencia de Von Mises
<p>Nota: El modelo constitutivo “Modelo de fisuración distribuida” aplica para la matriz del compuesto. El modelo constitutivo “Modelo de plasticidad bidimensional (curva bilineal).” aplica para la inclusión del compuesto.</p>				

¹⁵⁸ Fuente propia.

Tabla 43 (continuación). Modelos y dosificación a emplear para simulación numérica de comportamiento a flexión

El criterio de falla “Criterio de fractura de William & Warnke.” aplica para la matriz del compuesto.
El criterio de falla “Criterio de fluencia de Von Misses.” aplica para la inclusión del compuesto.

Fuente: Propia.

Fase II : Modelado

- **Propiedades de los materiales**

Dado que el tipo de material es el mismo para los dos casos de simulación tratados en esta investigación, se entiende que las características y propiedades adoptadas para la simulación del ensayo de resistencia a la flexión, son los mismo que se plasmaron en las tablas “*Parámetros seleccionados para el modelado de la respuesta a compresión y flexión del compuesto*”, tabla “*Valores de la cuantía de refuerzo equivalente en función del porcentaje de inclusión en la matriz*”, tabla “*Características mecánicas del mortero para la creación del material compuesto en la simulación*” y la tabla “*Características mecánicas de las fibras de PET para la creación del material compuesto en la simulación*”.

- **Geometría**

La geometría empleada para la simulación del sólido para su comportamiento a flexión, se basó en los datos plasmados en la tabla “Condiciones de borde y dimensiones de probeta según normatividad para determinar la resistencia a la flexión”, que a su vez fueron seleccionados de la información contenida en las normas técnicas colombiana (NTC) concernientes a este tipo de ensayos. Para la construcción del mismo puede nombrarse los siguientes pasos:

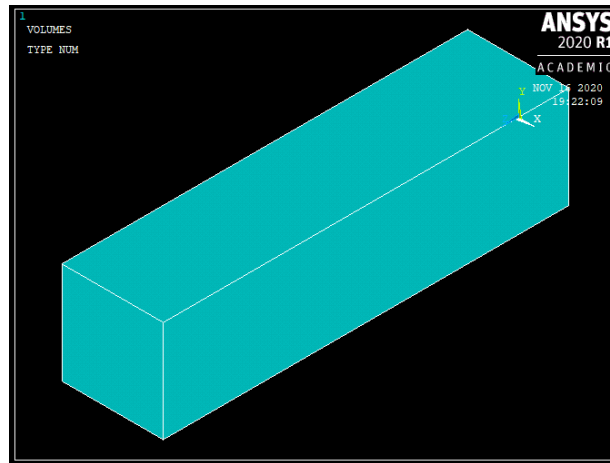
Establecer sistema de coordenadas: Debe de conocerse el sistema de coordenadas en que está trabajando el software, ya que serán estas las que definirán la forma en que se construirá el modelo.

Creación de elemento bidimensional (área): El primer elemento a emplear será uno de tipo superficie, el cual se ubicara en el origen del sistema de coordenadas (0,0,0 (componentes X,Y,Z respectivamente)). Con dimensiones de 0.04 m para cada uno de sus lados, en el plano(X,Y).

Ubicación de nodos: Otra opción podría ser la de ubicar de forma individual cada uno de los ocho nodos que constituirán el sólido, pero al emplear un elemento tipo superficie para el modelado, la creación de los nodos se hace automáticamente. Los nodos se hacen necesarios en la asignación de condiciones de contorno.

Extracción de la superficie: Una vez creada y ubicada la superficie, se procede mediante la herramienta de extracción de áreas, a generar el volumen en dirección paralela al eje Z, con una profundidad en este caso de 0.16m.

Figura 40. Geometría final del sólido para desempeño freten a esfuerzos de flexión.¹⁵⁹

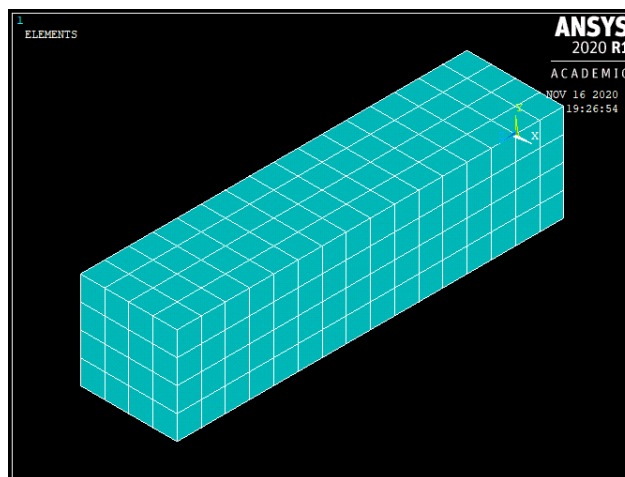


Fuente: Propia.

- **Mallado**

Se empleó un enmallado de tipo hexaédrico de tamaño 0.01 m lo que da como resultado la creación de 256 elementos, que servirán en el análisis mediante el método de elementos finitos:

Figura 41. Proceso de mallado hexaédrico para la geometría del sólido a flexión.¹⁶⁰



Fuente: Propia.

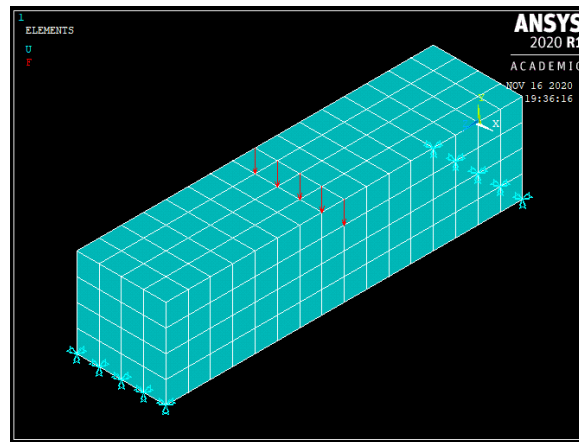
¹⁵⁹ Fuente propia.

¹⁶⁰ Fuente propia.

- **Condiciones de borde**

Las condiciones de borde son las que definirán la forma en que el elemento se comporta, a partir de la definición de las restricciones de desplazamiento y de la asignación de cargas.

Figura 42. Condiciones de contorno para el sólido sometido a flexión.¹⁶¹

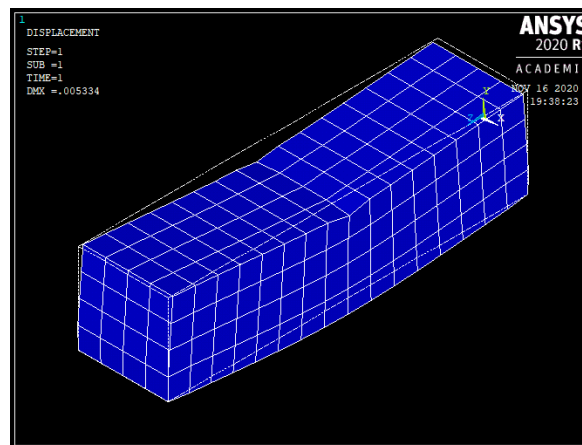


Fuente: Propia.

Fase III : Datos de salida

- **Resultados obtenidos para el mortero sin fibrorrefuerzo (0.0% de PET)**

Figura 43. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 0.0% de inclusión.¹⁶²

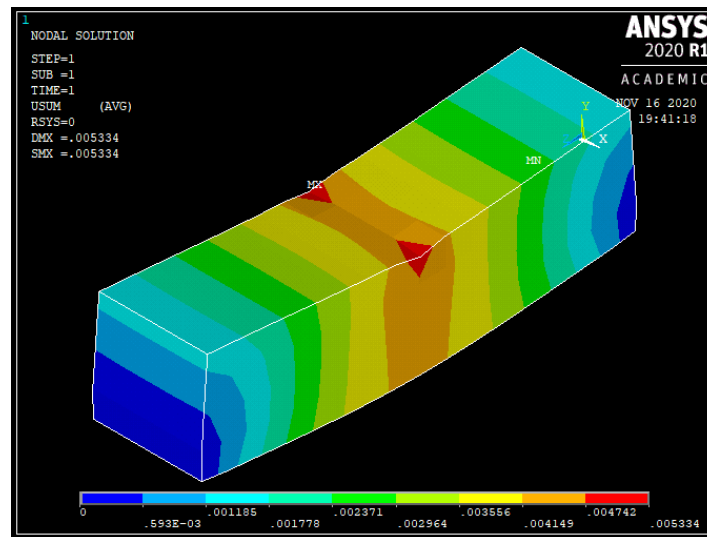


Fuente: Propia.

¹⁶¹ Fuente propia.

¹⁶² Fuente propia.

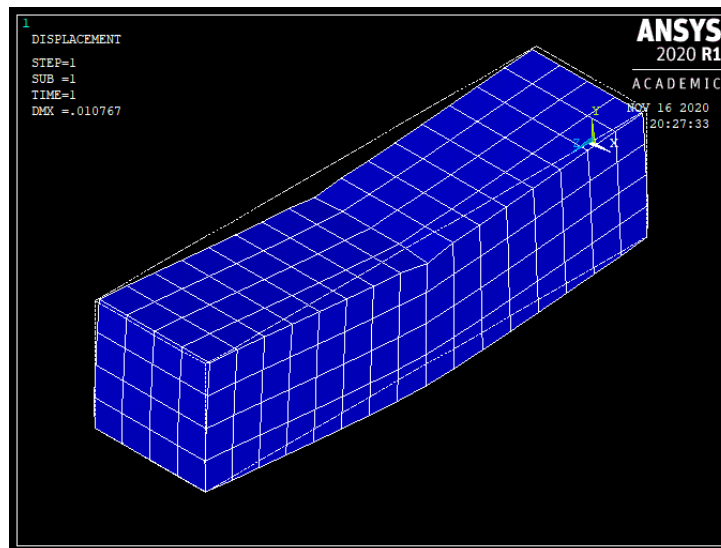
Figura 44. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.¹⁶³



Fuente: Propia.

- Resultados obtenidos para el mortero con fibrorrefuerzo (0.5% de PET)

Figura 45. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 0.5% de inclusión.¹⁶⁴

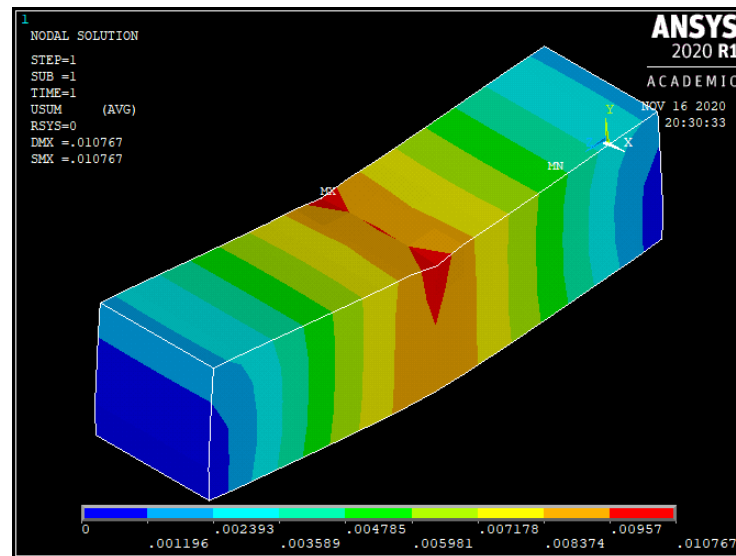


Fuente: Propia.

¹⁶³ Fuente propia.

¹⁶⁴ Fuente propia.

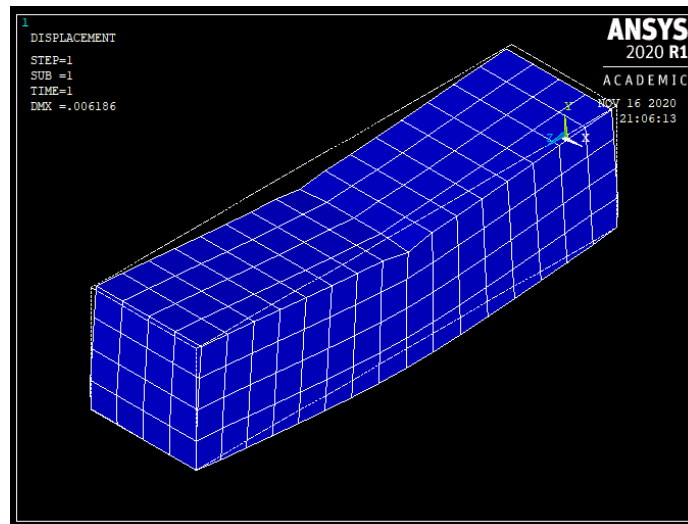
Figura 46. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.¹⁶⁵



Fuente: Propia.

- Resultados obtenidos para el mortero con fibrorrefuerzo (1.0% de PET)

Figura 47. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.¹⁶⁶

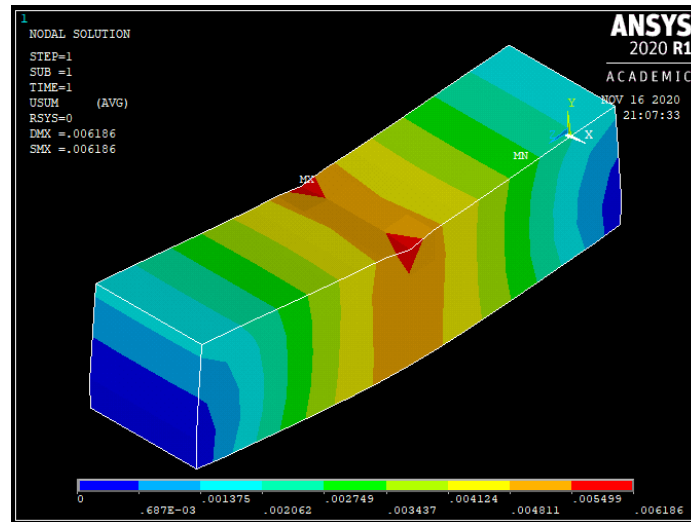


Fuente: Propia.

¹⁶⁵ Fuente propia.

¹⁶⁶ Fuente propia.

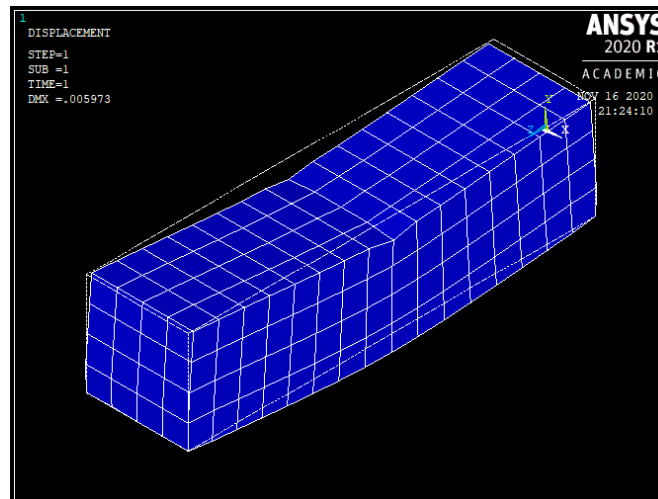
Figura 48. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.¹⁶⁷



Fuente: Propia.

- Resultados obtenidos para el mortero con fibrorrefuerzo (1.5% de PET)

Figura 49. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 1.5% de inclusión.¹⁶⁸

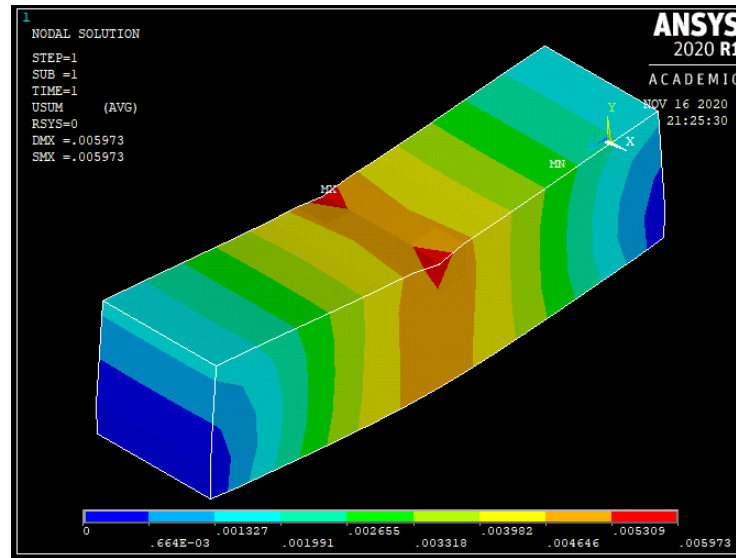


Fuente: Propia.

¹⁶⁷ Fuente propia.

¹⁶⁸ Fuente propia.

Figura 50. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de flexión – 1.5% de inclusión.¹⁶⁹



Fuente: Propia.

- **Recopilación de datos**

Tabla 44. Datos de salida de la simulación numérica – flexión.¹⁷⁰

DATOS DE SALIDA DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA (FLEXIÓN)		
Porcentaje de inclusión de fibras PET (%)	Carga aplicada (N)	Deformación máxima (mm)
0.0	15000	5.334
0.5	15000	10.767
1.0	15000	6.186
1.5	15000	5.973

Fuente: Propia.

¹⁶⁹ Fuente propia.

¹⁷⁰ Fuente propia.

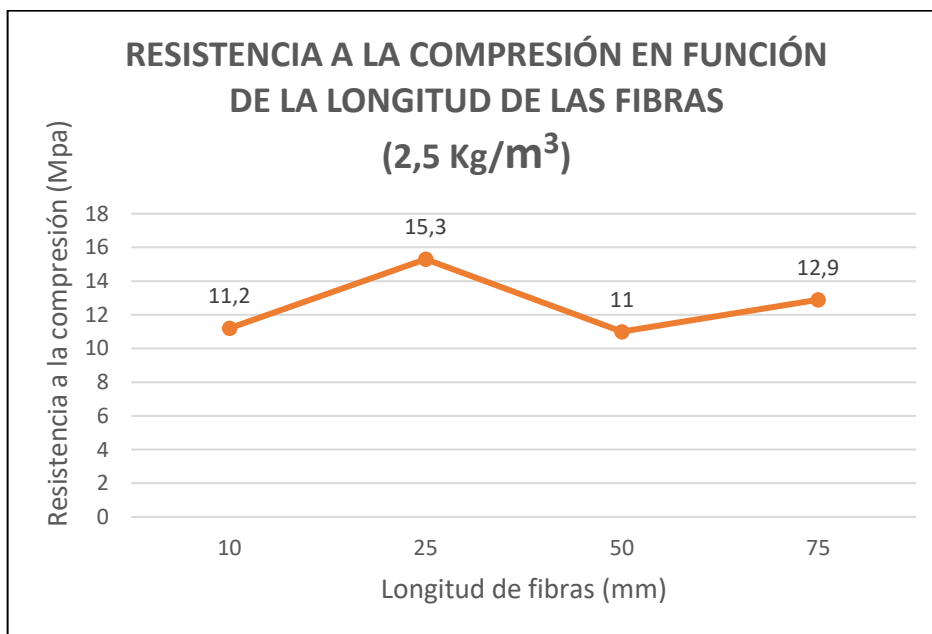
3.3. ETAPA III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **Influencia de la longitud de las fibras**

Para determinar la influencia de la longitud de las fibras sobre el material compuesto, se analizaron los resultados obtenidos de la etapa I, donde se observó el comportamiento mecánico a flexión y compresión de los compuestos adicionados con distintas longitudes de fibras. Para ilustrar de una mejor manera los resultados obtenidos, se tomó como referencia la investigación “*ADDITIONING ALFA FIBRES IN CEMENT MORTAR*”, la cual estudia la situación para compuestos con fibras de 10 mm, 25 mm, 50 mm y 75 mm de longitud, además de plantearse distintas cantidades de inclusión (fibras). Para una mejor comprensión de los resultados han sido plasmados en las gráficas mostradas a continuación:

Compresión

Figura 51. Desempeño del compuesto a compresión en función de la longitud de las fibras – 2.5 Kg/m³.¹⁷¹

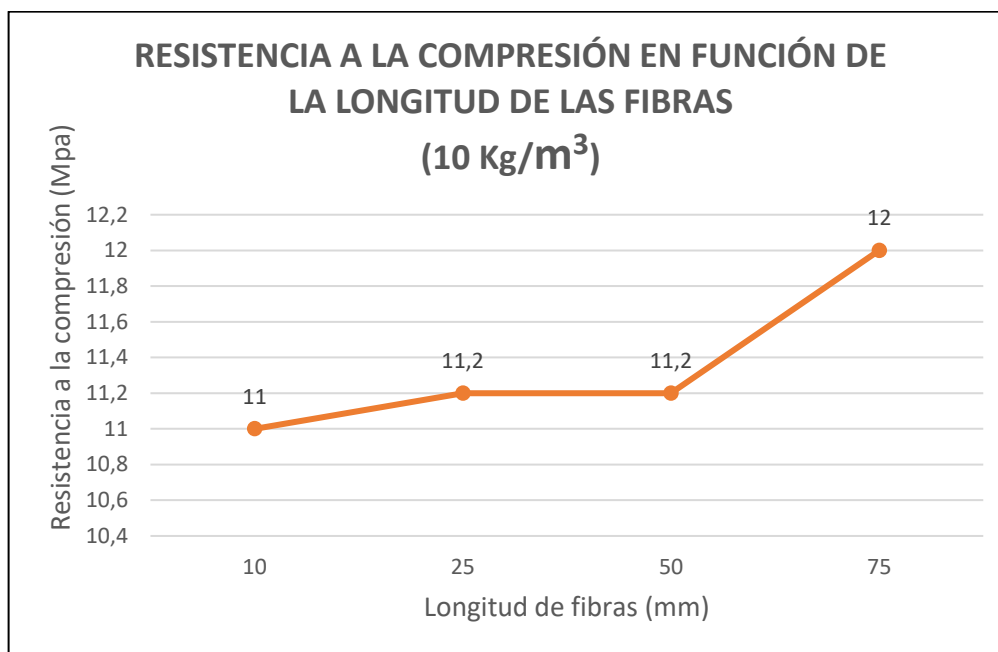


Fuente: Propia.

¹⁷¹ Fuente propia.

En la gráfica se observa un comportamiento más favorable para longitudes de fibras de 25 mm y 75 mm, siendo el desempeño menos apropiado el de las fibras de 50 mm de longitud, mientras que las fibras de 25 mm obtuvieron una clara ventaja.

Figura 52. Desempeño del compuesto a compresión en función de la longitud de las fibras - 10 Kg/m^3 .¹⁷²



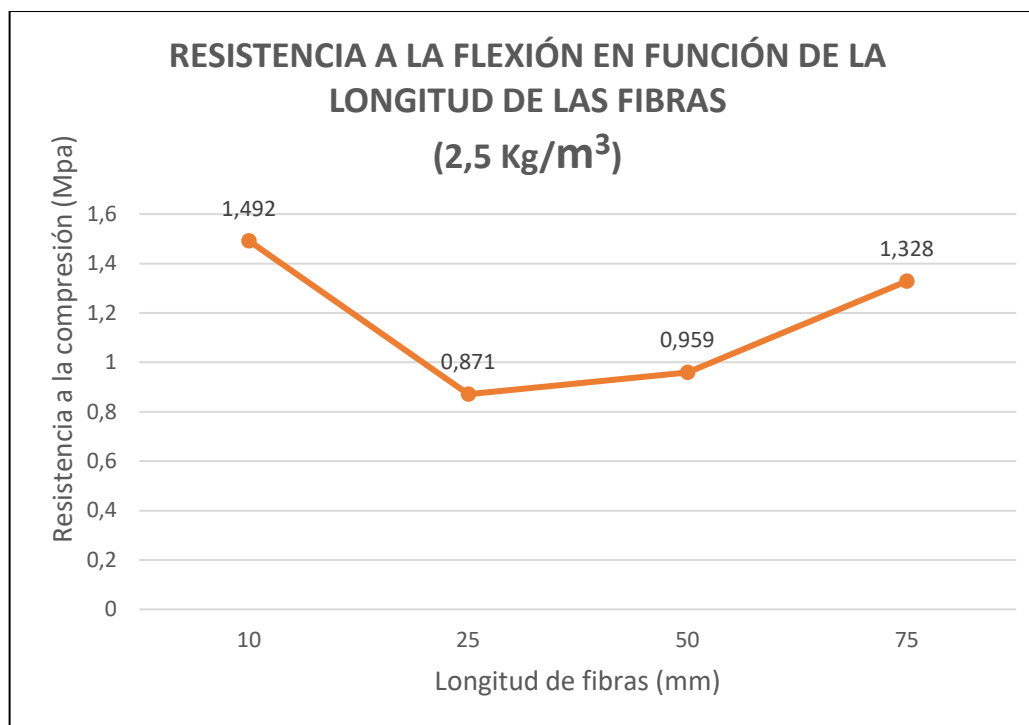
Fuente: Propia.

La situación mostrada en la ilustración es la misma que la de la gráfica con la diferencia, de que la dosis de fibras es aumentada en 4 veces la propuesta anteriormente. De igual forma se obtiene resultados similares a los del primer análisis para las respectivas longitudes de fibras. Las longitudes de 25 mm y 75 mm obtuvieron los mejores resultados de desempeño, mientras que nuevamente el compuesto con fibras de 10 mm de longitud, se mantuvo por debajo de las demás mezclas. Lo cual demuestra que las fibras más largas generan un mayor impacto en la resistencia mecánica del material compuesto (mortero / fibras) cuando se ve sometido a esfuerzos de compresión.

¹⁷² Fuente propia.

Flexión

Figura 53. Desempeño del compuesto a flexión en función de la longitud de las fibras – 2.5 Kg/m³.¹⁷³

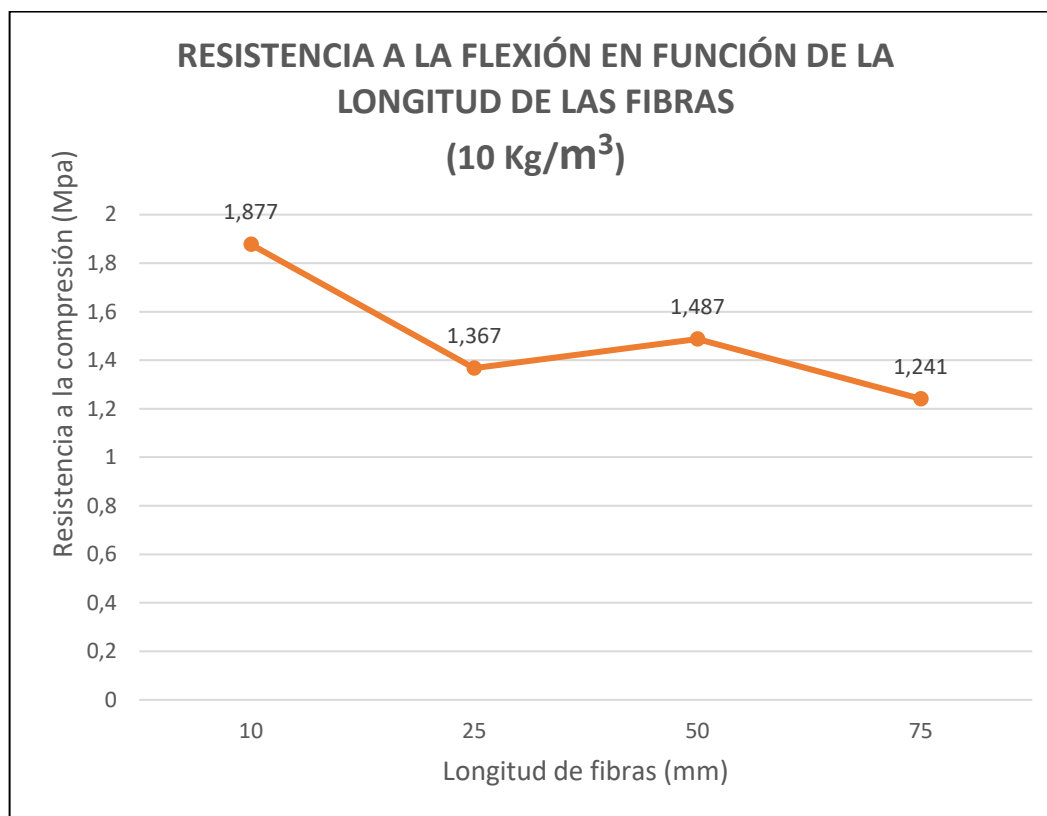


Fuente: Propia.

La figura muestra los resultados obtenidos de la investigación “*ADDITIONING ALFA FIBRES IN CEMENT MORTAR*”, respecto a los especímenes que fueron evaluados cuando se sometieron a esfuerzos de flexión, en función de las diferentes longitudes de fibras con que fueron fibrorreforzados. Es importante resaltar que en el caso de la flexión y para una proporción de 2.5 Kg/m³, la fibra que obtuvo el peor desempeño en los resultados de las probetas expuestas a compresión, en el caso de la flexión presentó la mejor resistencia, de forma amplia frente a las demás longitudes de fibras.

¹⁷³ Fuente propia.

Figura 54. Desempeño del compuesto a compresión en función de la longitud de las fibras – 10 Kg/m³.¹⁷⁴



Fuente: Propia.

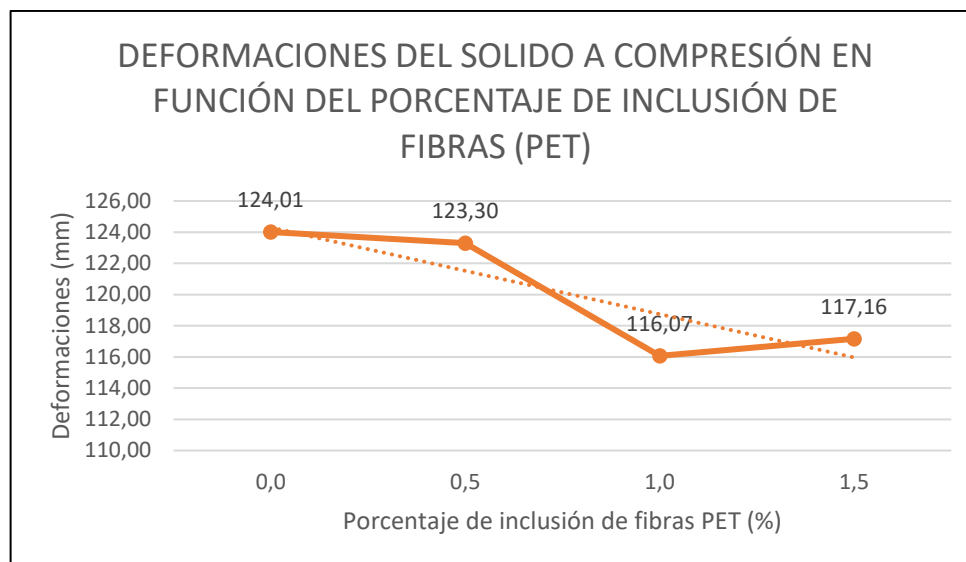
En la gráfica puede observarse la misma situación que en la figura anterior, con la diferencia de que en este caso se empleó una dosificación cuatro veces mayor. Aun así, los resultados vuelven a tener la misma naturaleza, siendo la fibra de 10 mm, la que presentó el mejor desempeño a flexión frente a las demás. De manera inversa las fibras de mayor longitud (75 mm), fueron las que peor se desempeñaron, dejando en evidencia la relación inversamente proporcional que existe entre la longitud de la fibra y la resistencia a la flexión de un mortero fibrorreforzado con fibras.

¹⁷⁴ Fuente propia.

- **Resultados de la simulación numérica**

Compresión

Figura 55. Deformaciones del sólido a compresión en función del porcentaje de inclusión de fibras PET.¹⁷⁵



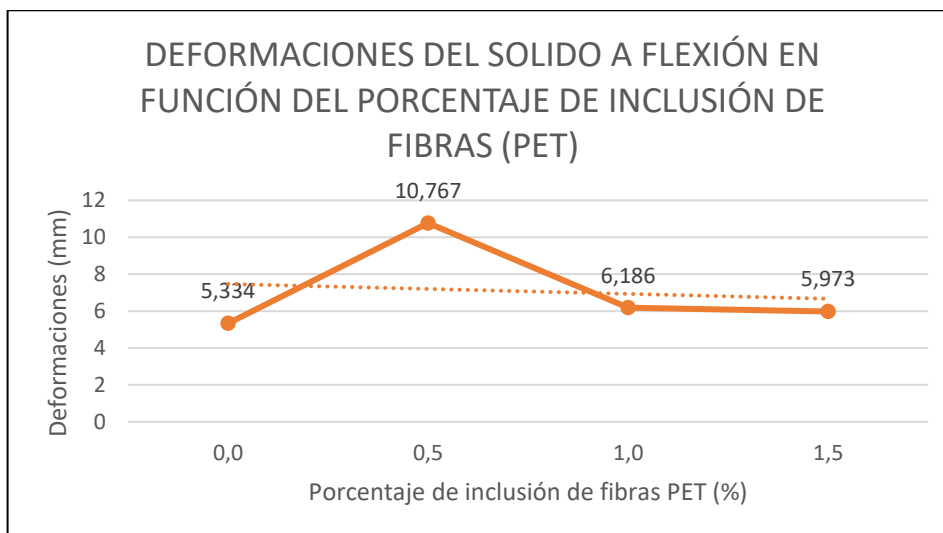
Fuente: Propia.

En la gráfica que representa los resultados de las deformaciones del sólido cuando se ve sometido a esfuerzos de compresión en función del porcentaje de inclusión en la matriz (mortero / fibra), se logra evidenciar la tendencia que presentan las deformaciones a disminuir, a medida que el porcentaje de fibras aumenta en el compuesto. Obteniéndose los mejores resultados para un 1.0% por ciento de adición de fibras a la matriz. Cabe destacar que para el porcentaje de inclusión de 1.5%, las deformaciones no disminuyeron como se esperaría en un comportamiento lineal descendente, que se observaba para los porcentajes de fibras de 0.5% y 1.0%, sino que sufre una ligera variación con tendencia al aumento, aun así el valor de deformación para un porcentaje de inclusión de 1.5%, se mantienen considerablemente por debajo de las deformaciones presentas por el sólido tipo patrón, es decir para un porcentaje de fibras PET de 0.0%.

¹⁷⁵ Fuente propia.

Flexión

Figura 56. Deformaciones del sólido a flexión en función del porcentaje de inclusión de fibras PET.¹⁷⁶



Fuente: Propia.

La representación de las deformaciones del sólido bajo trabajo de esfuerzos de flexión en función del porcentaje de adición de fibras, no presenta como en el caso de los sólidos sometidos a esfuerzos de compresión variaciones cercanas entre sí, en este caso puede observarse un abrupto cambio en la magnitud de la deformación para un porcentaje de inclusión de fibras en el compuesto de 0.5%, aun así, como lo muestra la línea punteada de la gráfica, la tendencia de las deformaciones busca disminuir a medida que el porcentaje de fibras aumenta. Es interesante observar cómo no necesariamente cualquier medida de fibras adicionadas a la matriz (mortero), aporta al buen desempeño del sólido, lo cual indica que es preciso conocer cuál es el porcentaje óptimo de componentes a integrar en la mezcla, para un comportamiento mecánico eficiente del elemento. Ya que como se observa puede llegar a ser contraproducente el adicionar arbitrariamente porcentajes de fibras a las mezclas, si no se conoce el efecto que tendrá a nivel mecánico la inclusión de las mismas.

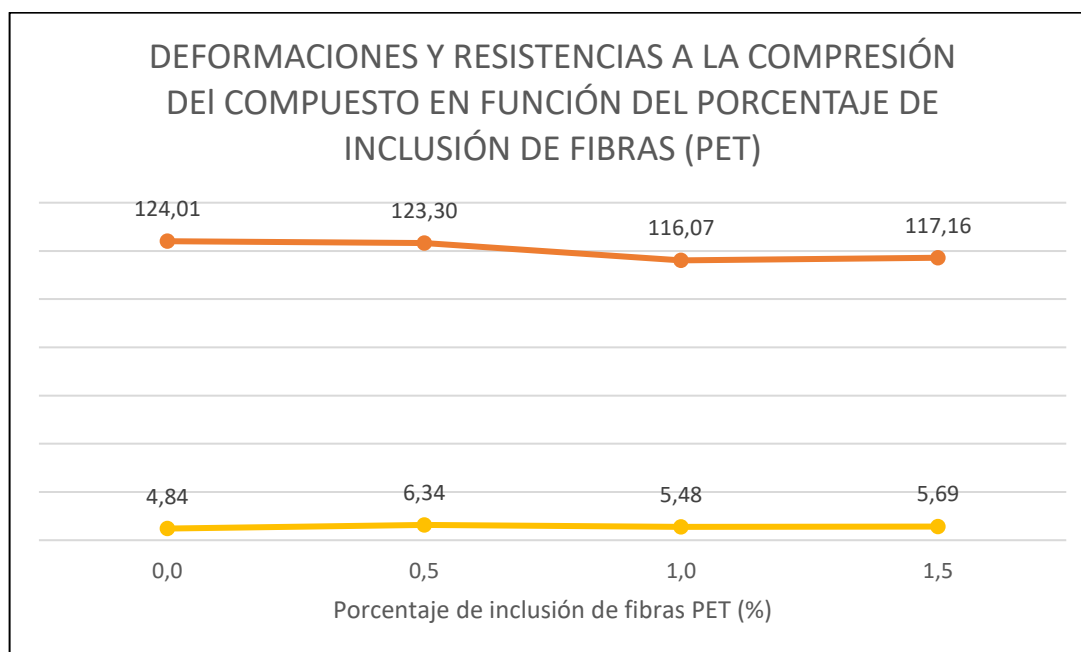
¹⁷⁶ Fuente propia.

- **Contraste de resultados**

Para obtener una estimación del comportamiento del sólido simulado respecto a los ensayos experimentales consultados en la etapa I del desarrollo metodológico, se tomó como base los datos obtenidos de la investigación “*PHYSICAL AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF RECYCLED PET FIBRE REINFORCED MORTAR*”, ya que evalúa el comportamiento a flexión y compresión de morteros adicionados con fibras de PET de manera experimental, en los mismos porcentajes de inclusión de fibras propuestos para el desarrollo del trabajo (0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%).

Compresión

Figura 57. Relación entre las deformaciones y la resistencia a la compresión del compuesto en función del porcentaje de incorporación de fibras PET.¹⁷⁷



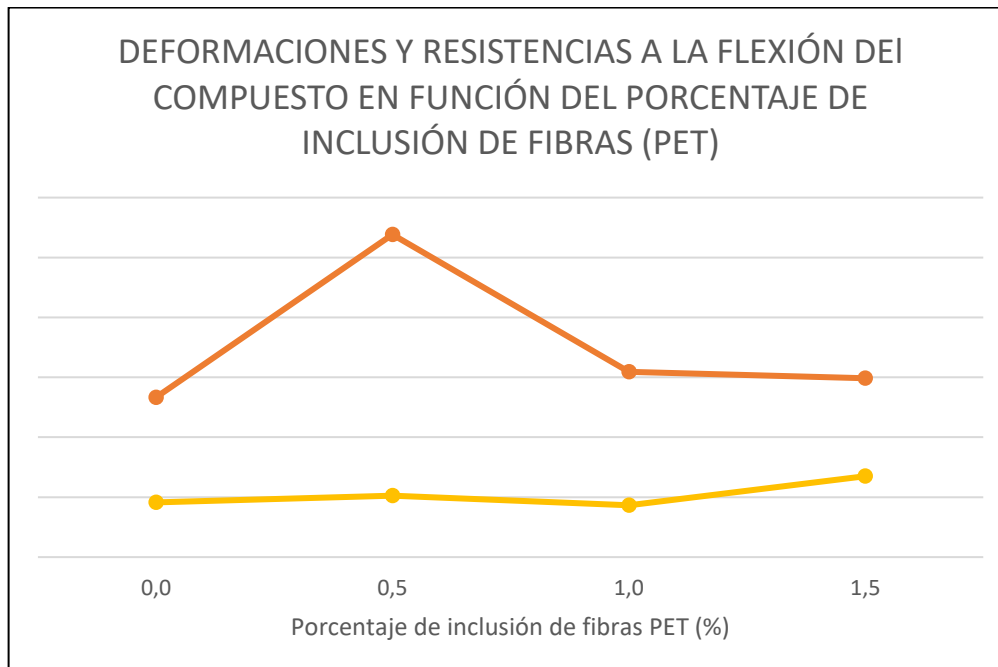
Fuente: Propia.

¹⁷⁷ Fuente propia.

En la gráfica se hace un contraste entre los resultados obtenidos de la investigación consultada, los cuales corresponden a la resistencia a la compresión de las probetas ensayadas a los 63 días de curado, respecto a las deformaciones aportadas por el sólido de la simulación numérica que se desempeñó bajo esfuerzos compresivos. En la figura se puede observar la relación inversamente proporcional entre las dos magnitudes a medida que el porcentaje de inclusión de fibras aumenta. Esto es, que la tendencia de la resistencia a la compresión del mortero fibrorreforzado es aumentar a medida que se incorpora ascendentemente porcentajes de PET, al mismo tiempo que las deformaciones sufridas por el sólido simulado disminuyen igualmente al adicionarle mayores porcentajes de fibras. Por lo cual existe congruencia entre ambos tipos de resultados.

Flexión

Figura 58. Relación entre las deformaciones y la resistencia a la flexión del compuesto en función del porcentaje de incorporación de fibras PET.¹⁷⁸



Fuente: Propia.

¹⁷⁸ Fuente propia.

De igual forma en la gráfica se presentan los resultados de las resistencias a la flexión de las probetas ensayadas a los 63 días de curado en la literatura consultada y las deformaciones arrojadas por el sólido simulado cuando está siendo sometido a esfuerzos de flexión. En el caso de las magnitudes de resistencia a flexión, se puede observar que lo que marca la tendencia es el aumento de la resistencia a la flexión a medida que se incrementa el porcentaje de fibras PET adicionadas a la mezcla, por otro lado las deformaciones sufridas por la simulación del sólido a flexión tienen un abrupto cambio respecto a la primera adición de 0.5% de fibras PET, lo que hace parecer que el comportamiento del mismo no es correcto, sin embargo al momento de integrarse un porcentaje de 1.0% y de 1.5% las deformaciones se reducen proporcionalmente. Esto indica que la simulación propuesta para representar el comportamiento a flexión del material compuesto (matriz / fibra) no es del todo la adecuada, aunque su desempeño para las inclusiones de 1.0% y 1.5% cumplen con el comportamiento esperado, siendo las deformaciones de este inversamente proporcional a las resistencia a la flexión de los resultados experimentales de las mismas cuantías de fibrorrefuerzo.

3.4. CONCLUSIONES

- Se consiguió obtener información confiable y representativa que ayudara en el adecuado modelamiento de la simulación numérica de un mortero fibrorreforzado con fibras PET y demás aspectos relevantes dentro de la investigación.
- La longitud de las fibras respecto al comportamiento mecánico de un mortero fibrorreforzado, independientemente de su proporción, repercute directamente sobre su desempeño mecánico, siendo las fibras cortas (10 – 25 mm) las más adecuadas para morteros que se ven enfrentados a la flexión y las largas (50 – 75 mm) las que mejor aporte brindan a la resistencia mecánica del mortero en compresión.
- En general se encontró que la tendencia de los mortero adicionados con una mayor dosificación de fibras de PET (1.5%), era la de presentar un mejor comportamiento mecánico independientemente si se trataba de flexión o compresión, frente a los morteros que no tenían incluidas fibras de PET en su composición o presentaban bajas cantidades (0.5%).
- En cuanto a la simulación numérica, se logró representar de manera acertada el comportamiento mecánico a flexión y compresión de morteros adicionados con fibras PET, esto respecto al contraste realizado entre ensayos experimentales y los modelos virtuales elaborados para la investigación.

3.5. RECOMENDACIONES

- En próximas investigaciones, cuando se simule la problemática estudiada, se aconseja emplear un modelo que permita determinar la incidencia de la longitud de las fibras sobre el compuesto y no solamente el aporte volumétrico del refuerzo (fibras) .
- De igual forma sería favorable implementar un modelo analítico que pueda tener en cuenta la forma geométrica de la fibra, es decir, si el cuerpo de la fibra posee algún tipo de deformación o si sus extremos presentan ganchos, lo que repercutiría directamente en la iteración entre matriz y componente.
- En cuanto a las condiciones de borde, se sugiere modelar los apoyos y artefactos de imposición de cargas según la normatividad que rige cada ensayo, con las dimensiones y materiales establecidos, dando mayor precisión al entorno virtual de la simulación.
- De igual manera se recomienda examinar las simulaciones por medio de análisis dinámicos, con lo cual se pueda establecer el momento de falla del elemento de una forma más acertada y cercana a la realidad de los ensayos de carácter experimental.

BIBLIOGRAFÍA

1. TORRES, Diego Alexander. Determinación de la resistencia residual promedio (análisis post- fisuración) del concreto reforzado con fibra sintética de pet+pp. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15338>
2. FERNANDEZ, María Esther. Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://riunet.upv.es/handle/10251/27551>
3. CERÓN CUEVAS, Ismael Antonio, Ismael Antonio MILAGUY GIL, Carlos Uriel. Estado del arte de la incidencia de los polímeros en el diseño de mezcla del concreto. Estudio a nivel mundial. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1572/1/Estudio_mundial_pol%c3%admeros.pdf
4. OVIEDO SANCHEZ, Khaterine; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. Mortero geopolimérico para uso potencial como recubrimiento en concreto. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/1243/1227>
5. MENDOZA, Carlos Javier; AIRE, Carlos y DÁVILA, Paula. Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112011000100003&script=sci_arttext&lng=pt#f3
6. ALESMAR Luis, RENDÓN, Nalia y KORODY María Eugenia. Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (pet) – cemento. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100006&lng=es&nrm=iso&lng=es
7. TÉLLEZ MALDONADO, Alejandra. La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://bdigital.unal.edu.co/7080/1/905077.2012.pdf>

8. PERDOMO M, Gilberto A. Plásticos y medio ambiente. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/abr/perdomo.pdf>
9. VELA REQUEJO, Luis Gustavo, YOVERA LEÓN, Rogger Ernesto. evaluación de las propiedades mecánicas del concreto adicionado con fibra de estopa de coco. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/uss/3167/VELA_REQUEJO_LUIS_GUSTAVO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
10. MUÑOZ ALVAREZ, Carolina Joseline. Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de vidrio. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/bmfcm971c/sources/bmfcm971c.pdf>
11. GÓMEZ, M. S.; CARVAJAL, A. M.; SANTELICES, V. Influencia del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) usado como adición en el mortero de cemento. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2011000300011&script=sci_arttext
12. ROBAYO, R.; MATTEY, P.; DELVASTO, S. Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y reforzado con fibras de acero. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2013000200011&script=sci_arttext
13. OSORIO SARAZ, Jairo Alexander; VARÓN ARISTIZABAL, Fredy y HERRERA MEJÍA, Jhonny Alexander. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49615322.pdf>
14. SERRANO, Tomas, *et al.* Morteros aligerados con cascarilla de arroz: diseño de mezclas y evaluación de propiedades. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49624958016.pdf>
15. PRADO, F.; GONZÁLEZ, M. Incidencia de la adición de fibras poliméricas para morteros sobre la resistencia a flexión y compresión de estucos de barro. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2012000300002&script=sci_arttext&lng=en

16. ALVAREZ CABRERA, Jorge L; URRUTIA, Francisco y LECUSAY, Deborah, FERNÁNDEZ, Adela. Morteros de albañilería con escombros de demolición. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/506/554>
17. ZETOLA VARGAS, V.; GARCÍA SANTOS, A. y NEILA GONZÁLEZ, F. J. Mortero de Cemento Portland con parafinas microencapsuladas. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2013000100008&script=sci_arttext
18. BERNAL, Susan; ESGUERRA, Johanna; GALINDO, Javier; MEJÍA DE G., Ruby. Morteros geopoliméricos reforzados con fibras de carbono basados en un sistema binario de un subproducto industrial. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://www.rlmm.org/archivos/S01/N2/RLMMArt-09S01N2-p587.pdf>
19. ARBELÁEZ ARCE, Anacusia. Morteros reforzados con fibras de bambú. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <HTTP://BDIGITAL.UNAL.EDU.CO/30049/1/28797-103428-1-PB.PDF>
20. F.PL;ERTAS,T.AMAT,T.VAZQI KZ. Comportamiento de morteros de cementos alcalinos reforzados con fibras acrílicas y de polipropileno. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/36045245.pdf>
21. PUERTAS, F.; GIL-MAROTO A., PALACIOS, M.; AMAT, T. Alkali-activated slag mortars reinforced with ar glassfibre performance and properties.. Comportamiento y propiedades. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/2502/1/puertas.pdf>
22. ENFEDAQUE DÍAZ, Alejandro. Resistencia a impacto de morteros de cemento reforzados con fibra de vidrio (GRC). [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://oa.upm.es/1338/1/ALEJANDRO_ENFEDAQUE_DIAZ.pdf

23. MUÑOZ CEBRIÁN, Fernando. Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento: influencia del porcentaje de fibra adicionado. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13552/PFG%20completo.pdf?squence=1&isAllowed=y>
24. MUÑETÓN SANTA, Guberney, *et al.* Brechas entre hábito y actitud en el consumo de bebidas empaçadas en PET, Medellín-Colombia. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/1548/1426>
25. VALENCIA CASTRO, Plinio Andrés y QUINTANA CRUZ, Cristian Darío. Análisis comparativo entre el concreto simple y el concreto con adición de fibra de acero al 12% y 14%. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/6378/5/Trabajo%20de%20grado%20Fibra%20de%20Acero.pdf>
26. HERNÁNDEZ MURCIA, Diego Fernando y LEÓN OTÁLORA, Diego Alfonso. Estudio de concreto adicionado con fibras de polipropileno o sintéticas al 2%. [en línea] Disponible vía internet: <URL: [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15016/1/Estudio-de-concreto-adicionado-con-fibras-de-polipropileno-o-sint%*c3*%*a9*ticas-al-2%25.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15016/1/Estudio-de-concreto-adicionado-con-fibras-de-polipropileno-o-sint%c3%a9ticas-al-2%25.pdf)
27. SALAMANCA CORREA, Rodrigo. La Tecnología de los morteros. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1353/1081>
28. American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318 R – 05). [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://books.google.es/books?id=oa8XnnvX6BgC&lpg=PA1&ots=36_QANu-kU&dq=aci%20318&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q=aci%20318&f=false
29. D. Gene Daniel and Colin L. Lobo. User's Guide to ASTM Specification C 94 on Ready-Mixed Concrete. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://www.academia.edu/download/41299140/Users_Guide_to_ASTM_Specification_C94_on_ReadyMixed_Concrete_ASTM_Manual_Astm_Manual_Series__Mnl_49.pdf

30. Ernest Bernat-Masoa y otros. Additioning alfa fibres in cement. [en línea] Disponible vía internet: <URL: mortarhttps://upcommons.upc.edu/handle/2117/122014
31. MUSTAFA, Maher al-tayeb y otros. Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation. [en línea] Disponible vía internet: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.008
32. SUN, Xinjian y otros. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete. [en línea] Disponible vía internet: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.018
33. PODESTÁ, Juan Manuel. Simulación del comportamiento microestructural del hormigón simple aplicando técnicas de homogenización. . [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://ing.unne.edu.ar/mecap/Investigacion/Tesis/TesinaPodesta.pdf
34. OLLER, Sergio. Simulación numérica del comportamiento mecánico de los materiales compuesto. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.scipedia.com/wd/images/9/90/Draft_Samper_578209959_9447_M74-BUENO.pdf
35. MÁRMOL SALAZAR, patricia. Hormigones con fibras de acero características mecánicas. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://oa.upm.es/4510/1/TESIS_MASTER_PATRICIA_CRISTINA_MARMOL_SALAZAR.pdf
36. MARTÍNEZ, Xavier; OLLER, Sergio; RASTELLINI, Fernando. Análisis no – lineal de materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie – paralelo. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.researchgate.net/publication/299221412_Analisis_no-lineal_de_materiales_compuestos_mediante_la_teoría_de_mezclas_serie-paralelo
37. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA. Ecuaciones constitutivas elasticidad y plasticidad. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250131/2012/Elasticitat-Plasticitat.pdf

38. MARTÍNEZ BUSTAMANTE, Margarita Del Roció; PATIÑO ZARATE, Diego Benigno. Simulación por ordenador mediante el método de elemento finitos y optimización por el método de ingeniería robusta, de conectores para estantería metálica. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7767/1/UPS-CT004623.pdf>
39. HERRERA, Lina Andrea. Modelación numérica del concreto simple con elementos finitos usando un modelo constitutivo de daño. [en línea] Disponible vía internet: <URL: <https://bdigital.unal.edu.co/4118/1/294478.2011.pdf>
40. PEREIRA DE OLIVEIRA, Luiz A; CASTRO-GOMES, João P. PHYSICAL AND Mechanical behaviour of recycled pet fibre reinforced mortar. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.researchgate.net/profile/Luiz_Pereira_de_Oliveira/publication/229129172_Physical_and_mechanical_behaviour_of_recycled_PET_fibre_reinforced_mortar/links/5b20efc00f7e9b0e373f9b34/Physical-and-mechanical-behaviour-of-recycled-PET-fibre-reinforced-mortar.pdf
41. BERNAT-MASOA, Ernest y otros. Additioning alfa fibres in cement mortar. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/122014/RDLC_1117_Bernat-Masoa_2018_SM.pdf
42. MACHOVIÈ, Vladimír y otros. Effect of aging of pet fibre on the mechanical properties of pet fibre reinforced cement composite. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.irsm.cas.cz/materialy/cs_content/2008/Machovic_CS_2008_0001.pdf
43. SOUFIANE BENOSMAN, Ahmed y otros. Studies on chemical resistance of pet-mortar composites: microstructure and phase composition changes. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.scirp.org/html/6-8101883_30524.htm
44. RAHMAN, M.M; MAHI, M.A; CHOWDHURY, T.U. Utilization of waste pet bottles as aggregate in masonry mortar. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.researchgate.net/profile/Md_Tanvir_Uddin_Chowdhury/p

ublication/259646892_Utilization_of_waste_PET_bottles_as_aggregate_in_masonry_mortar/links/0046352d160411bb64000000/Utilization-of-waste-PET-bottles-as-aggregate-in-masonry-mortar.pdf

45. HABIB, Ahsan; BEGUM, Razia y MYDUL ALAM, Mohammad. Mechanical properties of synthetic fibers reinforced mortars. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.researchgate.net/profile/Mohammad_Alam25/publication/235936125_Mechanical_Properties_of_Synthetic_Fibers_Reinforced_Mortars/links/02e7e52311252a5ce1000000/Mechanical-Properties-of-Synthetic-Fibers-Reinforced-Mortars.pdf
46. GONZÁLEZ PEÑA , Rolando y otros. Medición del módulo de Young en morteros y vigas de hormigón utilizando la técnica Espí o tv holográfica. [en línea] Disponible vía internet: <URL: https://www.researchgate.net/profile/Luis_Marti_Lopez/publication/329043783_MEDICION_DEL_MODULO_DE_YOUNG_EN_MORTEROS_Y_VIGAS_DE_HORMIGON_UTILIZANDO_LA_TECNICA_ESPI_O_TV_HOLOGRAFICA/links/5bf2f19f92851c6b27cad269/MEDICION-DEL-MODULO-DE-YOUNG-EN-MORTEROS-Y-VIGAS-DE-HORMIGON-UTILIZANDO-LA-TECNICA-ESPI-O-TV-HOLOGRAFICA.pdf
47. GRIMALDI PASTORIL, Rocío; ALCALÁ FAZIO, Enrique. Modelos de elementos finitos de componentes de autobuses fabricados en materiales compuestos. [en línea] Disponible vía internet: <URL: http://oa.upm.es/7798/1/INVE_MEM_2010_79158.pdf

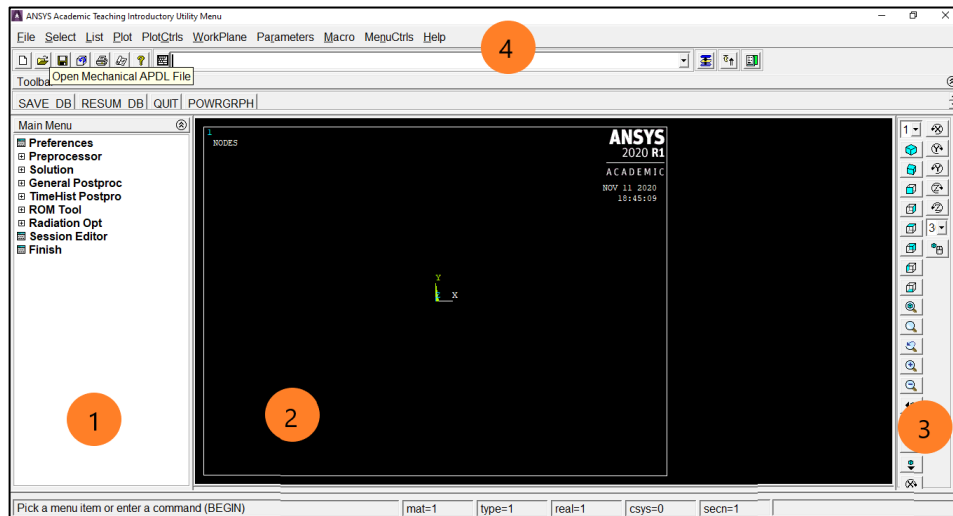
ANEXO 1

PROCESO DE MODELADO Y SIMULACIÓN

A continuación se presenta el desarrollo del proceso de modelamiento y simulación numérica de morteros hidráulicos adicionados con fibras tipo PET (tereftalato de polietileno), mediante el software comercial de análisis de materiales ANSYS. La simulación fue llevada a cabo en la versión MECHANICAL APDL 2020 R1, ya que representa la mejor opción al momento de determinar las características mecánicas de los sólidos estudiados.

- **Interfaz gráfica:**

Figura 59. Interfaz gráfica ANSYS MECHANICAL APDL 2020 R1.¹⁷⁹



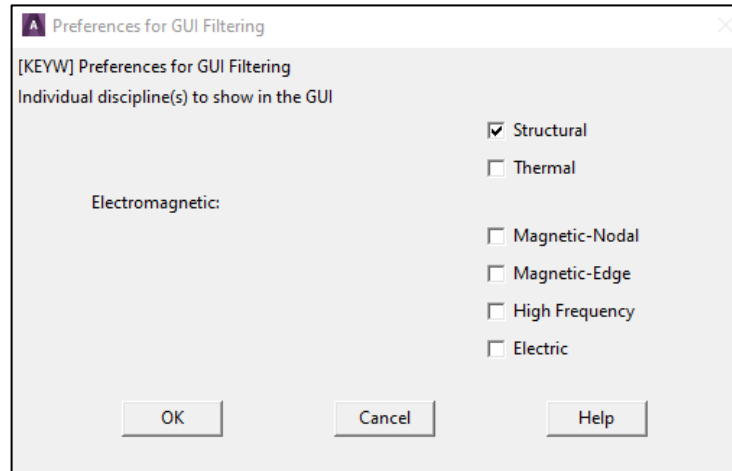
Fuente: Propia.

- 1: Menú principal.
- 2: Área de modelación.
- 3: Herramientas de navegación para el área de modelación.
- 4: Barra de herramientas.

¹⁷⁹ Fuente propia.

- **Selección de la disciplina a emplear:**

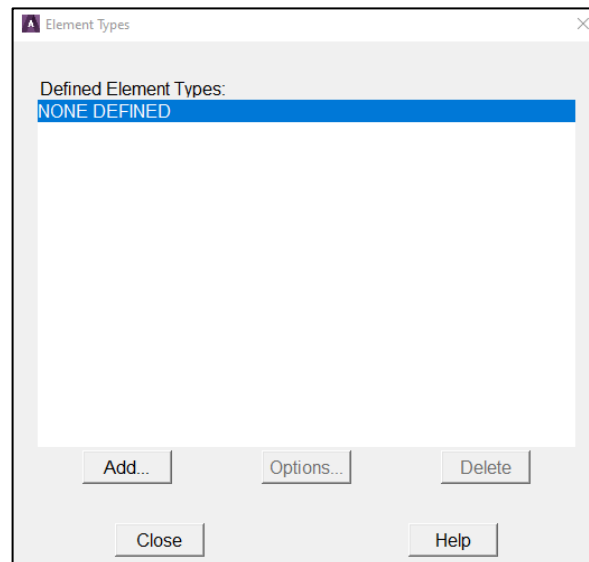
Figura 60. Disciplinas para el análisis de los materiales.¹⁸⁰



Fuente: Propia.

- **Agregar el tipo de elemento:**

Figura 61. Tipo de elemento a emplear en el análisis.¹⁸¹

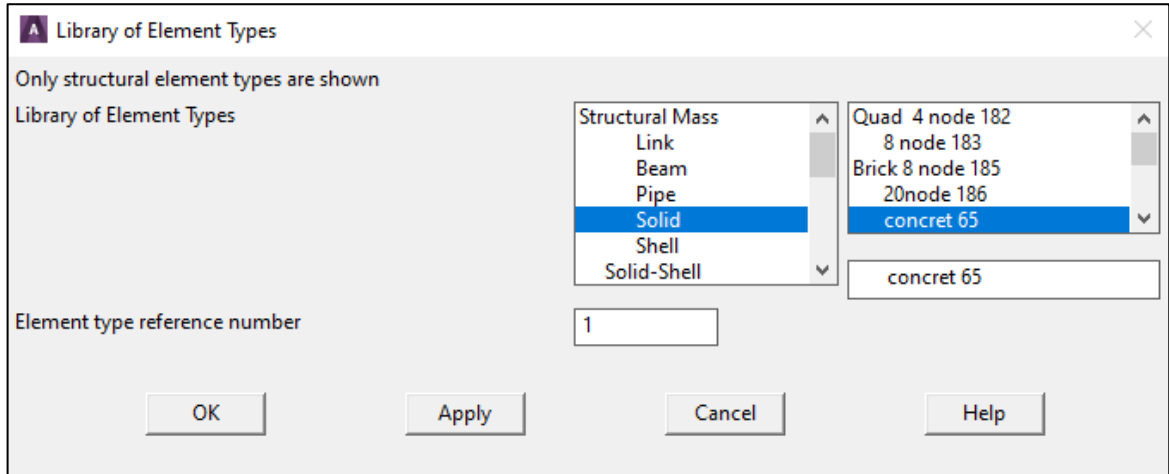


Fuente: Propia.

¹⁸⁰ Fuente propia.

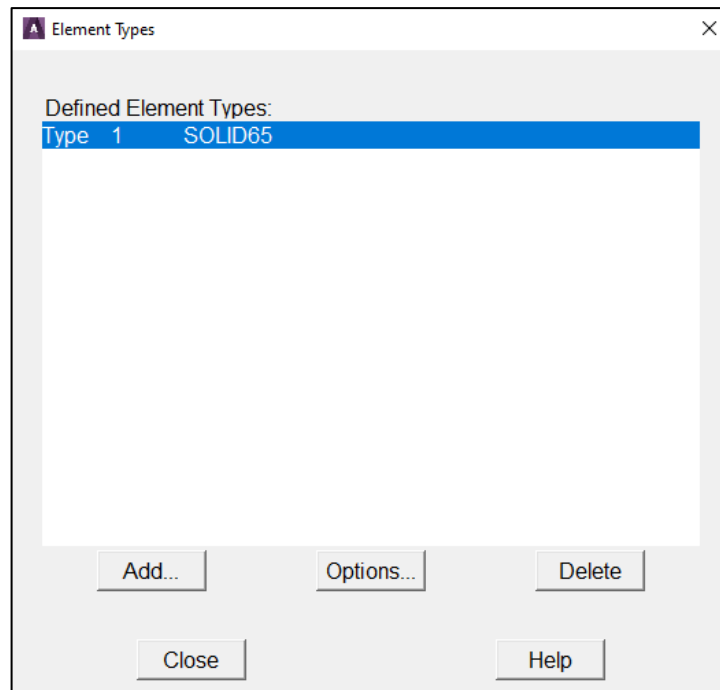
¹⁸¹ Fuente propia.

Figura 62. Selección del elemento SOLID65 (a).¹⁸²



Fuente: Propia.

Figura 63. Selección del elemento SOLID65 (b).¹⁸³



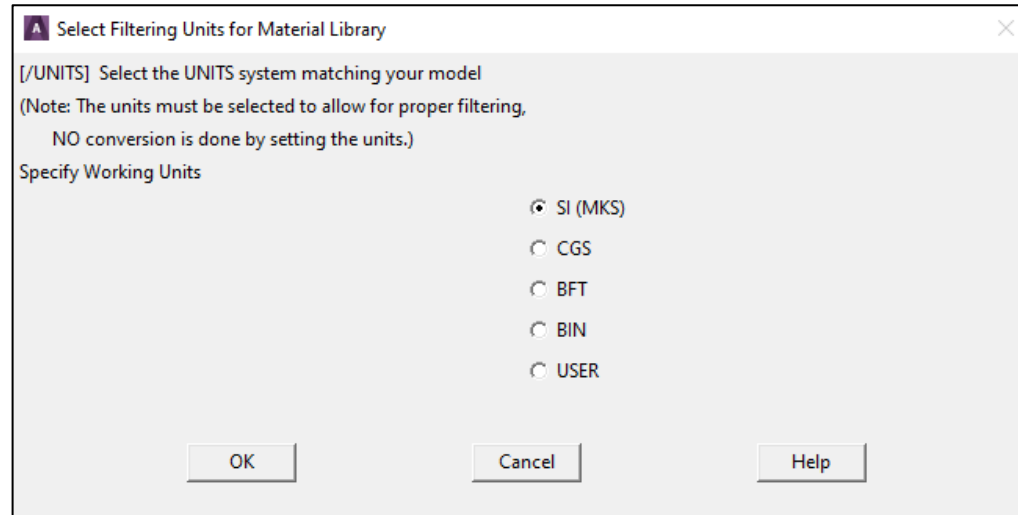
Fuente: Propia.

¹⁸² Fuente propia.

¹⁸³ Fuente propia.

- **Selección del sistema de unidades:**

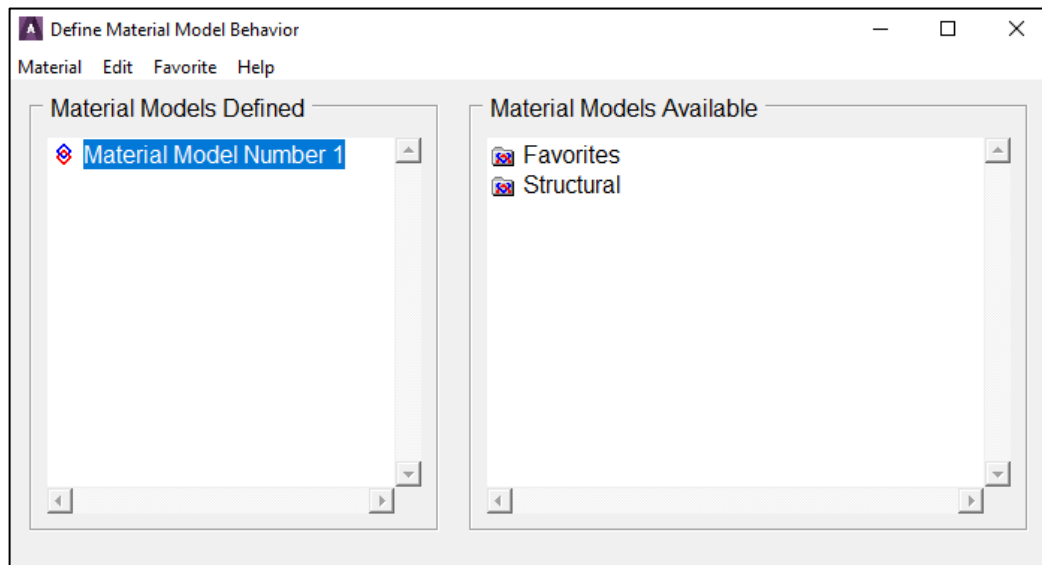
Figura 64. Selección del sistema de unidades.¹⁸⁴



Fuente: Propia.

- **Definición de los modelos para el comportamiento de los materiales:**

Figura 65. Selección de modelos.¹⁸⁵



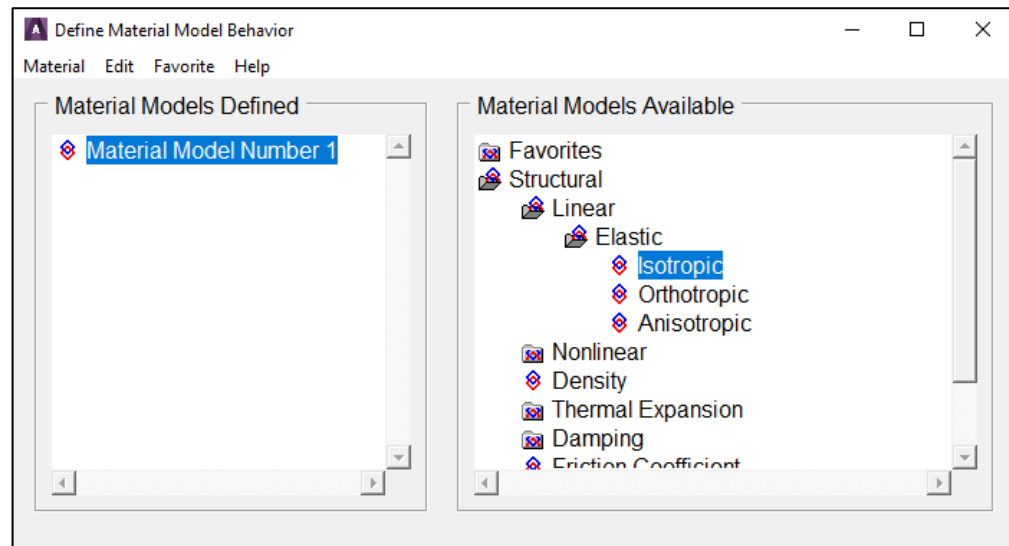
Fuente: Propia.

¹⁸⁴ Fuente propia.

¹⁸⁵ Fuente propia.

- Selección del modelo de comportamiento para la matriz (mortero):

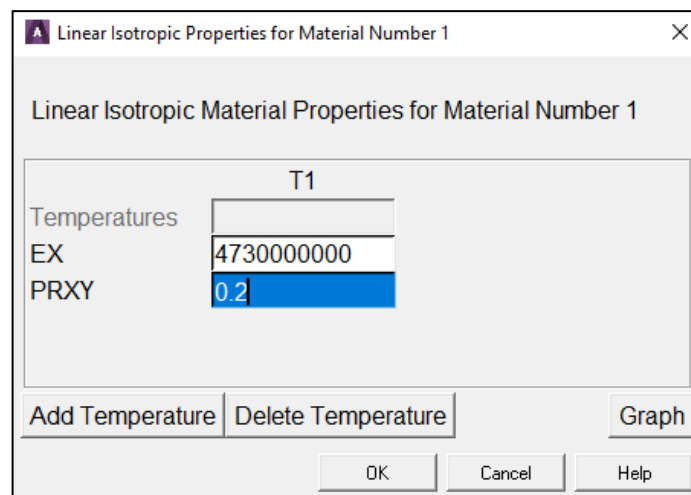
Figura 66. Selección del modelo de comportamiento para el mortero.¹⁸⁶



Fuente: Propia.

- Definición de las características intrínsecas de la matriz (mortero):

Figura 67. Definición características intrínsecas de la matriz – Módulo de elasticidad y módulo de Poisson.¹⁸⁷

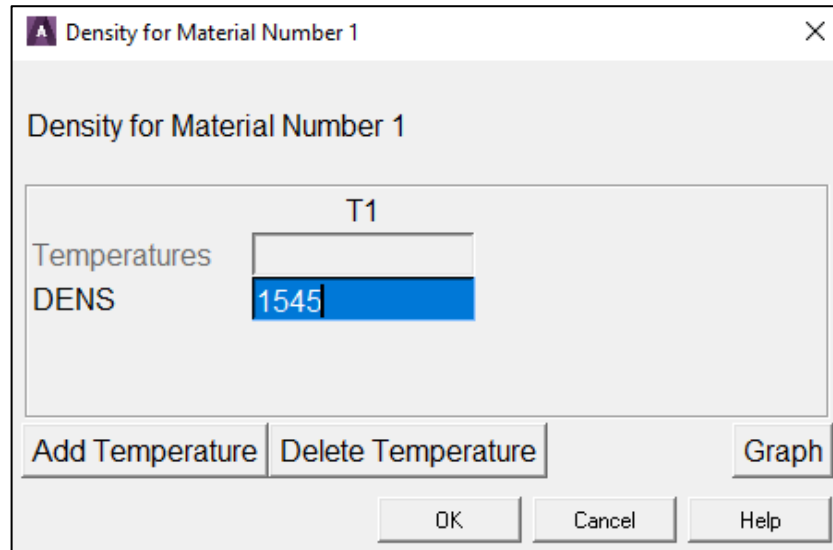


Fuente: Propia.

¹⁸⁶ Fuente propia.

¹⁸⁷ Fuente propia.

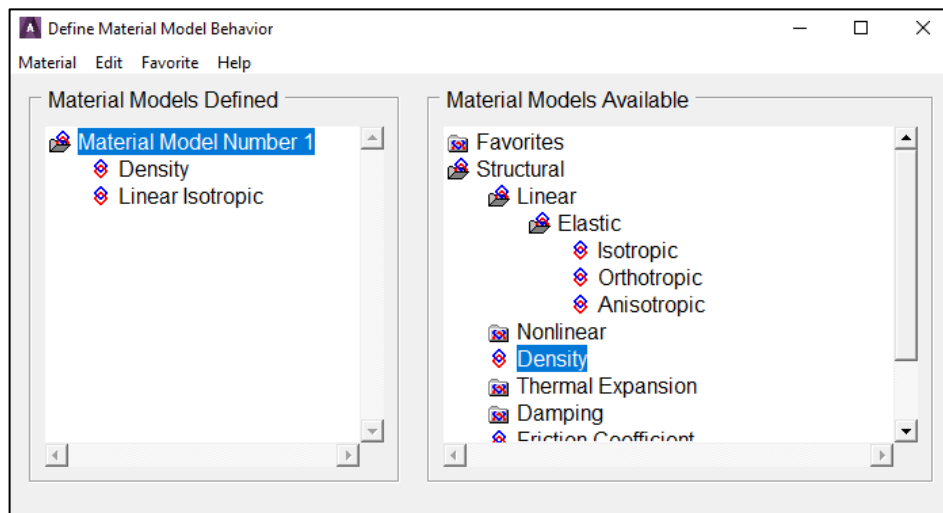
Figura 68. Definición características intrínsecas de la matriz – densidad.¹⁸⁸



Fuente: Propia.

- **Resumen de propiedades para la simulación de elementos (patrón):**

Figura 69. Propiedades para la simulación de elementos (patrón).¹⁸⁹



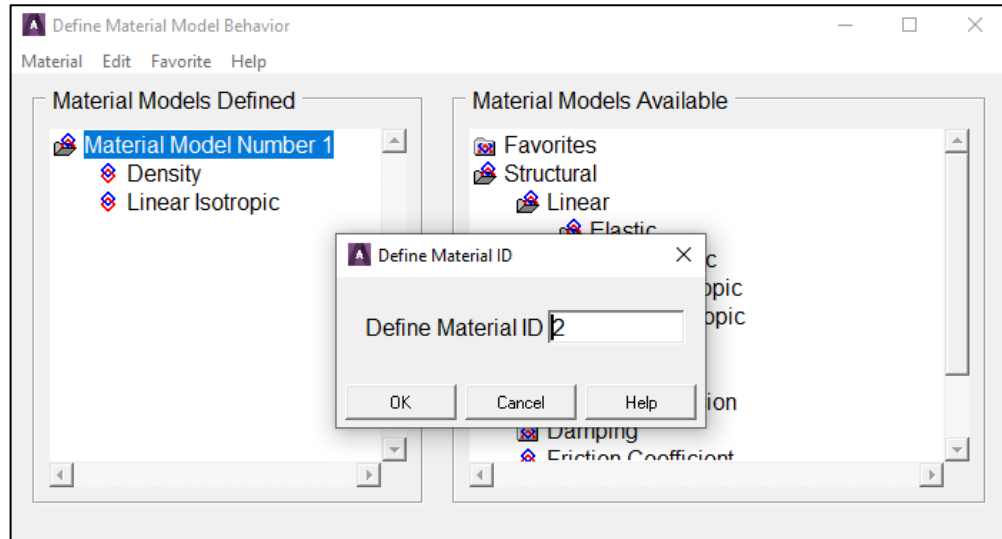
Fuente: Propia.

¹⁸⁸ Fuente propia.

¹⁸⁹ Fuente propia.

- **Adición del modelo de comportamiento para la inclusión (fibra):**

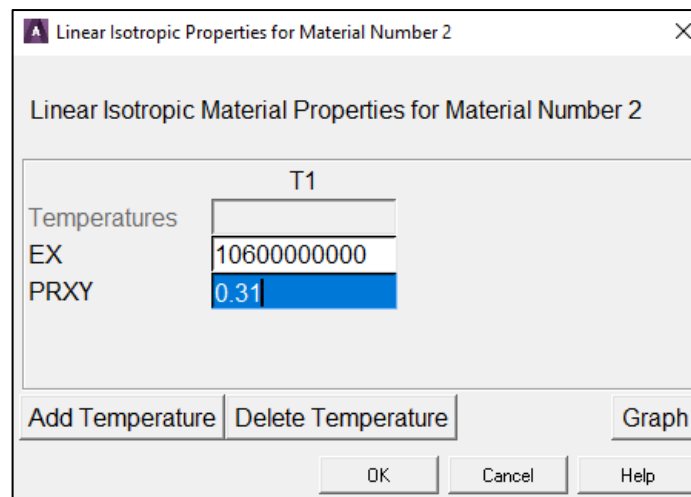
Figura 70. Adición del modelo de comportamiento para la inclusión.¹⁹⁰



Fuente: Propia.

- **Definición de las características intrínsecas de la inclusión (fibra):**

Figura 71. Definición características intrínsecas de la inclusión – Módulo de elasticidad y módulo de Poisson.¹⁹¹

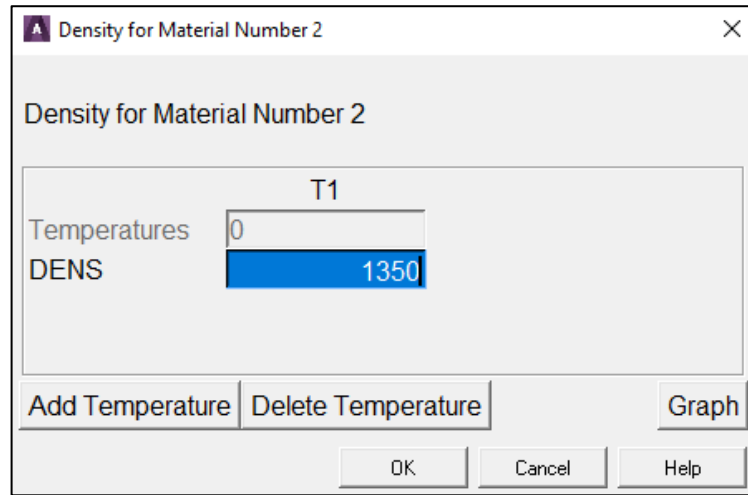


Fuente: Propia.

¹⁹⁰ Fuente propia.

¹⁹¹ Fuente propia.

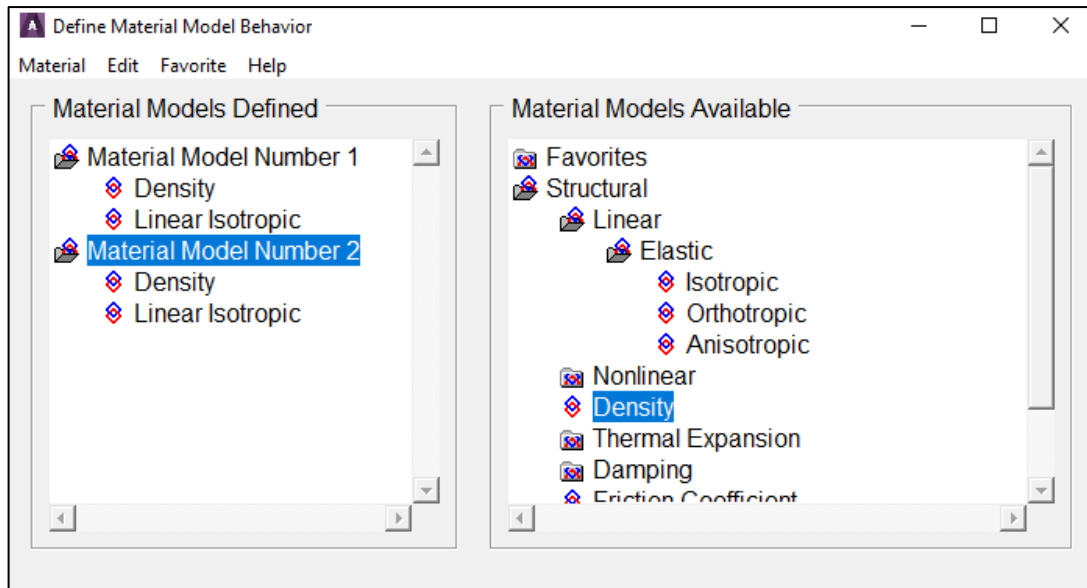
Figura 72. Definición características intrínsecas de la inclusión – densidad.¹⁹²



Fuente: Propia.

- **Resumen de propiedades para la simulación de elementos (patrón):**

Figura 73. Propiedades para la simulación de elementos (patrón).¹⁹³



Fuente: Propia.

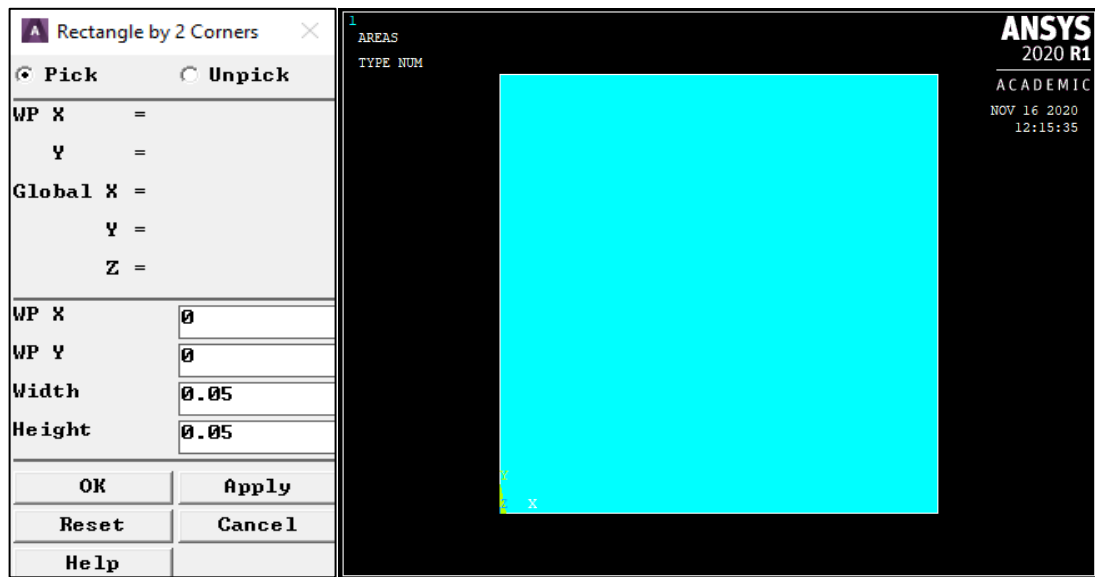
¹⁹² Fuente propia.

¹⁹³ Fuente propia.

Comportamiento mecánico a compresión

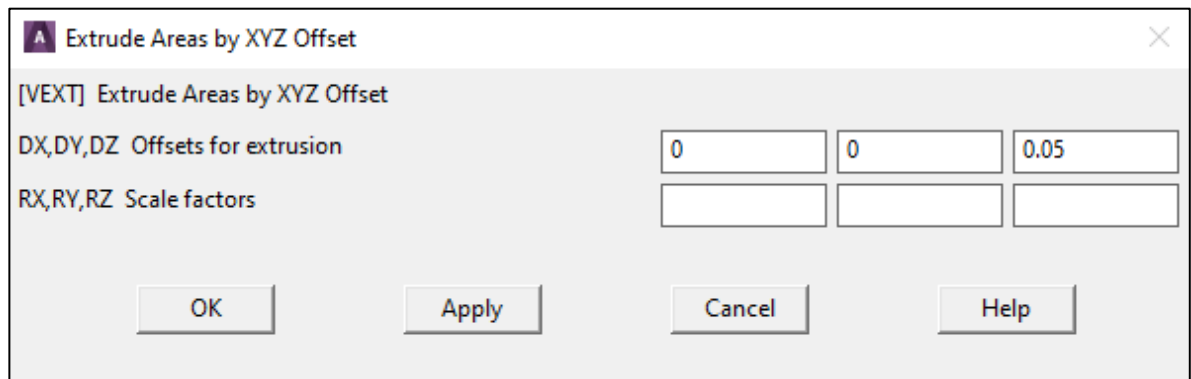
- Definición de la geometría del sólido:

Figura 74. Herramienta de dibujo de área rectangular.¹⁹⁴



Fuente: Propia.

Figura 75. Herramienta de dibujo de extracción de áreas.¹⁹⁵

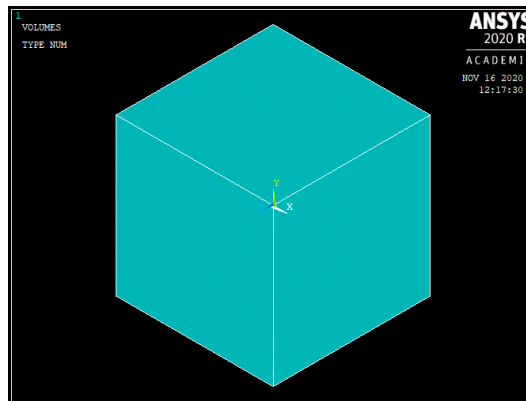


Fuente: Propia.

¹⁹⁴ Fuente propia.

¹⁹⁵ Fuente propia.

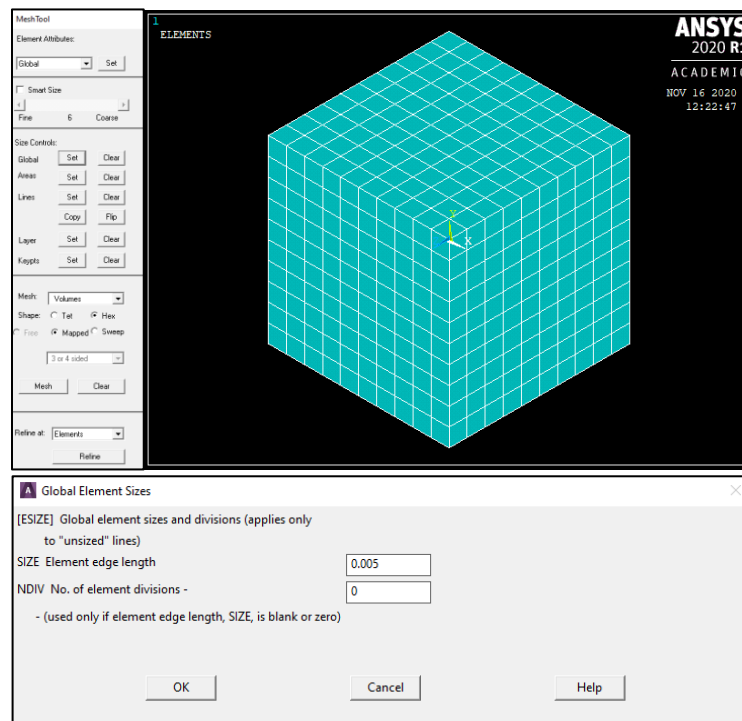
Figura 76. Geometría final del sólido para desempeño freten a esfuerzos de compresión.¹⁹⁶



Fuente: Propia.

- **Proceso de mallado del solido:**

Figura 77. Proceso de mallado hexaédrico para la geometría del sólido.¹⁹⁷



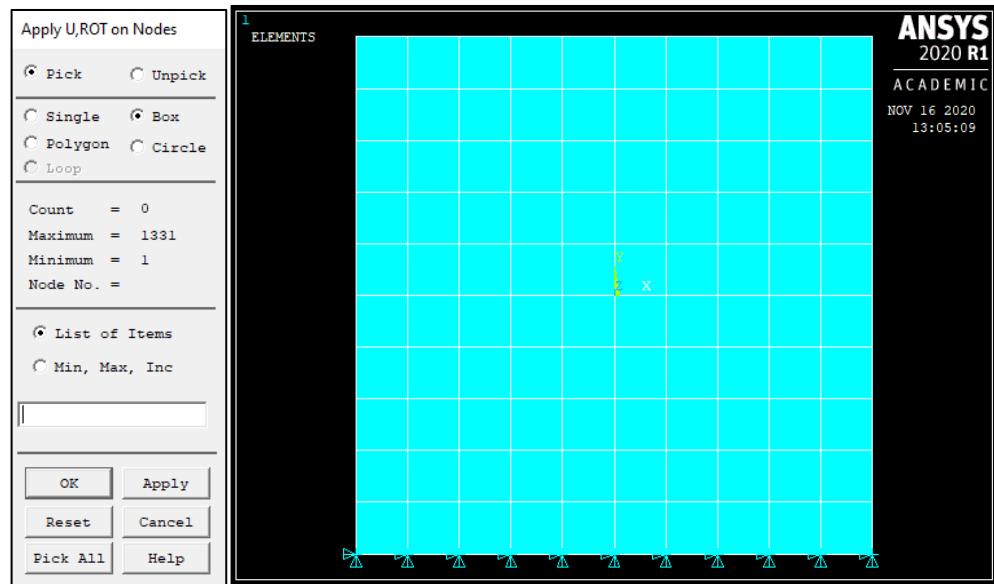
Fuente: Propia.

¹⁹⁶ Fuente propia.

¹⁹⁷ Fuente propia.

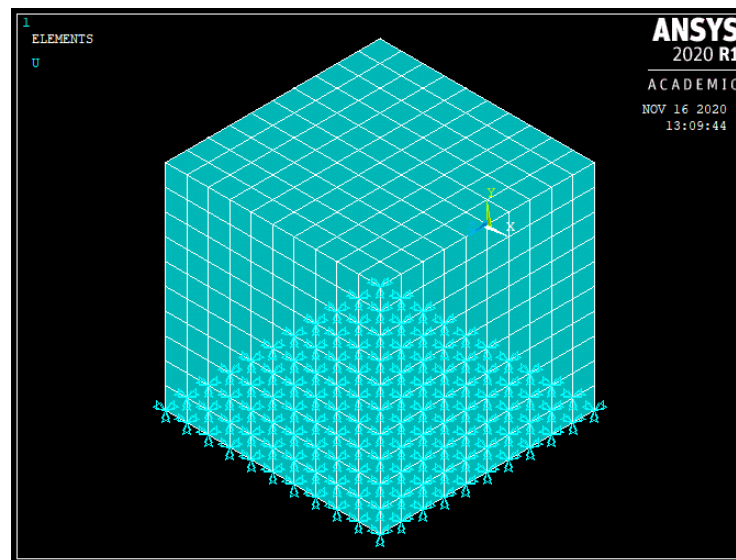
- **Asignación de restricciones en la base de la geometría (condiciones de borde):**

Figura 78. Asignación de restricciones al desplazamiento (a).¹⁹⁸



Fuente: Propia.

Figura 79. Asignación de restricciones al desplazamiento (b).¹⁹⁹



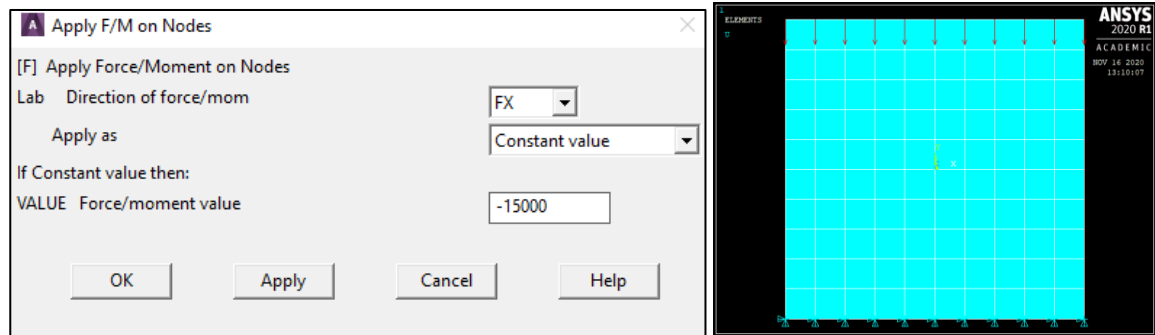
Fuente: Propia.

¹⁹⁸ Fuente propia.

¹⁹⁹ Fuente propia.

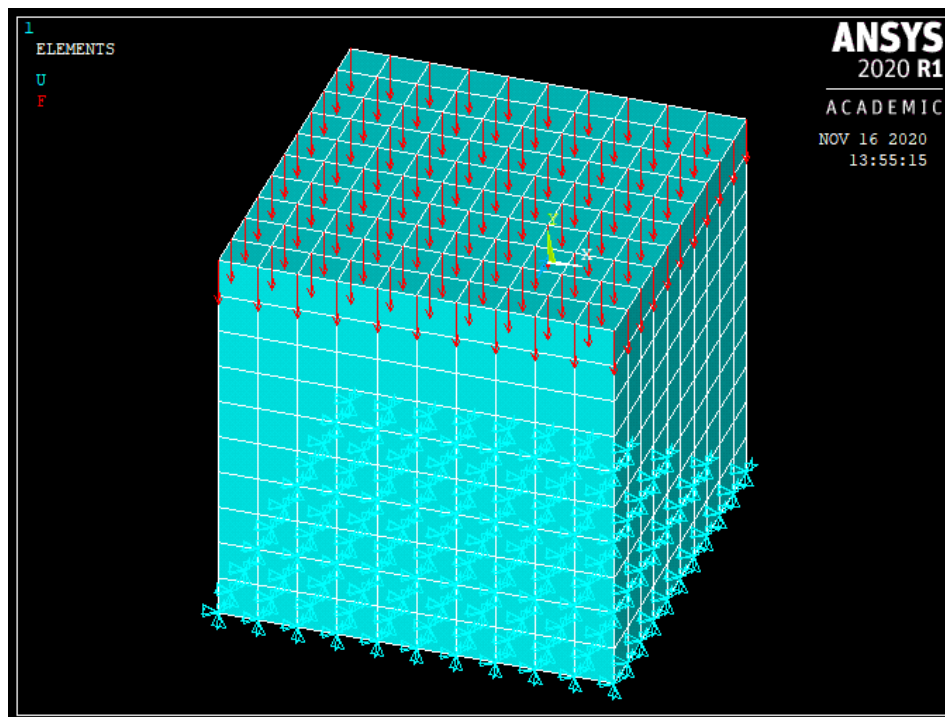
- Asignación de esfuerzos de compresión en la partes superior de la geometría (condiciones de borde):

Figura 80. Asignación de esfuerzos de compresión (a).²⁰⁰



Fuente: Propia.

Figura 81. Asignación de esfuerzos de compresión (b).²⁰¹



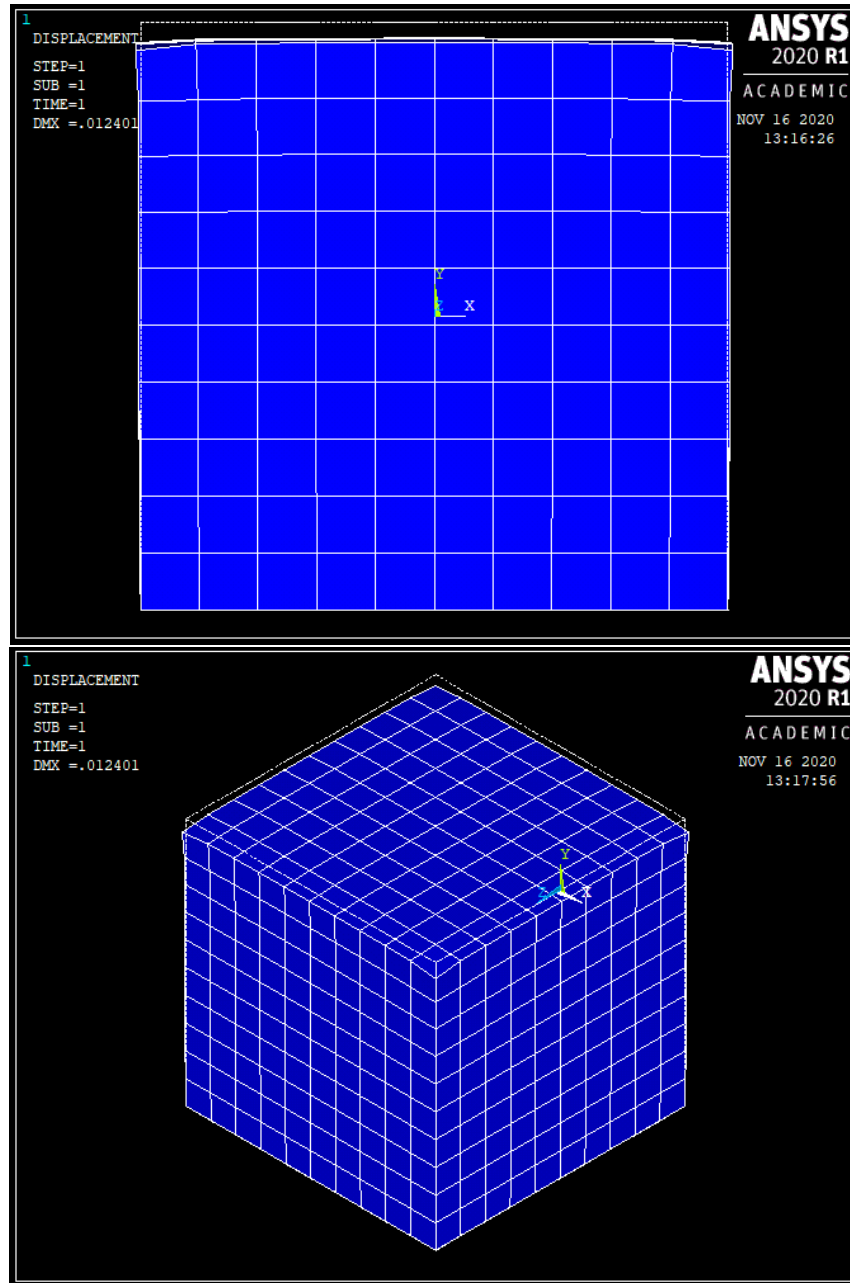
Fuente: Propia.

²⁰⁰ Fuente propia.

²⁰¹ Fuente propia.

- Visualización de las deformaciones sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 0.0% de inclusión):

Figura 82. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.²⁰²

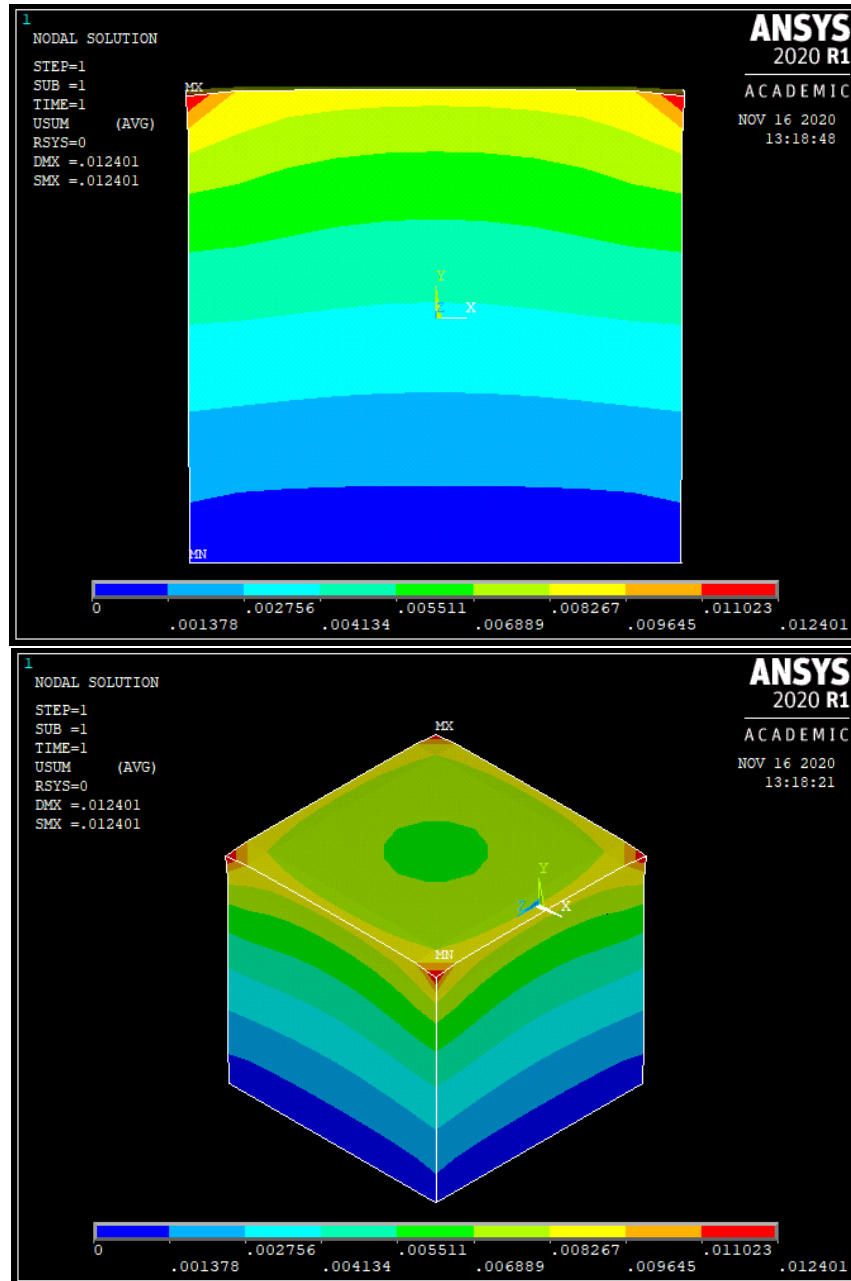


Fuente: Propia.

²⁰² Fuente propia.

- Deformaciones máximas sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 0.0% de inclusión):

Figura 83. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.²⁰³

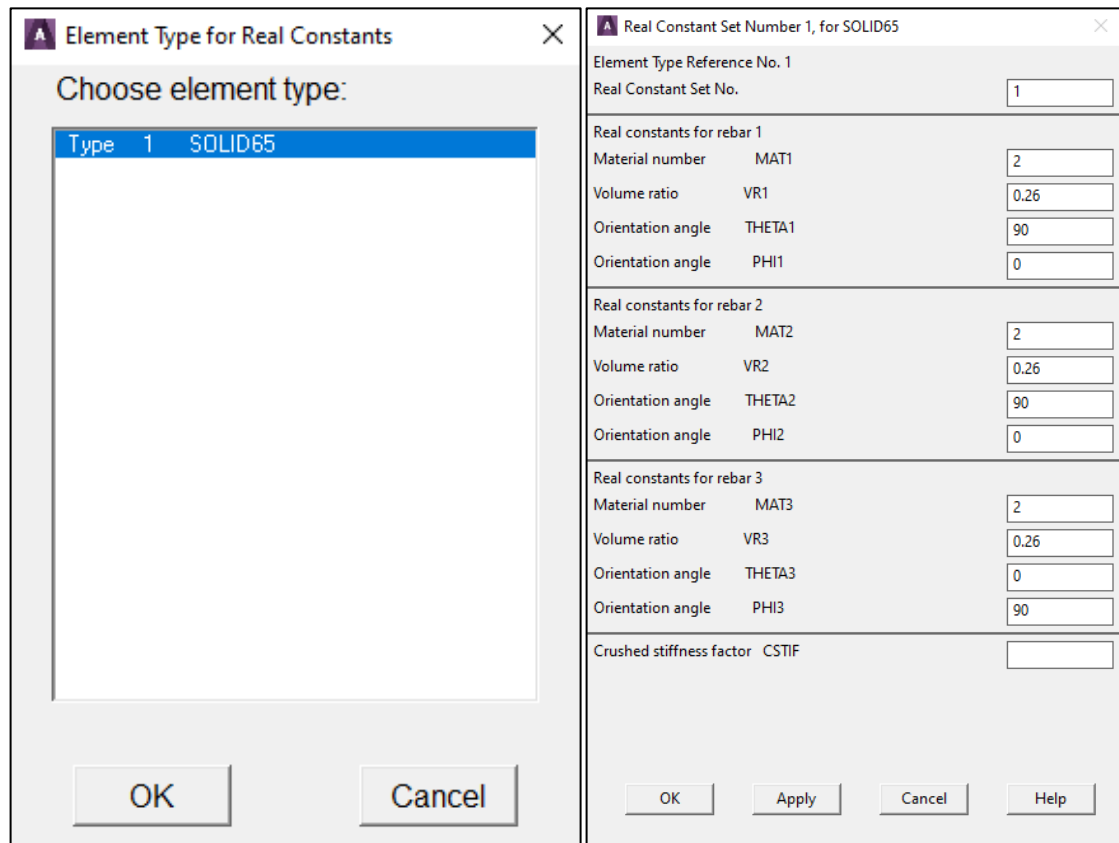


Fuente: Propia.

²⁰³ Fuente propia.

- **Proceso de inclusión de fibras en el compuesto por medio de la cuantía de refuerzo equivalente en las constantes de SOLID65 – para 0.5% de inclusión:**

Figura 84. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -0.5%).²⁰⁴

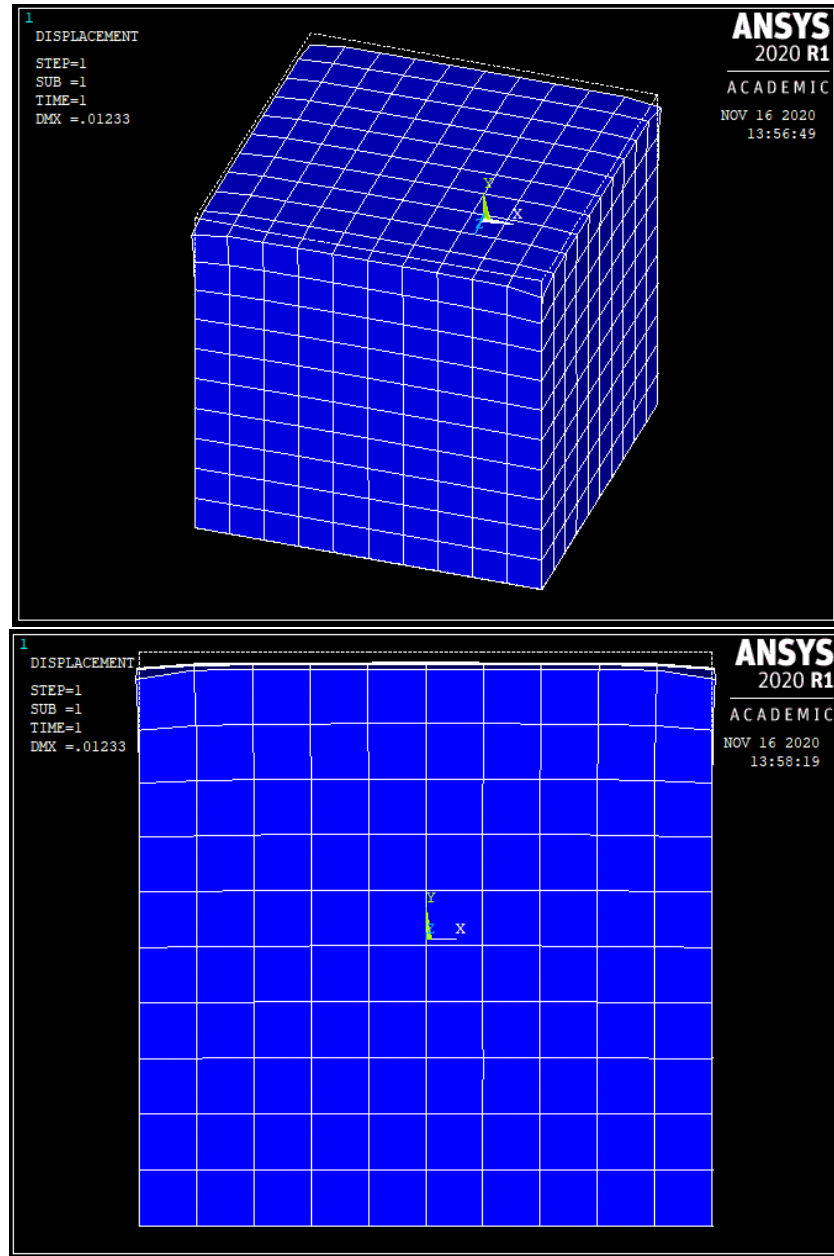


Fuente: Propia.

²⁰⁴ Fuente propia.

- Visualización de las deformaciones sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 0.5% de inclusión):

Figura 85. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.²⁰⁵

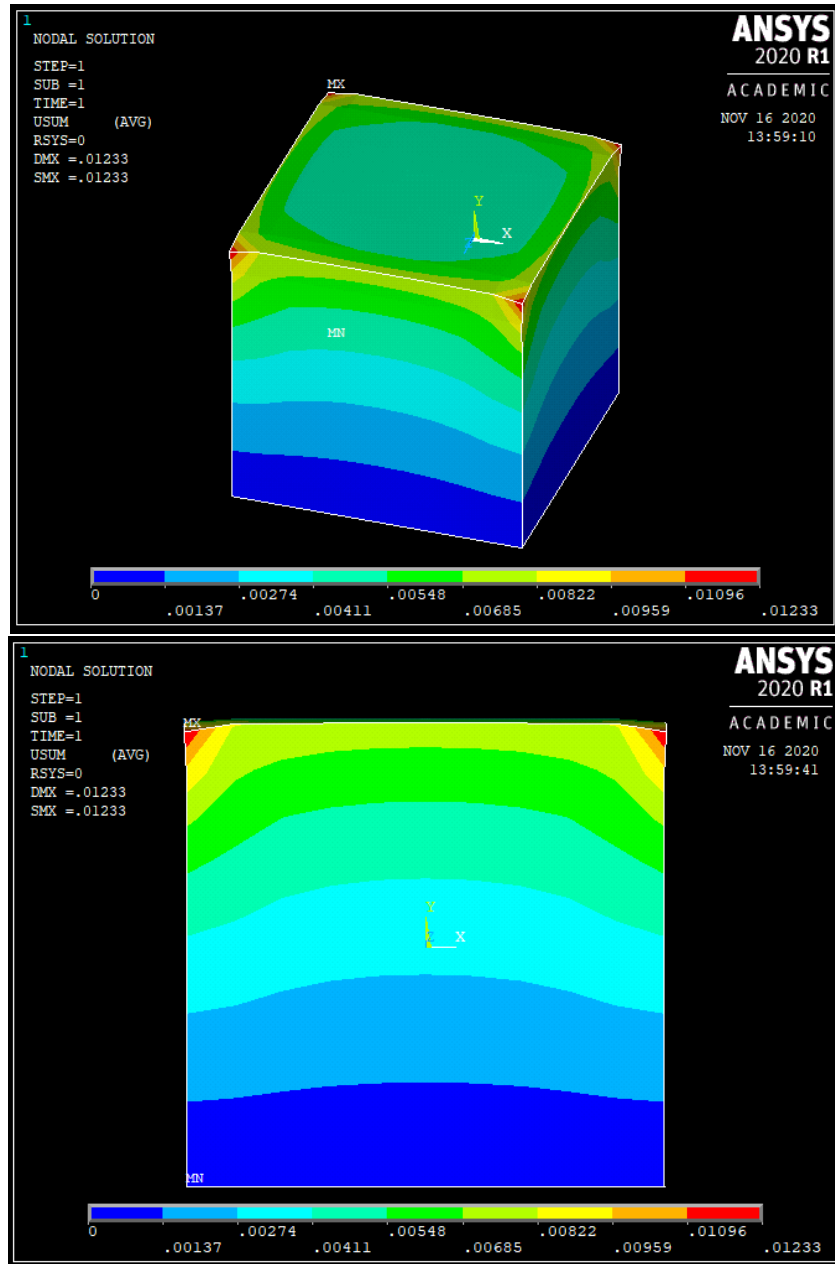


Fuente: Propia.

²⁰⁵ Fuente propia.

- Deformaciones máximas sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 0.5% de inclusión):

Figura 86. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.5% de inclusión.²⁰⁶



Fuente: Propia.

²⁰⁶ Fuente propia.

- **Proceso de inclusión de fibras en el compuesto por medio de la cuantía de refuerzo equivalente en las constantes de SOLID65 – para 1.0% de inclusión:**

Figura 87. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -1.0%).²⁰⁷

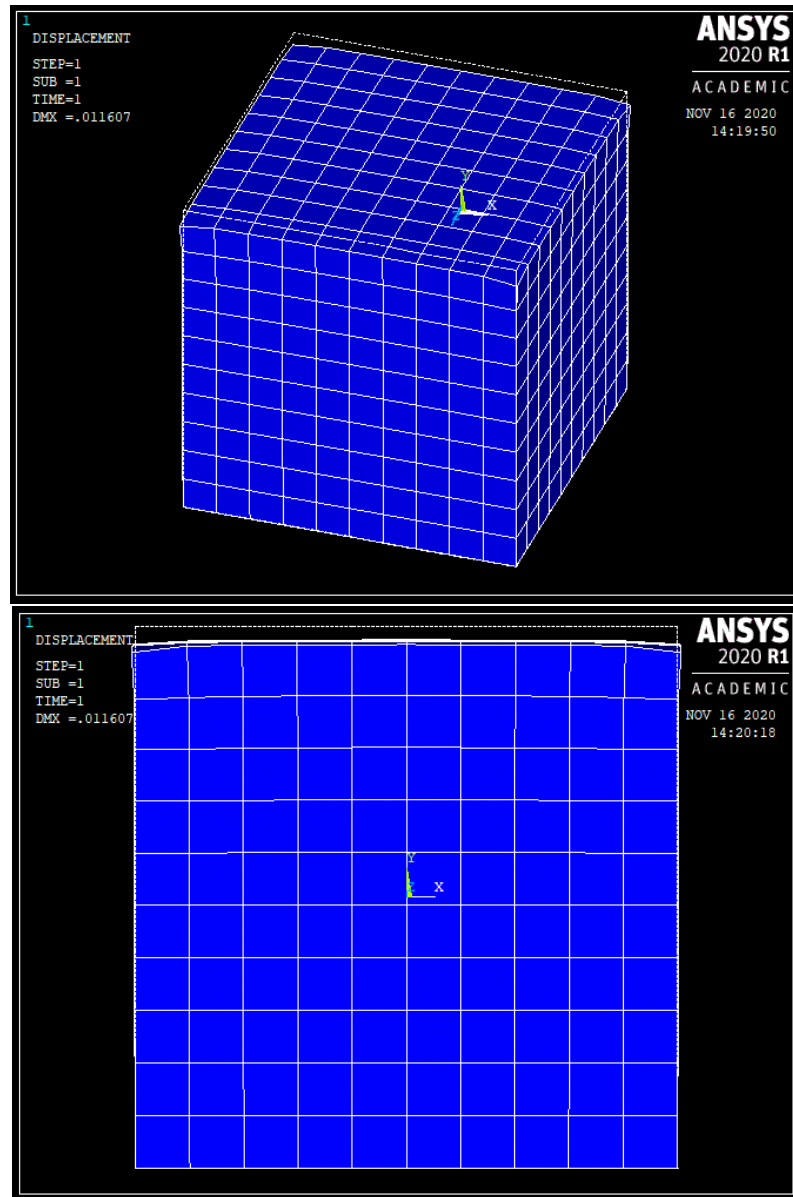
Real Constant Set Number 1, for SOLID65		
Element Type Reference No. 1		
Real Constant Set No.		1
Real constants for rebar 1		
Material number	MAT1	2
Volume ratio	VR1	0.10
Orientation angle	THETA1	90
Orientation angle	PHI1	0
Real constants for rebar 2		
Material number	MAT2	2
Volume ratio	VR2	0.10
Orientation angle	THETA2	90
Orientation angle	PHI2	0
Real constants for rebar 3		
Material number	MAT3	2
Volume ratio	VR3	0.10
Orientation angle	THETA3	0
Orientation angle	PHI3	0
Crushed stiffness factor	CSTIF	0
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/>		

Fuente: Propia.

²⁰⁷ Fuente propia.

- Visualización de las deformaciones sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 1.0% de inclusión):

Figura 88. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 1.0% de inclusión.²⁰⁸

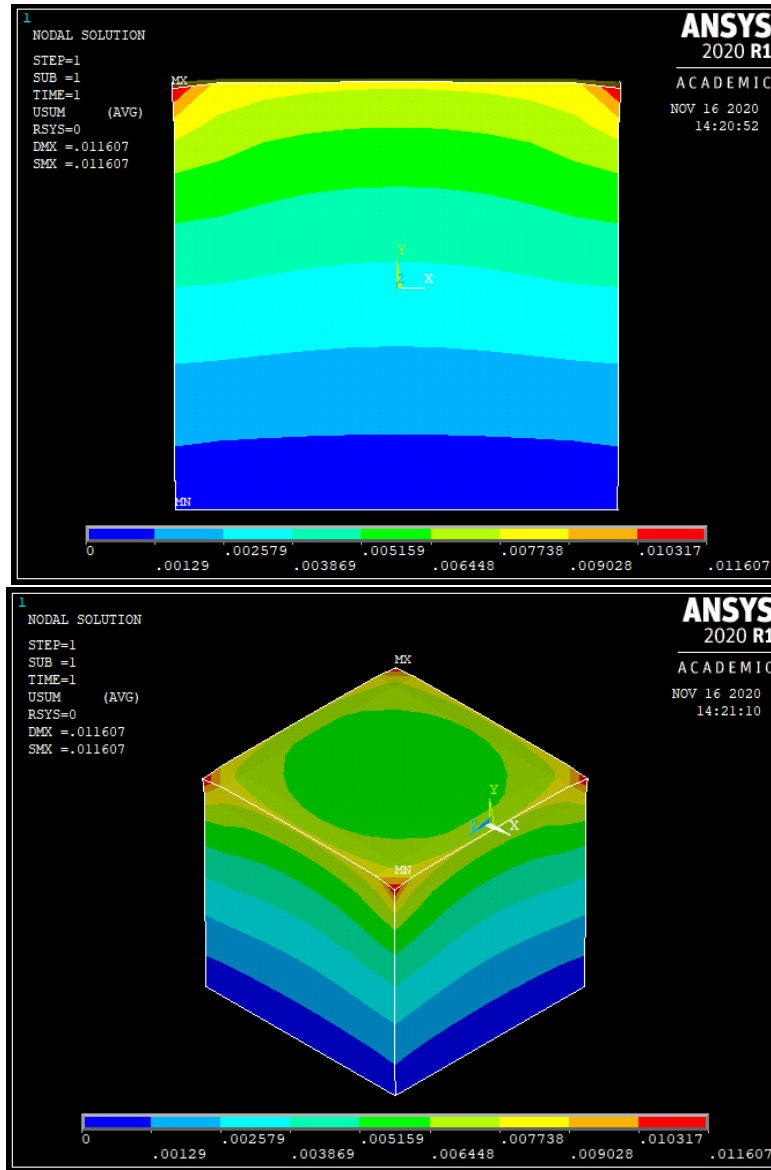


Fuente: Propia.

²⁰⁸ Fuente propia.

- Deformaciones máximas sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 1.0% de inclusión):

Figura 89. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 1.0% de inclusión.²⁰⁹



Fuente: Propia.

²⁰⁹ Fuente propia.

- **Proceso de inclusión de fibras en el compuesto por medio de la cuantía de refuerzo equivalente en las constantes de SOLID65 – para 1.5% de inclusión:**

Figura 90. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -1.5%).²¹⁰

Element Type Reference No. 1		Real Constant Set No.
		1
Real constants for rebar 1		
Material number	MAT1	2
Volume ratio	VR1	0.08
Orientation angle	THETA1	90
Orientation angle	PHI1	0
Real constants for rebar 2		
Material number	MAT2	2
Volume ratio	VR2	0.08
Orientation angle	THETA2	90
Orientation angle	PHI2	0
Real constants for rebar 3		
Material number	MAT3	2
Volume ratio	VR3	0.08
Orientation angle	THETA3	0
Orientation angle	PHI3	0
Crushed stiffness factor	CSTIF	0

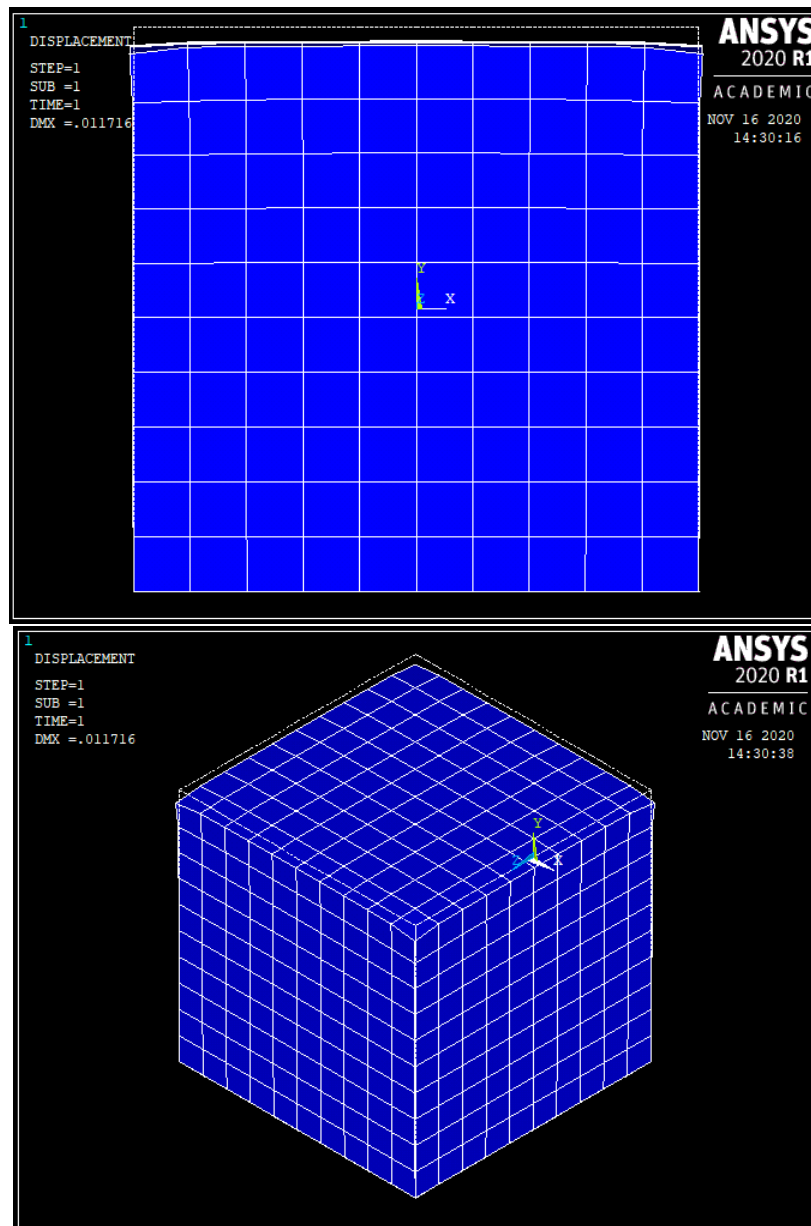
OK Apply Cancel Help

Fuente: Propia.

²¹⁰ Fuente propia.

- Visualización de las deformaciones sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 1.5% de inclusión):

Figura 91. Deformación del sólido por esfuerzos de compresión – 1.5% de inclusión.²¹¹

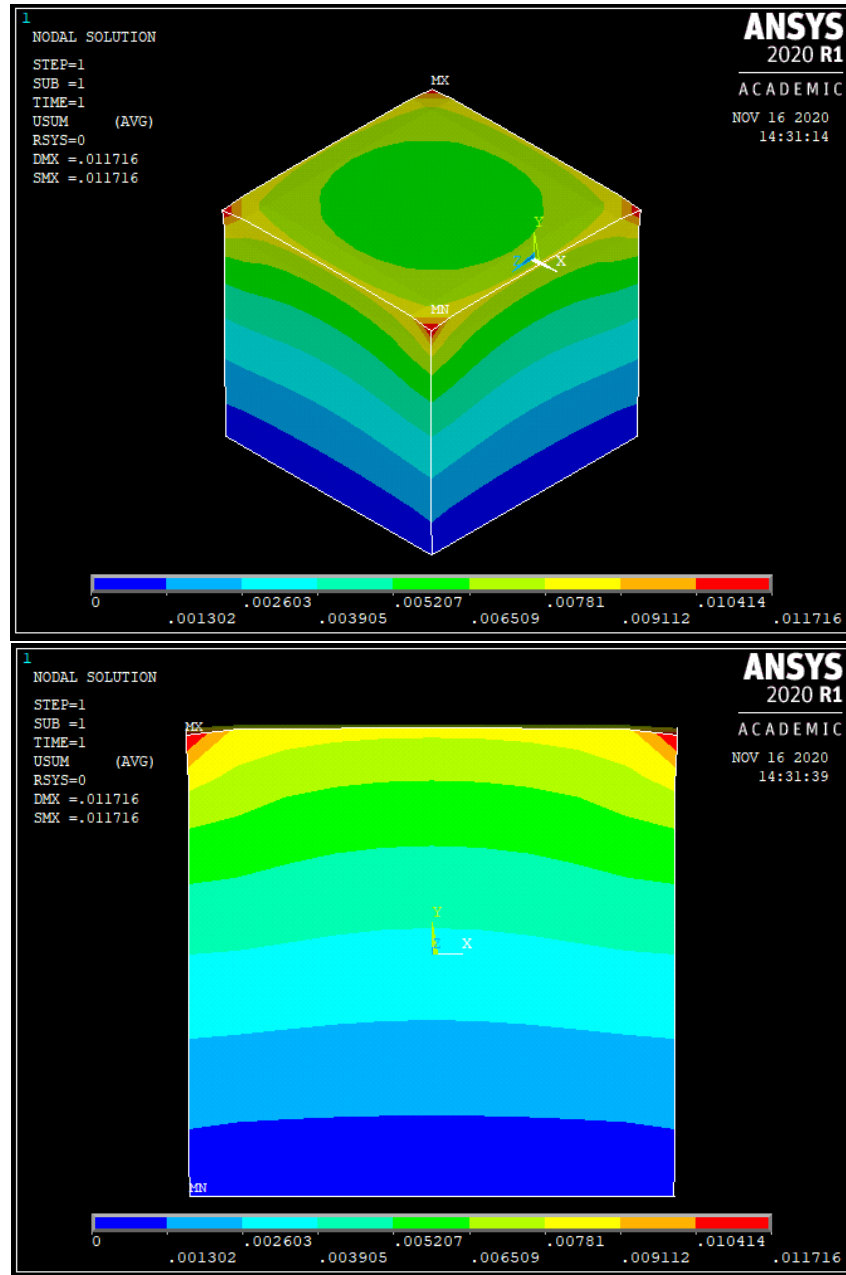


Fuente: Propia.

²¹¹ Fuente propia.

- Deformaciones máximas sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 1.5% de inclusión):

Figura 92. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 1.5% de inclusión.²¹²



Fuente: Propia.

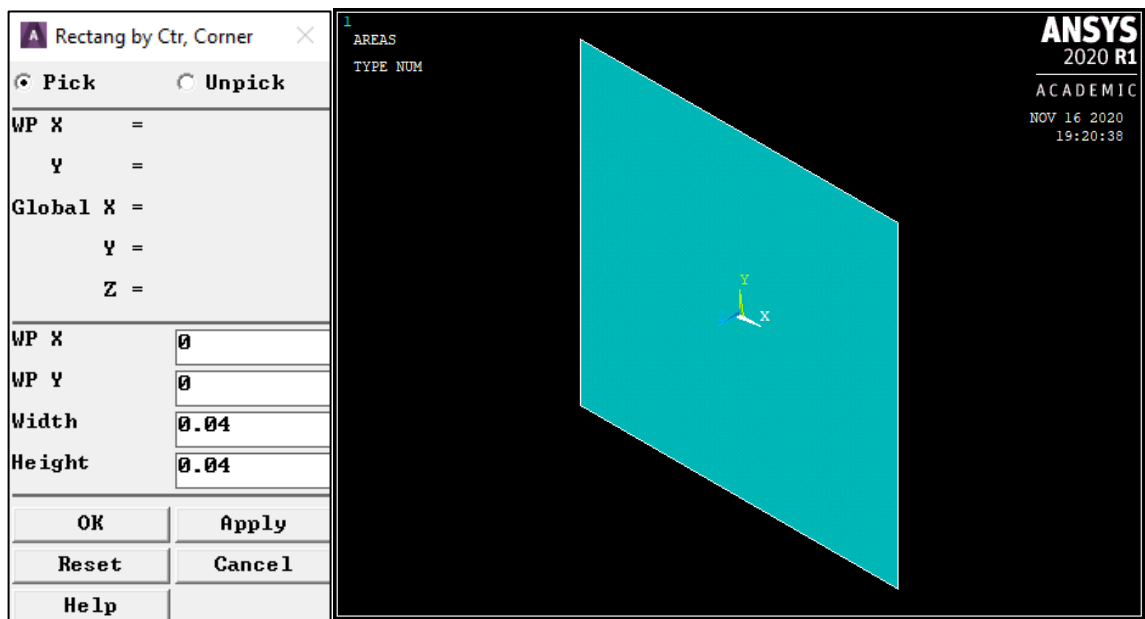
²¹² Fuente propia.

Comportamiento mecánico a flexión

Para la simulación numérica del comportamiento a flexión, se siguen de igual forma los parámetros establecidos en la primera parte de los anexos “*PROCESO DE MODELADO Y SIMULACIÓN*”, por lo cual se muestra el desarrollo a partir de la formación de la geometría del sólido, como sigue:

- **Definición de la geometría del sólido:**

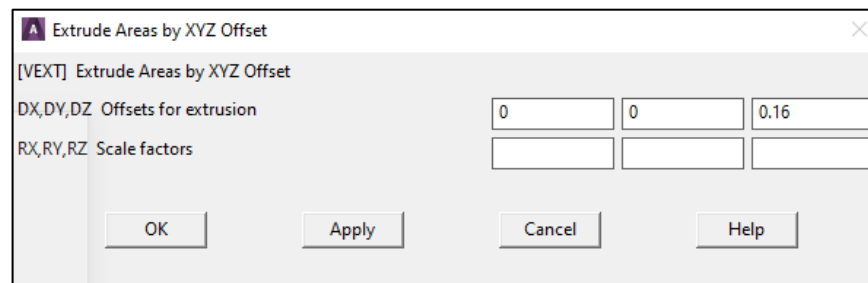
Figura 93. Herramienta de dibujo de área rectangular.²¹³



Fuente: Propia.

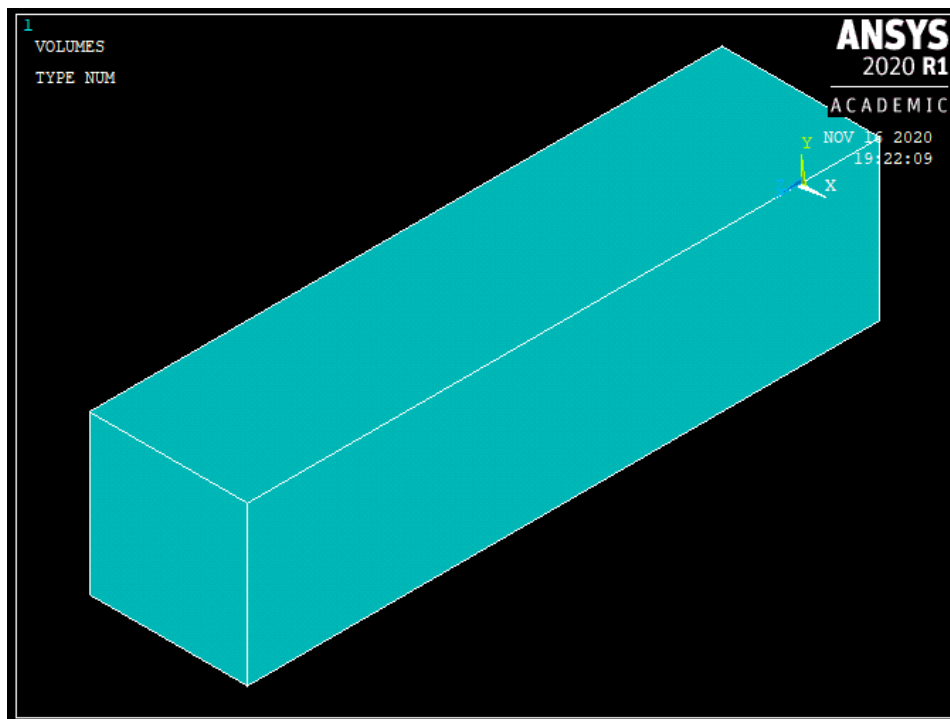
²¹³ Fuente propia.

Figura 94. Herramienta de dibujo de extracción de áreas.²¹⁴



Fuente: Propia.

Figura 95. Geometría final del sólido para desempeño freten a esfuerzos de flexión.²¹⁵



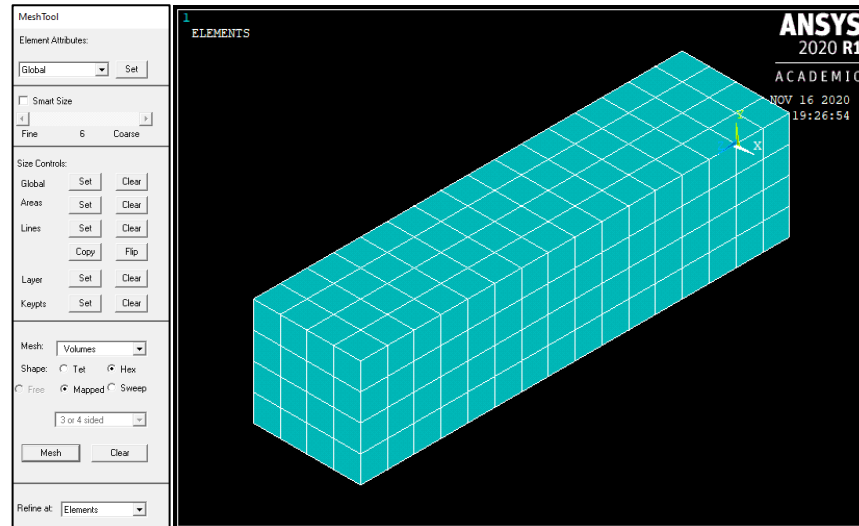
Fuente: Propia.

²¹⁴ Fuente propia.

²¹⁵ Fuente propia.

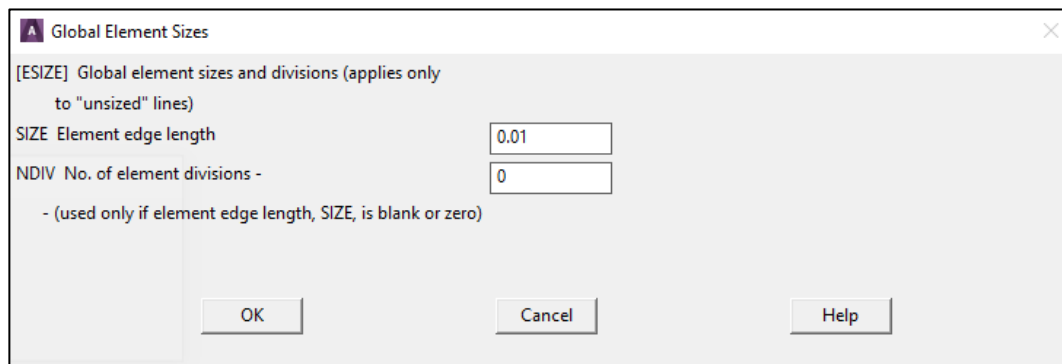
- **Proceso de mallado del solido:**

Figura 96. Proceso de mallado hexaédrico para la geometría del sólido.²¹⁶



Fuente: Propia.

Figura 97. Tamaño de los elementos del enmallado.²¹⁷



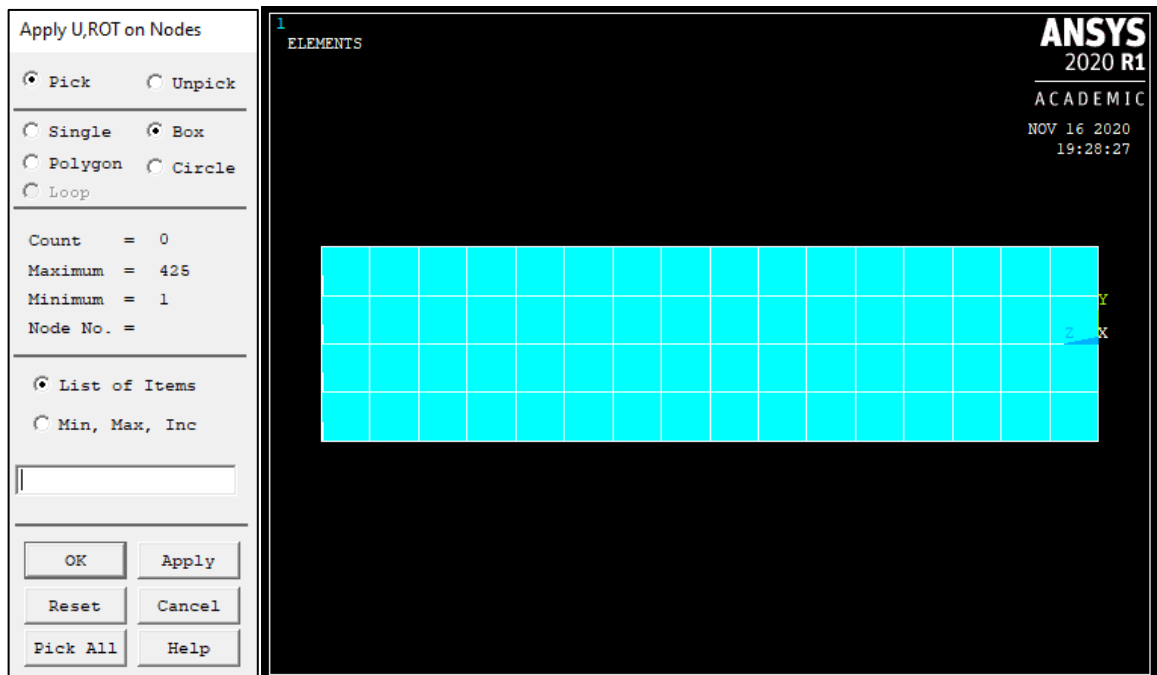
Fuente: Propia.

²¹⁶ Fuente propia.

²¹⁷ Fuente propia.

- **Asignación de restricciones en la base de la geometría (condiciones de borde):**

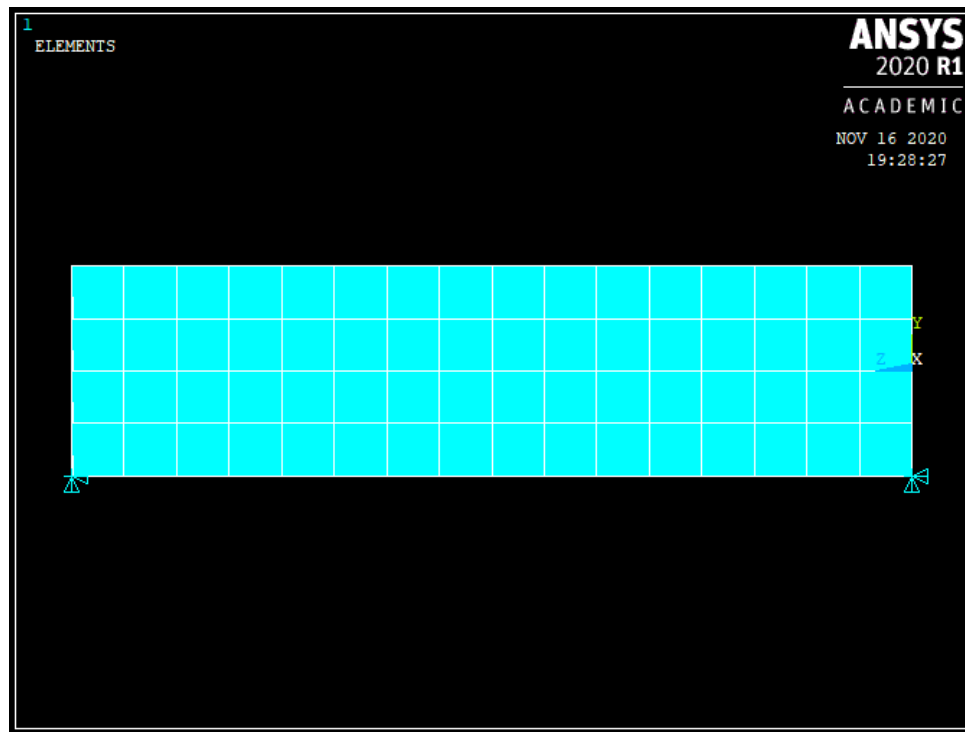
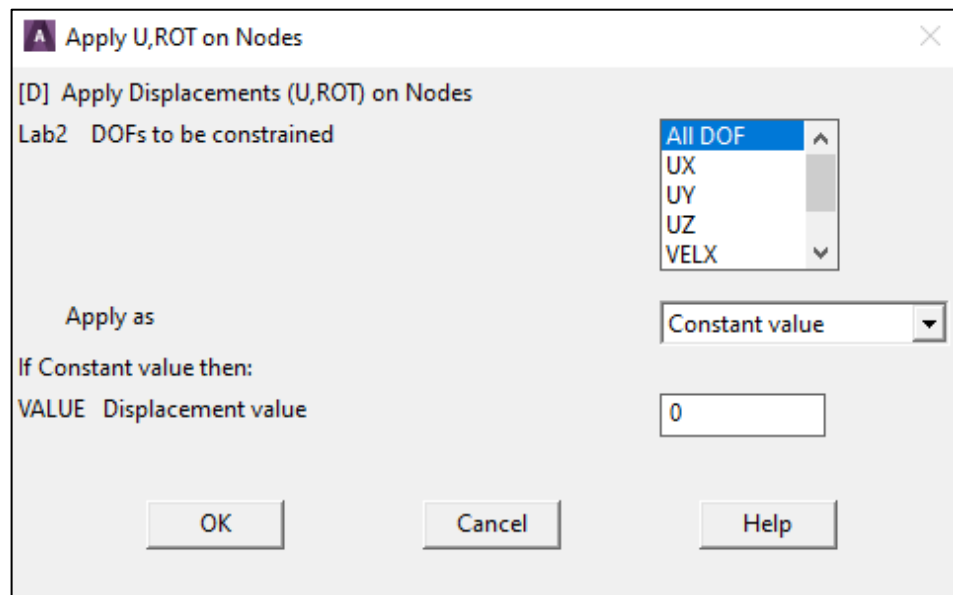
Figura 98. Asignación de restricciones al desplazamiento (a).²¹⁸



Fuente: Propia.

²¹⁸ Fuente propia.

Figura 99. Asignación de restricciones al desplazamiento (b).²¹⁹

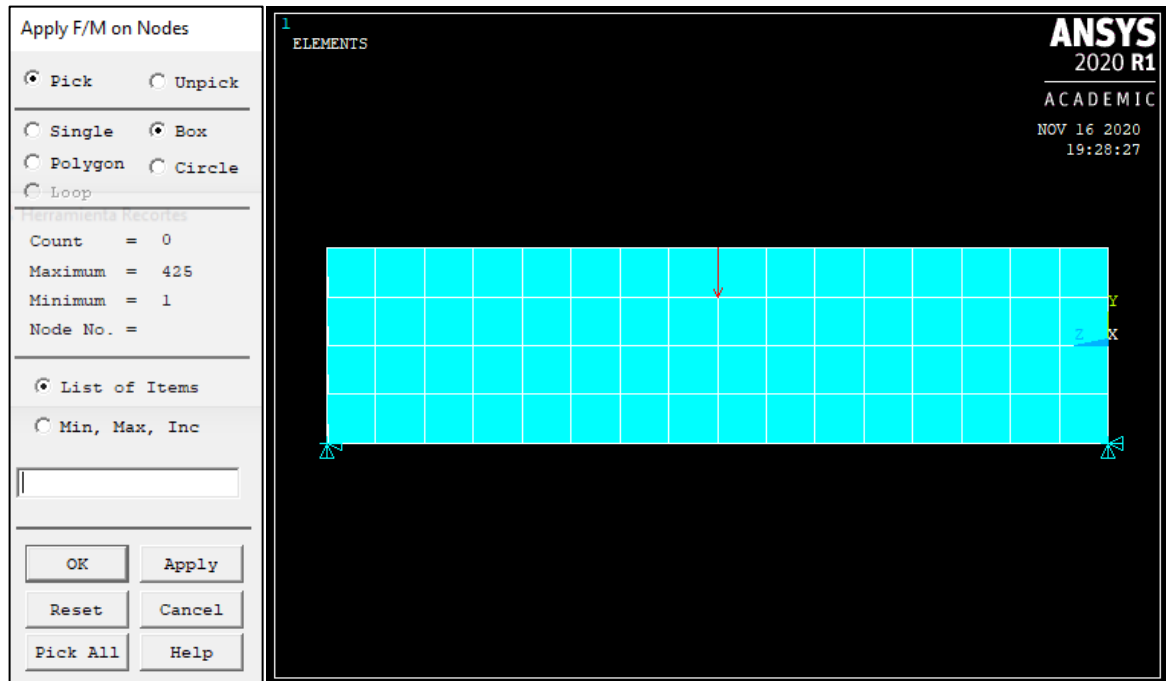


Fuente: Propia.

²¹⁹ Fuente propia.

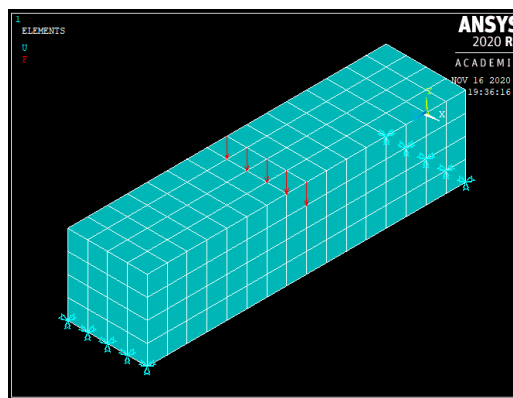
- Asignación de esfuerzos de compresión en la partes superior de la geometría (condiciones de borde):

Figura 100. Asignación de esfuerzos de flexión (a).²²⁰



Fuente: Propia.

Figura 101. Asignación de esfuerzos de flexión (b).²²¹



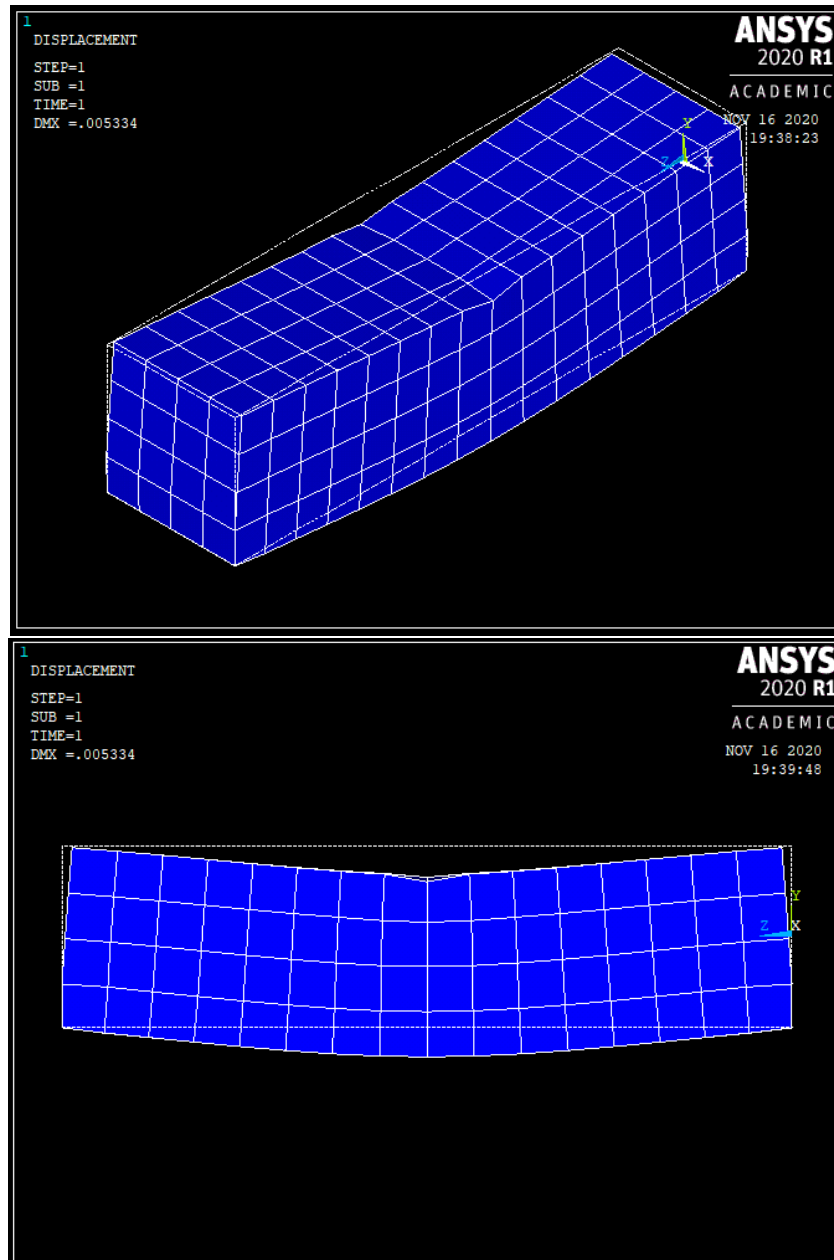
Fuente: Propia.

²²⁰ Fuente propia.

²²¹ Fuente propia.

- Visualización de las deformaciones sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 0.0% de inclusión):

Figura 102. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 0.0% de inclusión.²²²

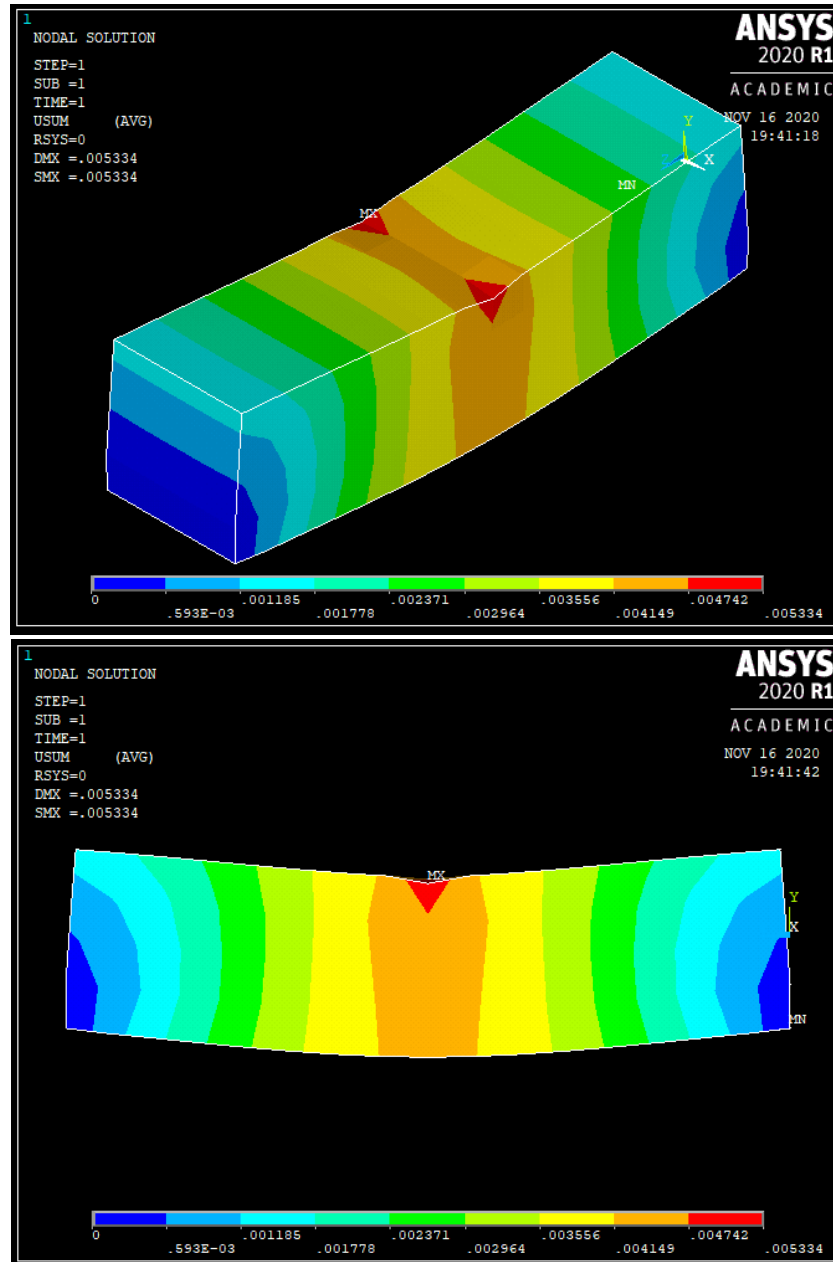


Fuente: Propia.

²²² Fuente propia.

- Deformaciones máximas sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 0.0% de inclusión):

Figura 103. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de compresión – 0.0% de inclusión.²²³



Fuente: Propia.

²²³ Fuente propia.

- **Proceso de inclusión de fibras en el compuesto por medio de la cuantía de refuerzo equivalente en las constantes de SOLID65 – para 0.5% de inclusión:**

Figura 104. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -0.5%).²²⁴

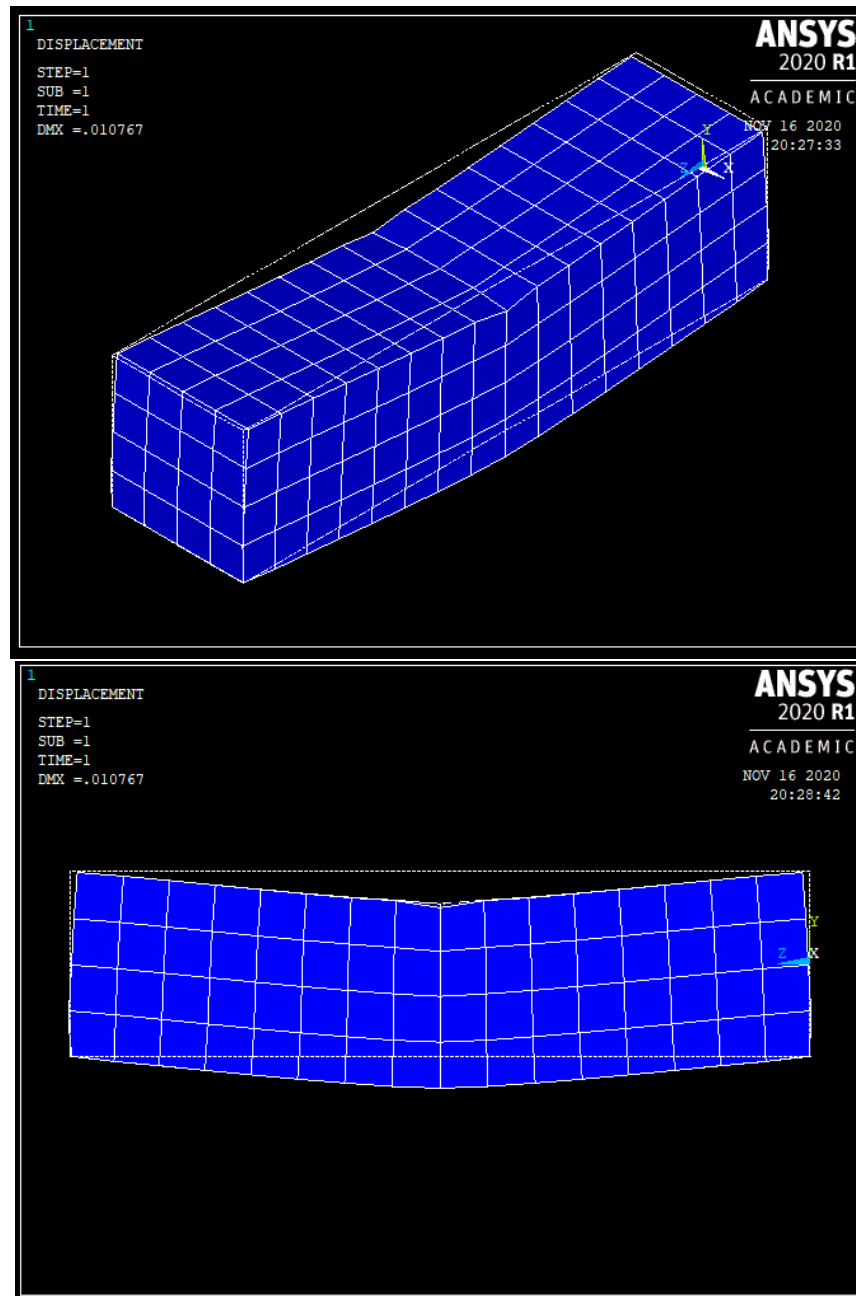
Real Constant Set Number 1, for SOLID65		
Element Type Reference No. 1		
Real Constant Set No.		1
Real constants for rebar 1		
Material number	MAT1	2
Volume ratio	VR1	0.26
Orientation angle	THETA1	90
Orientation angle	PHI1	0
Real constants for rebar 2		
Material number	MAT2	2
Volume ratio	VR2	0.26
Orientation angle	THETA2	90
Orientation angle	PHI2	0
Real constants for rebar 3		
Material number	MAT3	2
Volume ratio	VR3	0.26
Orientation angle	THETA3	0
Orientation angle	PHI3	90
Crushed stiffness factor	CSTIF	
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/>		

Fuente: Propia.

²²⁴ Fuente propia.

- Visualización de las deformaciones sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 0.5% de inclusión):

Figura 105. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 0.5% de inclusión.²²⁵

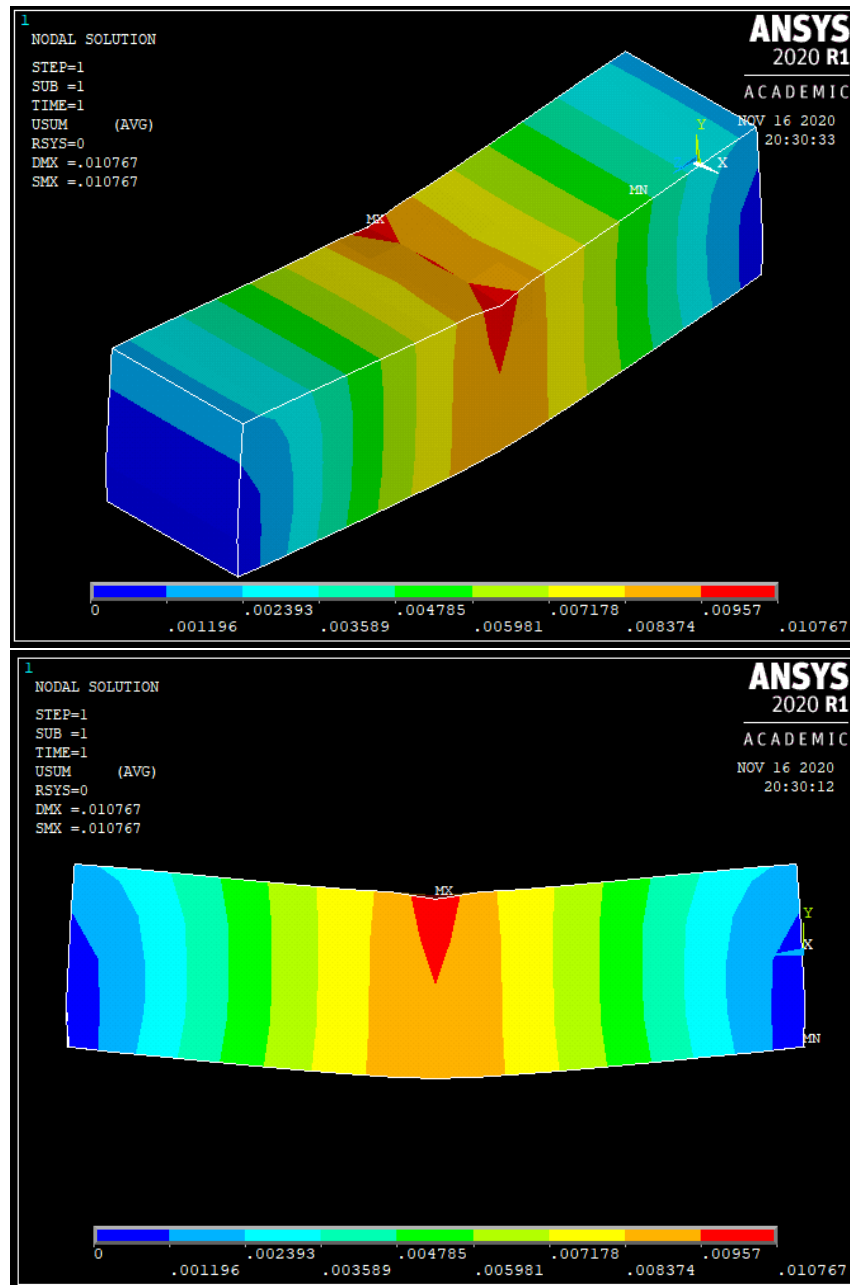


Fuente: Propia.

²²⁵ Fuente propia.

- Deformaciones máximas sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 0.5% de inclusión):

Figura 106. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de flexión – 0.5% de inclusión.²²⁶



Fuente: Propia.

²²⁶ Fuente propia.

- **Proceso de inclusión de fibras en el compuesto por medio de la cuantía de refuerzo equivalente en las constantes de SOLID65 – para 1.0% de inclusión:**

Figura 107. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -1.0%).²²⁷

Element Type Reference No. 1	
Real Constant Set No.	1
Real constants for rebar 1	
Material number MAT1	2
Volume ratio VR1	0.10
Orientation angle THETA1	90
Orientation angle PHI1	0
Real constants for rebar 2	
Material number MAT2	2
Volume ratio VR2	0.10
Orientation angle THETA2	90
Orientation angle PHI2	0
Real constants for rebar 3	
Material number MAT3	2
Volume ratio VR3	0.10
Orientation angle THETA3	0
Orientation angle PHI3	0
Crushed stiffness factor CSTIF	0

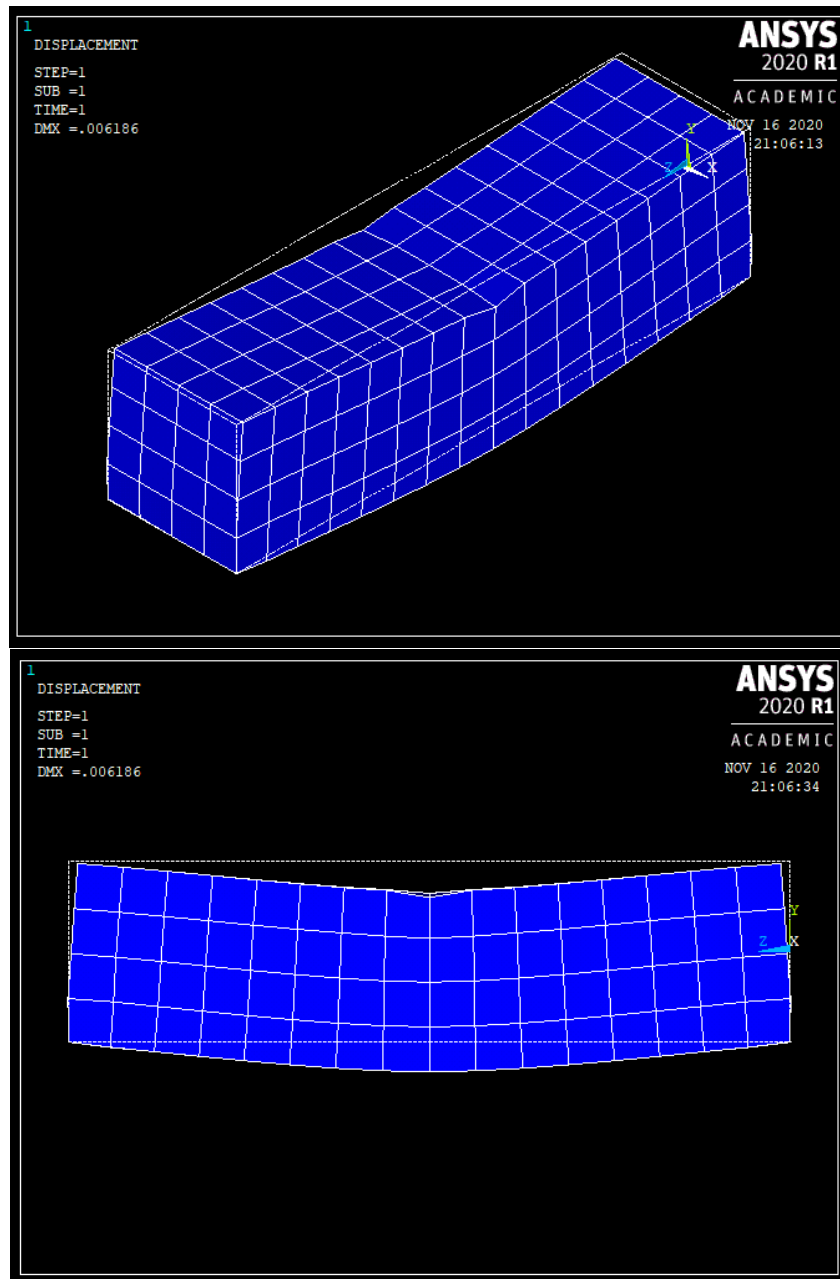
OK Apply Cancel Help

Fuente: Propia.

²²⁷ Fuente propia.

- Visualización de las deformaciones sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 1.0% de inclusión):

Figura 108. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.²²⁸

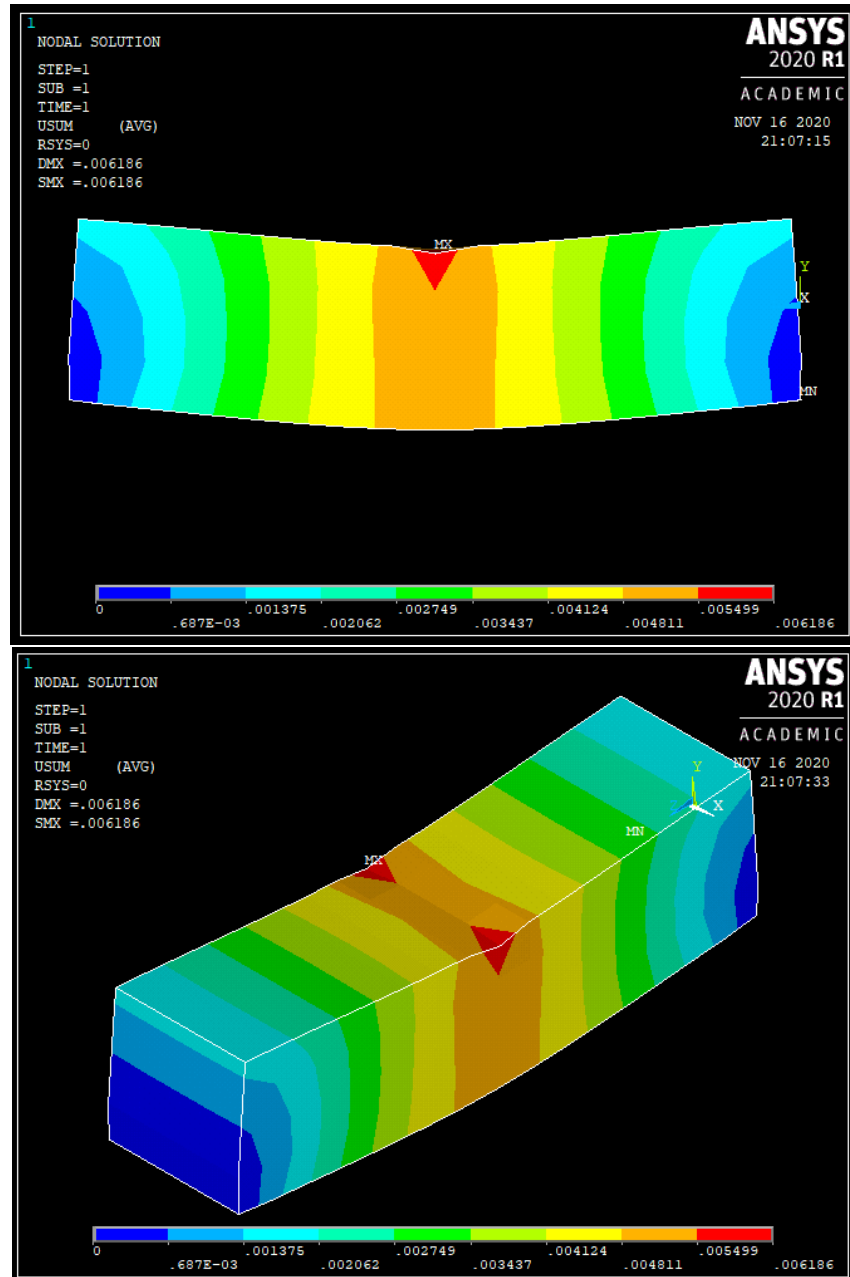


Fuente: Propia.

²²⁸ Fuente propia.

- Deformaciones máximas sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 1.0% de inclusión):

Figura 109. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.²²⁹



Fuente: Propia.

²²⁹ Fuente propia.

- **Proceso de inclusión de fibras en el compuesto por medio de la cuantía de refuerzo equivalente en las constantes de SOLID65 – para 1.5% de inclusión:**

Figura 110. Inclusión de fibras a través de las constantes de SOLID65 (cuantía de refuerzo equivalente -1.5%).²³⁰

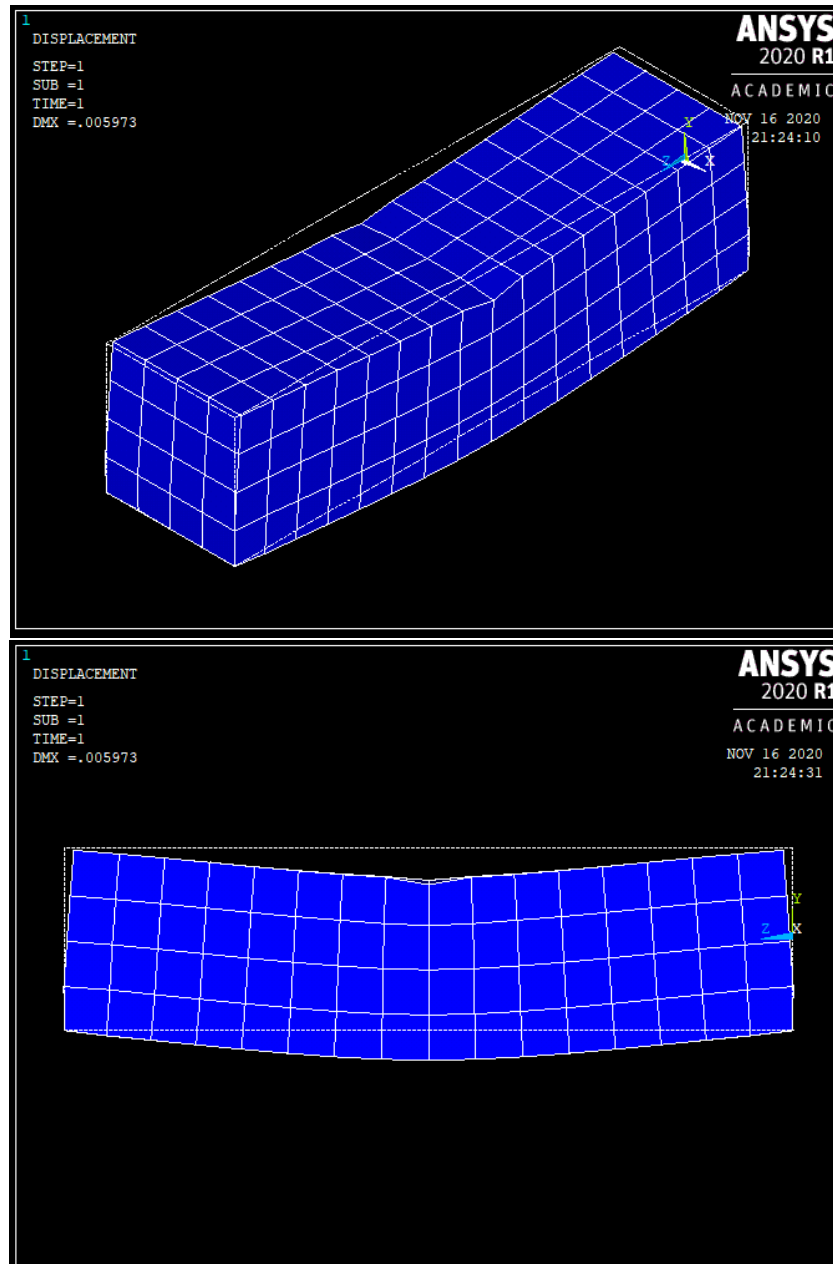
Element Type Reference No. 1	
Real Constant Set No.	<input type="text" value="1"/>
Real constants for rebar 1	
Material number MAT1	<input type="text" value="2"/>
Volume ratio VR1	<input type="text" value="0.08"/>
Orientation angle THETA1	<input type="text" value="90"/>
Orientation angle PHI1	<input type="text" value="0"/>
Real constants for rebar 2	
Material number MAT2	<input type="text" value="2"/>
Volume ratio VR2	<input type="text" value="0.08"/>
Orientation angle THETA2	<input type="text" value="90"/>
Orientation angle PHI2	<input type="text" value="0"/>
Real constants for rebar 3	
Material number MAT3	<input type="text" value="2"/>
Volume ratio VR3	<input type="text" value="0.08"/>
Orientation angle THETA3	<input type="text" value="0"/>
Orientation angle PHI3	<input type="text" value="0"/>
Crushed stiffness factor CSTIF	<input type="text" value="0"/>
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/>	

Fuente: Propia.

²³⁰ Fuente propia.

- Visualización de las deformaciones sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 1.5% de inclusión):

Figura 111. Deformación del sólido por esfuerzos de flexión – 1.5% de inclusión.²³¹

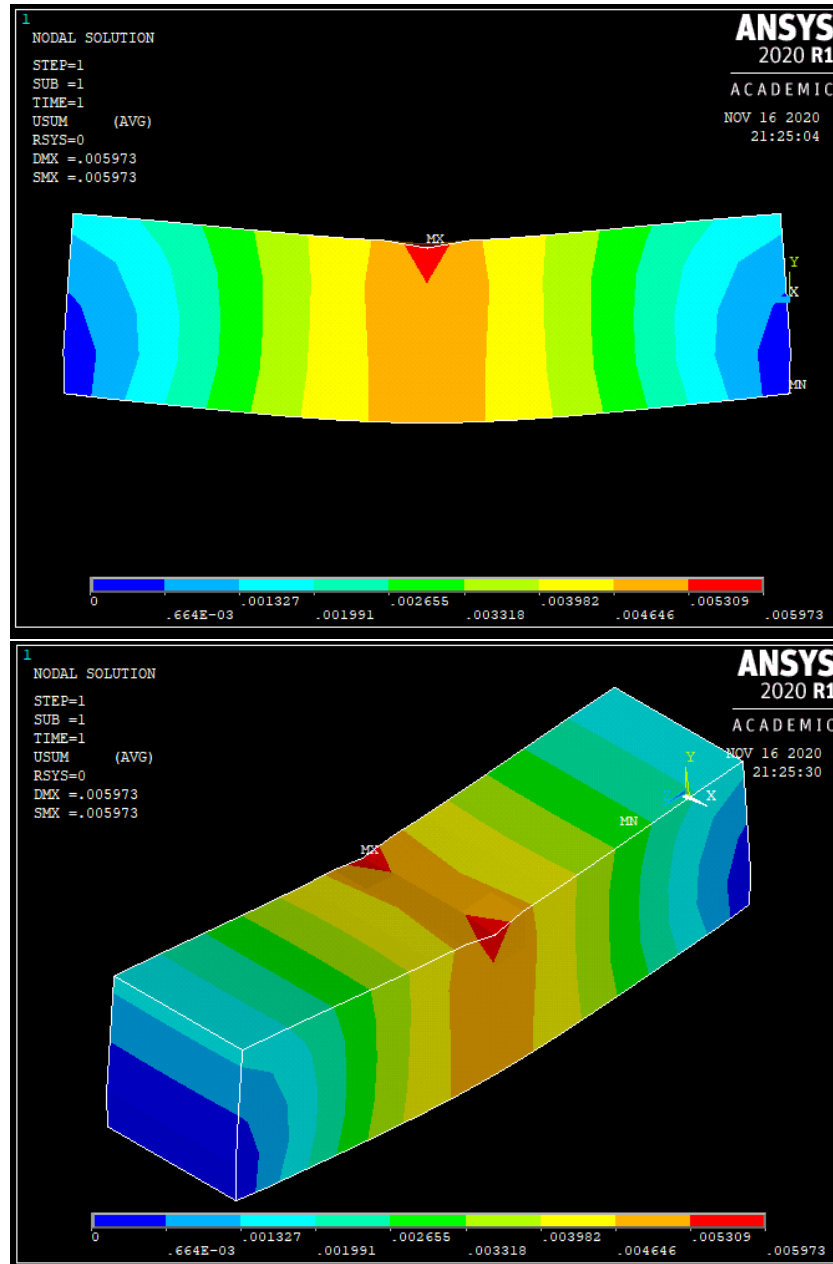


Fuente: Propia.

²³¹ Fuente propia.

- Deformaciones máximas sufridas por el sólido debido a los esfuerzos de compresión (sólido tipo patrón – 1.5% de inclusión):

Figura 112. Deformación máxima del sólido por esfuerzos de flexión – 1.0% de inclusión.²³²



Fuente: Propia.

²³² Fuente propia.