

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**Tesis**

**Análisis de sensibilidad de la configuración de esferas y refuerzo de acero en  
la respuesta estructural de losas Bubbledeck mediante el método de  
elementos finitos, Abancay, Apurímac, 2024**

Asesor:

Mg. Ing. Alarcon Camacho, Erick

Autor:

Burgos Patiño, Jhonatan Alvaro

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Abancay - Apurímac – Perú

2025

## Acta de sustentación



# Universidad Tecnológica de los Andes



Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 091

En la ciudad de Abancay, a los diez días del mes de diciembre del 2025, siendo las 11:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 1020-2025- EPIC-FI-UTEA-SA de fecha 03 de diciembre del 2025, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mag. Huanca Astoquillca, Luis
Dictaminante :	Mag. Saavedra Ore, Danilo
Replicante :	Mag. Roldan Juárez, Américo

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis  Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

**Análisis de sensibilidad de la configuración de esferas y refuerzo de acero en la respuesta estructural de losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos. Abancay, Apurímac, 2024**

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

**Br: Burgos Patiño, Jhonatan Alvaro**

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad  
(Unanimidad o Mayoría) (\*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
<b>Burgos Patiño, Jhonatan Alvaro</b>	<b>Aprobado</b>

Siendo las 12:50pm horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Huanca Astoquillca, Luis

Dictaminante: Mag. Saavedra Ore, Danilo

Replicante: Mag. Roldan Juárez, Américo

Abancay 06 de enero del 2026

# Reporte de similitud






## 24% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

### Fuentes principales

- 19%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 19%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## Metadatos

<b>Datos del autor</b>	
Apellidos y nombres	: Burgos Patiño, Jhonatan Alvaro
Tipo de documento de identidad	: DNI
Número de documento de identidad	: 74143921
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0009-0004-8082-089X">https://orcid.org/0009-0004-8082-089X</a>
<b>Datos del asesor</b>	
Apellidos y nombres	: Alarcón Camacho, Erick
Tipo de documento de identidad	: DNI
Número de documento de identidad	: 31039703
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0000-0003-4294-7481">https://orcid.org/0000-0003-4294-7481</a>
<b>Datos de la Investigación</b>	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Civil
Línea de investigación	: Gestión de la Infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que realizó la investigación	: 2024 - 2025
Fuente de financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de similitud	: 24%
URL de OCDE	: <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford# 2.01.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford# 2.01.01</a>

## **Dedicatoria**

Esta tesis se dedica a mi madre y hermano, de ellos obtengo la motivación y fuerza para ser mejor día a día. Lo que alcancé ha sido por esfuerzo de mi familia, por lo tanto, éste logro es mío como de ellos.

## **Agradecimiento**

Doy gracias a mi madre y hermano por ser incondicionales para mí, por ser mi motivación y por su paciencia para poder acompañarme durante todo este proceso.

A mí asesor, Mg. Ing. Erick Alarcon Camacho, por su orientación y apoyo constructivo, además de su motivación en investigaciones innovadoras y por su pasión para impartir a todos sus estudiantes nuevos conocimientos. A mis colegas y amistades que me han motivado durante el proceso de investigación y a ese café con sándwich de lechón tan particular que me acompañó en algún momento.

## Resumen

Este estudio está enfocado en evaluar la respuesta estructural de las losas Bubbledeck por medio del método de elementos finitos (FEM) utilizando el software ABAQUS Student Edition, considerando variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero. Se realizaron simulaciones numéricas y validación experimental para determinar la precisión de las simulaciones y capacidad para representar la respuesta real de losas bajo cargas.

En el análisis de sensibilidad, se observó que las variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero tienen un impacto significativo en la respuesta estructural, especialmente en los puntos de rotura del concreto, fluencia del refuerzo de acero y carga última, que fueron representados a través de curvas de carga-desplazamiento. Las simulaciones numéricas mostraron una buena correlación con los resultados experimentales, con diferencias mínimas durante el proceso de calibración del modelo, lo que valida la capacidad del método de elementos finitos para modelar el comportamiento de losas Bubbledeck con precisión.

Además, se determinó que el software ABAQUS Student Edition y el uso del modelo de plasticidad con daño para el concreto son herramientas efectivas para hacer análisis de la capacidad de carga en losas aligeradas, permitiendo de manera óptima hacer uso de materiales sin comprometer la seguridad estructural.

Se concluye que la combinación de simulaciones numéricas y ensayos experimentales ofrece un alcance para el diseño de estructuras más eficientes, seguras y económicas, destacando la importancia de continuar con la validación y calibración de modelos numéricos mediante ensayos experimentales en condiciones controladas. Este enfoque contribuye a la optimización de la ingeniería estructural.

**Palabras clave:** método de elementos finitos, respuesta estructural, análisis de sensibilidad, losas Bubbledeck, curva de carga desplazamiento.

## **Abstract**

This study focuses on evaluating the structural response of Bubbledeck slabs using the Finite Element Method (FEM) with ABAQUS software Student Edition, considering variations in the configuration of spheres and steel reinforcement. Numerical simulations and experimental validation were conducted to determine the accuracy of the simulations and their ability to represent the real response of the slabs under loads.

In the sensitivity analysis, it was observed that variations in the sphere configuration and steel reinforcement have a significant impact on the structural response, particularly at the concrete failure points, steel reinforcement yield, and ultimate load, which were represented through load-displacement curves. The numerical simulations showed good correlation with experimental results, with minimal differences during the model calibration process, validating the FEM's ability to accurately model the behavior of Bubbledeck slabs.

Additionally, it was determined that ABAQUS software Student Edition and the use of the damage plasticity model for concrete are effective tools for analyzing the load-bearing capacity of lightweight slabs, allowing for material optimization without compromising structural safety.

It is concluded that the combination of numerical simulations and experimental tests provides a pathway for designing more efficient, safe, and cost-effective structures, highlighting the importance of continuing the validation and calibration of numerical models through experimental tests under controlled conditions. This approach contributes to the optimization of structural engineering.

**Keywords:** finite element method, structural response, sensitivity analysis, Bubbledeck slabs, load displacement curve.

## Índice general

Portada.....	I
Acta de sustentación .....	II
Reporte de similitud.....	III
Metadatos.....	IV
Dedicatoria.....	V
Agradecimiento .....	VI
Resumen.....	VII
Abstract.....	VIII
Índice general .....	IX
Índice de tablas.....	XII
Índice de figuras.....	XIII
Índice de anexos .....	XXI
<b>I. Introducción .....</b>	<b>22</b>
<b>II. Planteamiento del problema .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. Descripción y formulación del problema.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2. Objetivos .....</b>	<b>26</b>
2.2.1. Objetivo General .....	26
2.2.2. Objetivos Específicos.....	27
<b>2.3. Justificación e importancia .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4. Hipótesis.....</b>	<b>29</b>

<b>2.5. Variable.....</b>	<b>31</b>
<b>III. Marco teórico .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1. Antecedentes.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2. Bases teóricas.....</b>	<b>42</b>
3.2.1. Configuración de esferas Bubbledeck .....	42
3.2.2. Refuerzo de Acero .....	46
3.2.3. Respuesta estructural .....	47
<b>3.3. Definición de términos.....</b>	<b>62</b>
<b>IV. Metodología .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1. Tipo y nivel de investigación .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2. Ámbito Temporal y Espacial .....</b>	<b>68</b>
<b>4.3. Población y muestra.....</b>	<b>69</b>
<b>4.4. Instrumentos.....</b>	<b>70</b>
<b>4.5. Procedimientos .....</b>	<b>71</b>
<b>4.6. Análisis de datos.....</b>	<b>74</b>
<b>4.7. Consideraciones éticas .....</b>	<b>74</b>
<b>V. Resultados y discusión .....</b>	<b>75</b>
<b>5.1. Resultados.....</b>	<b>75</b>
5.1.1. Ensayo Experimental de la Losa Bubbledeck 01 .....	75
5.1.2. Método de elementos finitos ABAQUS de la Losa Bubbledeck 01 .....	78

5.1.3.	Realización de simulaciones numéricas de losas Bubbledeck ante diferentes configuraciones de esferas y refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos .....	103
5.1.4.	Influencia en la respuesta estructural de las variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero en losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos. ....	138
5.1.5.	Análisis de sensibilidad en la respuesta estructural de losas Bubbledeck ante variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero, mediante el método de elementos finitos .....	144
<b>5.2.</b>	<b>Discusión de resultados.....</b>	<b>162</b>
<b>VI.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>178</b>
<b>VII.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>183</b>
<b>VIII.</b>	<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>186</b>
<b>IX.</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>193</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Ventajas del modelo constitutivo de Hognestad.....	54
<b>Tabla 2</b>	Ventajas del modelo constitutivo de Hognestad.....	54
<b>Tabla 3</b>	Comparación de tamaños de malla .....	96
<b>Tabla 4</b>	Elementos Hexaédricos (cuadriláteros en 3D).....	97
<b>Tabla 5</b>	Elementos Tetraédricos (triangulares en 3D) .....	97
<b>Tabla 6</b>	Comparación entre elementos hexaédricos y tetraédricos .....	98
<b>Tabla 7</b>	Datos calculados .....	102
<b>Tabla 8</b>	Variaciones de la resistencia a compresión del modelo calibrado.....	104
<b>Tabla 9</b>	Variaciones en el refuerzo de acero del modelo calibrado .....	123
<b>Tabla 10</b>	Variaciones de la configuración de esferas del modelo calibrado .....	131
<b>Tabla 11</b>	Definición de curvas Carga / Desplazamiento en las variaciones de resistencia a compresión.....	138
<b>Tabla 12</b>	Definición de curvas Carga / Desplazamiento en las variaciones en el diámetro del refuerzo de acero.....	140
<b>Tabla 13</b>	Definición de curvas Carga / Desplazamiento en las variaciones en la configuración de esferas .....	142
<b>Tabla 14</b>	Respuesta estructural de variaciones en la resistencia a compresión .....	145
<b>Tabla 15</b>	Respuesta estructural de variaciones en el refuerzo de acero.....	147
<b>Tabla 16</b>	Respuesta estructural de variaciones en la configuración de esferas.....	149
<b>Tabla 17</b>	Respuesta estructural del modelo calibrado.....	152
<b>Tabla 18</b>	Resultados obtenidos- Variaciones en la resistencia a compresión .....	164
<b>Tabla 19</b>	Resultados obtenidos- Variaciones en el refuerzo de acero.....	165
<b>Tabla 20</b>	Resultados obtenidos- Variaciones en la configuración de esferas .....	166
<b>Tabla 21</b>	Comparación clave entre modelo experimental y numérico.....	179

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b>	Losa Bubbledeck convencional.....	43
<b>Figura 2</b>	Característica de armado de losa Bubbledeck.....	44
<b>Figura 3</b>	Corte típico de losa Bubbledeck.....	44
<b>Figura 4</b>	Configuración de losas Bubbledeck.....	46
<b>Figura 5</b>	Equipo de resistencia a flexión unidireccional.....	51
<b>Figura 6</b>	Diagrama esfuerzo / deformación del concreto.....	52
<b>Figura 7</b>	Resumen del modelo de Hognestad .....	53
<b>Figura 8</b>	Representación isométrica de losa Bubbledeck convencional .....	55
<b>Figura 9</b>	Representación de mallado para las esferas de polietileno de alta densidad.....	56
<b>Figura 10</b>	Respuesta a carga uniaxial del concreto en tracción .....	57
<b>Figura 11</b>	Respuesta a carga uniaxial del concreto en compresión .....	58
<b>Figura 12</b>	Diagrama de flujo de modelación del método de elementos finitos en ABAQUS.....	59
<b>Figura 13</b>	Procedimientos- Diagrama de flujo.....	73
<b>Figura 14</b>	Sección de la losa .....	75
<b>Figura 15</b>	Vista en planta de la losa del ensayo.....	76
<b>Figura 16</b>	Curva Carga / Desplazamiento.....	77
<b>Figura 17</b>	Geometría del ensayo experimental .....	78
<b>Figura 18</b>	Geometría de la losa Bubbledeck.....	79
<b>Figura 19</b>	Curva esfuerzo / deformación del concreto a compresión .....	79
<b>Figura 20</b>	Curva esfuerzo / deformación del concreto a tensión .....	80
<b>Figura 21</b>	Curva esfuerzo - deformación plástica.....	80
<b>Figura 22</b>	Curva esfuerzo a tracción del concreto – deformación plástica.....	81
<b>Figura 23</b>	Parámetro del daño a la compresión.....	81
<b>Figura 24</b>	Parámetro del daño a la tensión.....	82

<b>Figura 25</b>	Curva esfuerzo – deformación del acero.....	82
<b>Figura 26</b>	Módulo Part – Dimensiones de la losa.....	83
<b>Figura 27</b>	Módulo Part – Refuerzo de acero.....	83
<b>Figura 28</b>	Módulo Part – Esfera Bubbledeck (vacío esférico).....	84
<b>Figura 29</b>	Módulo Property – Concreto.....	84
<b>Figura 30</b>	Módulo Property – Densidad y Módulo de elasticidad.....	85
<b>Figura 31</b>	Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto (Comportamiento a compresión).....	86
<b>Figura 32</b>	Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto (Comportamiento a tracción) .....	87
<b>Figura 33</b>	Módulo Property – Acero de refuerzo.....	88
<b>Figura 34</b>	Módulo Property – Acero de refuerzo (Propiedades plásticas).....	89
<b>Figura 35</b>	Módulo Assembly - Ensamblaje de la losa Bubbledeck.....	90
<b>Figura 36</b>	Módulo Assembly - Ensamblaje del refuerzo de acero (Malla superior e inferior) .....	90
<b>Figura 37</b>	Módulo Assembly - Ensamblaje de los vacíos esféricos (eje “y”).....	91
<b>Figura 38</b>	Módulo Assembly - Ensamblaje de los vacíos esféricos (eje “x”).....	91
<b>Figura 39</b>	Módulo Interaction – Parámetro Constraint.....	92
<b>Figura 40</b>	Módulo Interaction – Parámetro Constraint (Vista zoom de las regiones embebidas) .....	92
<b>Figura 41</b>	Módulo Load - Restricción en los Apoyos.....	93
<b>Figura 42</b>	Módulo Load – Celdas de Carga ubicadas en los tercios de la longitud de la losa .....	93
<b>Figura 43</b>	Módulo Mesh -Enmallado a 50mm.....	95
<b>Figura 44</b>	Módulo Mesh -Enmallado a 100mm.....	95

<b>Figura 45</b> Módulo Mesh -Enmallado a 200mm.....	96
<b>Figura 46</b> Módulo Mesh – Losa Bubbledeck de concreto con vacíos esféricos.....	98
<b>Figura 47</b> Módulo Mesh – Propiedades del enmallado de la Losa Bubbledeck con vacíos esféricos .....	99
<b>Figura 48</b> Módulo Mesh – Enmallado del refuerzo de acero .....	99
<b>Figura 49</b> Módulo Mesh – Propiedades del enmallado .....	100
<b>Figura 50</b> Módulo Job – Modelo federado .....	100
<b>Figura 51</b> Módulo Job – Monitor de convergencia.....	101
<b>Figura 52</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento.....	101
<b>Figura 53</b> Módulo Visualization – Resultados de la simulación 50mm.....	102
<b>Figura 54</b> Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a compresión.....	105
<b>Figura 55</b> Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a tensión.....	105
<b>Figura 56</b> Curva Esfuerzo – Deformación plástica.....	106
<b>Figura 57</b> Curva Esfuerzo a tracción del concreto – Deformación plástica .....	106
<b>Figura 58</b> Parámetro de daño a compresión.....	107
<b>Figura 59</b> Parámetro de daño a tensión.....	107
<b>Figura 60</b> Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto $f'_c=21.00$ MPa (Comportamiento a compresión) .....	108
<b>Figura 61</b> Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto $f'_c=21.00$ MPa (Comportamiento a tracción) .....	109
<b>Figura 62</b> Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con $f'_c=21.00$ MPa. ....	110
<b>Figura 63</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento.....	110
<b>Figura 64</b> Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a compresión.....	111
<b>Figura 65</b> Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a tensión.....	111

<b>Figura 66</b> Curva Esfuerzo – Deformación plástica.....	112
<b>Figura 67</b> Curva Esfuerzo a tracción del concreto – Deformación plástica .....	112
<b>Figura 68</b> Parámetro de daño a compresión.....	113
<b>Figura 69</b> Parámetro de daño a tensión.....	113
<b>Figura 70</b> Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto $f'_c=28.00$ MPa (Comportamiento a compresión) .....	114
<b>Figura 71</b> Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto $f'_c=28.00$ MPa (Comportamiento a tracción) .....	115
<b>Figura 72</b> Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con $f'_c=28.00$ MPa. ....	116
<b>Figura 73</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento.....	116
<b>Figura 74</b> Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a compresión.....	117
<b>Figura 75</b> Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a tensión.....	117
<b>Figura 76</b> Curva Esfuerzo – Deformación plástica.....	118
<b>Figura 77</b> Curva Esfuerzo a tracción del concreto – Deformación plástica .....	118
<b>Figura 78</b> Parámetro de daño a compresión.....	119
<b>Figura 79</b> Parámetro de daño a tensión.....	119
<b>Figura 80</b> Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto $f'_c=35.00$ MPa (Comportamiento a compresión) .....	120
<b>Figura 81</b> Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto $f'_c=35.00$ MPa (Comportamiento a tracción) .....	121
<b>Figura 82</b> Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con $f'_c=35.00$ MPa. ....	122
<b>Figura 83</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento.....	122

<b>Figura 84</b> Módulo Property – Definición del área de la sección correspondiente a $\varnothing = 8$ mm .....	124
<b>Figura 85</b> Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con refuerzo de acero $\varnothing = 8$ mm .....	124
<b>Figura 86</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento .....	125
<b>Figura 87</b> Módulo Property – Definición del área de la sección correspondiente a $\varnothing = 9.525$ mm .....	126
<b>Figura 88</b> Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con refuerzo de acero $\varnothing = 9.525$ mm .....	126
<b>Figura 89</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento .....	127
<b>Figura 90</b> Módulo Property – Definición del área de la sección correspondiente a $\varnothing = 12$ mm .....	128
<b>Figura 91</b> Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con refuerzo de acero $\varnothing = 12$ mm .....	128
<b>Figura 92</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento .....	129
<b>Figura 93</b> Configuración 01 .....	130
<b>Figura 94</b> Configuración 02 .....	130
<b>Figura 95</b> Configuración 03 .....	131
<b>Figura 96</b> Módulo Assembly - Configuración 01 .....	132
<b>Figura 97</b> Módulo Assembly - Configuración 01 vista en planta.....	132
<b>Figura 98</b> Módulo Visualization - Resultados obtenidos de la Convergencia del modelo con la Configuración 01.....	133
<b>Figura 99</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento de la Configuración 01 .	133
<b>Figura 100</b> Módulo Assembly - Configuración 02 .....	134
<b>Figura 101</b> Módulo Assembly - Configuración 02 vista en planta.....	134

<b>Figura 102</b> Módulo Visualization - Resultados obtenidos de la Convergencia del modelo con la Configuración 02.....	135
<b>Figura 103</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento de la Configuración 02	135
<b>Figura 104</b> Módulo Assembly - Configuración 03.....	136
<b>Figura 105</b> Módulo Assembly - Configuración 03 vista en planta.....	136
<b>Figura 106</b> Módulo Visualization - Resultados obtenidos de la Convergencia del modelo con la Configuración 03.....	137
<b>Figura 107</b> Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento de la Configuración 03	137
<b>Figura 108</b> Curva de Variaciones en la resistencia a compresión .....	139
<b>Figura 109</b> Curva de Variaciones en el refuerzo de acero .....	141
<b>Figura 110</b> Curva de Variaciones en la configuración de esferas.....	143
<b>Figura 111</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento $f'_c=21.00\text{MPa}$ .....	146
<b>Figura 112</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento $f'_c=28.00\text{MPa}$ .....	146
<b>Figura 113</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento $f'_c=35.00\text{MPa}$ .....	147
<b>Figura 114</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento $\emptyset = 8 \text{ mm}$ .....	148
<b>Figura 115</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento $\emptyset = 9.525 \text{ mm}$ .....	148
<b>Figura 116</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento $\emptyset = 12 \text{ mm}$ .....	149
<b>Figura 117</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento Configuración 01 .....	150
<b>Figura 118</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento Configuración 02 .....	150
<b>Figura 119</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento Configuración 03 .....	151
<b>Figura 120</b> Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento del modelo calibrado .....	151
<b>Figura 121</b> Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en la resistencia a compresión por carga .....	152
<b>Figura 122</b> Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en la resistencia a compresión por desplazamiento. ....	153

<b>Figura 123</b> Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en el refuerzo de acero por carga.....	153
<b>Figura 124</b> Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en el refuerzo de acero por desplazamiento.....	154
<b>Figura 125</b> Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en la configuración de esferas por carga. ....	154
<b>Figura 126</b> Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en la configuración de esferas por desplazamiento. ....	155
<b>Figura 127</b> Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero de las variaciones en la resistencia a compresión por carga. ....	155
<b>Figura 128</b> Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero de las variaciones en la resistencia a compresión por desplazamiento. ....	156
<b>Figura 129</b> Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero de las variaciones en el refuerzo de acero por carga.....	156
<b>Figura 130</b> Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero de las variaciones en el refuerzo de acero por desplazamiento.....	157
<b>Figura 131</b> Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero en las variaciones de configuración de esferas por carga. ....	157
<b>Figura 132</b> Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero en las variaciones de configuración de esferas por desplazamiento. ....	158
<b>Figura 133</b> Resultados en el punto de carga última de las variaciones en la resistencia a compresión por carga. ....	158
<b>Figura 134</b> Resultados en el punto de carga última de las variaciones en la resistencia a compresión por desplazamiento.....	159

<b>Figura 135</b> Resultados en el punto de carga última de las variaciones en el refuerzo de acero por carga.....	159
<b>Figura 136</b> Resultados en el punto de carga última de las variaciones en el refuerzo de acero por desplazamiento. ....	160
<b>Figura 137</b> Resultados en el punto de carga última de las variaciones en la configuración de esferas por carga. ....	160
<b>Figura 138</b> Resultados en el punto de carga última de las variaciones en la configuración de esferas por desplazamiento. ....	161
<b>Figura 139</b> Modelo experimental / Modelo numérico desplazamiento. ....	169
<b>Figura 140</b> Modelo experimental / Modelo numérico carga. ....	170
<b>Figura 141</b> Curvas de carga desplazamiento obtenidas de las simulaciones.....	172
<b>Figura 142</b> Resultados / Punto de rotura del concreto – Carga .....	173
<b>Figura 143</b> Resultados / Punto de rotura del concreto – Desplazamiento .....	174
<b>Figura 144</b> Resultados / Punto de fluencia del refuerzo de acero – Carga .....	174
<b>Figura 145</b> Resultados / Punto de fluencia del refuerzo de acero – Desplazamiento.....	175
<b>Figura 146</b> Resultados / Carga última – Carga.....	175
<b>Figura 147</b> Resultados / Carga última – Desplazamiento.....	176

## Índice de anexos

<b>Anexo 1 - Matriz de consistencia .....</b>	<b>193</b>
<b>Anexo 2 - Matriz de Operacionalización de variables.....</b>	<b>194</b>

## I. Introducción

La limitada investigación sobre nuevos diseños de losas aligeradas constituye una restricción relevante para el desarrollo de la construcción de viviendas a nivel internacional; esta problemática se manifiesta de manera significativa en el contexto peruano. A pesar de los avances tecnológicos y de los nuevos materiales disponibles en la industria de la construcción, la innovación en el diseño de losas aligeradas ha sido insuficiente, lo que ha derivado en la subutilización de sistemas constructivos más eficientes, sostenibles y seguros.

Según el Banco Mundial (2018), Centroamérica atraviesa un proceso de transformación caracterizado por el acelerado crecimiento de sus ciudades. Actualmente, el 59 % de la población reside en áreas urbanas, y se proyecta que, en la próxima generación, esta proporción alcance el 70 %, lo que representa un incremento anual aproximado de 700 000 personas en las zonas urbanas. De mantenerse esta tendencia, se estima que para el año 2050 la población urbana se duplicará, incorporando más de 25 millones de nuevos habitantes. Este crecimiento generará una creciente demanda de infraestructura de calidad, expansión y mejora de los servicios urbanos, así como la creación de mayores y mejores oportunidades laborales.

De acuerdo con datos de la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2021), el sector de la edificación es responsable de aproximadamente el 40 % del consumo energético global. En este contexto, la escasa investigación en sistemas constructivos innovadores incide negativamente en la eficiencia energética de las viviendas. La implementación de diseños más eficientes en losas aligeradas podría contribuir de manera significativa a la reducción de dicho consumo. En el caso peruano, se han evidenciado avances importantes en la construcción de viviendas durante las últimas décadas, especialmente en áreas urbanas. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2020), entre los años 2010 y

2020 el porcentaje de hogares que habitan en viviendas propias aumentó de 61,5 % a 67,8 %, lo que refleja un progreso notable en el acceso a la vivienda.

De acuerdo con la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO, 2021), el sector de la construcción de viviendas constituye un pilar fundamental para el desarrollo económico y social del país, debido a su capacidad para generar empleo, ingresos y demanda de materiales, además de contribuir al bienestar de la población. Durante el año 2021, este sector registró un crecimiento del 35 %, impulsado por el incremento de la inversión privada (38 %) y pública (24 %), así como por el significativo aumento en la colocación de créditos hipotecarios (67 %), principalmente orientados a la vivienda social. No obstante, el sector enfrenta diversos retos y oportunidades, entre los que destaca la necesidad de introducir innovaciones y optimizar los sistemas constructivos, especialmente en las losas aligeradas, ampliamente utilizadas en edificaciones de vivienda.

Bendezú (2017) señala que la construcción constituye un indicador clave del desarrollo económico de un país, dado que no solo genera empleo aproximadamente 111 millones de trabajadores a nivel global, sino que también mantiene una estrecha relación con la inversión y el desempeño económico, reflejado en el aumento o disminución de la superficie construida. En este sentido, el sector de la construcción cumple un rol esencial en la difusión del crecimiento económico nacional. En los países en desarrollo, se estima que esta actividad contribuye entre el 3 % y el 5 % del Producto Interno Bruto (PIB); sin embargo, también es reconocida como una de las industrias con mayor impacto en la degradación de los recursos ambientales y naturales.

## II. Planteamiento del problema

### 2.1. Descripción y formulación del problema

#### Descripción

El sector de la edificación residencial desempeña un papel fundamental en la búsqueda de la sostenibilidad a nivel global, debido a que concentra una proporción significativa del consumo de recursos naturales, la generación de residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero. De acuerdo con el informe de la Alianza Global para los Edificios y la Construcción (Global ABC, 2021), este sector debe reducir sus emisiones en aproximadamente un 90 % para el año 2050, a fin de cumplir con los compromisos establecidos en el Acuerdo de París. El logro de este objetivo exige una transformación profunda de los procesos de diseño, construcción y mantenimiento de las edificaciones, incorporando principios de eficiencia energética, el uso de materiales renovables y reciclados, así como estrategias orientadas a la minimización de los impactos ambientales y sociales.

Las losas aligeradas constituyen un sistema estructural ampliamente utilizado en la construcción de viviendas, principalmente por su bajo costo, facilidad de ejecución y adaptabilidad a diversas configuraciones geométricas. No obstante, este sistema presenta limitaciones y desafíos relevantes, tales como el elevado consumo de concreto y acero, un peso propio considerable, una resistencia limitada a la flexión y la insuficiente investigación orientada al desarrollo de nuevos diseños y materiales que optimicen su comportamiento, respuesta estructural y sostenibilidad. En este contexto, estudios como el de Torres y Pérez (2019) destacan la importancia del empleo de losas aligeradas en edificaciones de vivienda sismorresistentes ubicadas en zonas de alta actividad sísmica, como el Perú. Los autores señalan que la aplicación de este tipo de losas contribuye a reducir los daños estructurales durante eventos sísmicos, permitiendo salvaguardar la integridad física de los ocupantes y la protección de sus bienes.

Asimismo, investigaciones como la de Sánchez et al. (2020) han analizado las implicancias socioeconómicas de la implementación de losas aligeradas en proyectos de vivienda social en el Perú. Los resultados de dicho estudio indican que la adopción de estas tecnologías puede generar una reducción significativa de los costos de construcción y, al mismo tiempo, mejorar el acceso a viviendas de calidad para sectores de la población con menores recursos económicos.

### **Formulación del problema de investigación**

Las losas aligeradas constituyen un elemento fundamental en la construcción de edificaciones, debido a su capacidad portante y a su amplia aplicación en sistemas estructurales de entresijos. No obstante, la limitada investigación en tecnologías avanzadas de aligeramiento ha restringido su uso, en la mayoría de los casos, a sistemas convencionales. Sin embargo, existen alternativas tecnológicas que ofrecen un mejor desempeño estructural, permiten una reducción significativa en el consumo de concreto y presentan mayores niveles de sostenibilidad, al emplear materiales reciclables.

Frente a estas limitaciones, surge la necesidad de emplear herramientas analíticas avanzadas, como el método de los elementos finitos, con el objetivo de calibrar un modelo experimental de losas tipo BubbleDeck. A partir de dicha calibración, es posible modificar parámetros asociados a la configuración y disposición de las esferas, así como al refuerzo de acero, con la finalidad de evaluar su capacidad resistente y analizar la sensibilidad estructural de los modelos seleccionados. Este análisis se realiza mediante simulaciones numéricas desarrolladas en el software ABAQUS, el cual se fundamenta en el método de los elementos finitos. En este contexto, se plantean los siguientes problemas de investigación:

### **Problema general**

- ¿En qué medida un análisis de sensibilidad en la respuesta estructural de losas Bubbledeck permitirá evaluar la variación de resultados en la configuración de esferas y el refuerzo de acero, mediante el método de elementos finitos, en Abancay–Apurímac, 2024?

### **Problemas específicos**

- ¿En qué medida la validación de un modelo numérico a partir de un ensayo experimental permitirá representar la respuesta estructural en capacidad para variaciones de resistencia, variaciones de refuerzo de acero y variación en la configuración de esferas de losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos, en Abancay–Apurímac, 2024?
- ¿De qué manera la realización de simulaciones numéricas permitirá evaluar la respuesta estructural en capacidad para variaciones de resistencia, variaciones de refuerzo de acero y variación en la configuración de esferas de losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024?
- ¿Cómo la evaluación de la influencia en capacidad para variaciones de resistencia, variaciones de refuerzo de acero y variación en la configuración de esferas permitirá analizar la respuesta estructural de losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024?

## **2.2. Objetivos**

### **2.2.1. Objetivo General**

- Analizar la sensibilidad de la respuesta estructural de losas Bubbledeck ante variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero, mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024.

### 2.2.2. *Objetivos Específicos*

- Validar un modelo numérico a partir de un ensayo experimental que represente la respuesta estructural en capacidad para variaciones de resistencia, variaciones de refuerzo de acero y variación en la configuración de esferas de losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024.
- Realizar simulaciones numéricas para evaluar la respuesta estructural de losas Bubbledeck en capacidad para variaciones de resistencia, variaciones de refuerzo de acero y variación en la configuración de esferas mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024.
- Determinar la influencia en la respuesta estructural para capacidad en variaciones de resistencia, variaciones de refuerzo de acero y variación en la configuración de esferas en losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024.

### 2.3. **Justificación e importancia**

#### **Justificación**

Con los avances en la actualidad surgen nuevos sistemas y procesos en la construcción como Bubbledeck, un sistema innovador de una losa aligerada debido a que se incorpora en ella vacíos esféricos, que busca mejorar la eficiencia estructural en losas aligeradas.

En la ciudad de Abancay, los diseños de losas aligeradas se centran en la losa nervada y en la losa unidireccional de ladrillo de arcilla, generando procesos constructivos con retrasos, excesivos costos y mano de obra, además de no ser amigable con el medio ambiente, el presente proyecto de investigación nos llevará al diseño de una losa aligerada incorporando vacíos esféricos en el concreto armado, produciendo mayores resistencias a la flexión,

compresión , punzonamiento y esfuerzos cortantes que se producen; generando mejoras en el comportamiento y la respuesta estructural pues una cualidad de este diseño es la ampliación de luces, ya que actúan como losas macizas, reducen los apoyos intermedios y aumentan la distancia entre vigas principales y secundarias, además de su fácil armado y puesto en obra, su colocación requiere de personal calificado, reduciendo y optimizando tiempos en construcción y mano de obra. El diseño de la losa aligerada con este sistema es con materiales reciclados que contribuyen a la no depredación del ambiente.

En el ámbito de construcción, el desperdicio y la mala distribución de recursos ya sean mano de obra o materiales, genera un impacto negativo significativo. Esta problemática no solo daña al ambiente, también afecta en los plazos de ejecución y costos en los proyectos. Por lo tanto, es crucial maximizar la utilización de todos los agentes y recursos involucrados en la construcción para abordar esta situación; la incorporación de esferas huecas de polietileno dentro de la losa disminuye significativamente su peso propio, lo que resulta en estructuras más livianas en comparación con las convencionales de concreto. Esta reducción de peso puede disminuir los costos de construcción y simplificar los requisitos de cimentación.

La disposición estratégica de las esferas plásticas dentro de la losa favorece una utilización más eficiente de los materiales constructivos, como el concreto y el acero de refuerzo. Esto optimiza el aprovechamiento de los recursos, reduciendo su consumo y generando beneficios tanto ambientales como económicos. Pese a su menor peso, las losas Bubbledeck conservan una elevada capacidad portante gracias a la presencia de refuerzo de acero en sus zonas superior e inferior. Esta combinación de materiales permite que dichas losas soporten cargas significativas y ofrezcan una mayor resistencia al corte por punzonamiento y al pandeo, en comparación con las losas tradicionales.

Gracias a su diseño modular y ligero, las losas Bubbledeck pueden ser instaladas con mayor rapidez que las losas tradicionales de concreto, lo que agiliza el proceso constructivo y disminuye los plazos de ejecución del proyecto, generando así ahorros significativos en tiempo y costos de mano de obra. Además, este tipo de losas proporciona una mayor libertad en el diseño arquitectónico, ya que permite cubrir amplias luces sin requerir columnas intermedias. Esta característica posibilita la creación de espacios interiores más amplios, flexibles y funcionales, mejorando al mismo tiempo la estética general de las edificaciones.

### **Importancia**

La presente investigación adquiere relevancia por la limitada cantidad de estudios enfocados en las losas Bubbledeck tanto en la provincia de Abancay como en el Perú, especialmente aquellos que emplean el método de elementos finitos. Esta carencia de investigaciones dificulta la obtención de información técnica sobre el diseño de losas aligeradas con dicho sistema, ya que no se dispone de datos experimentales que permitan analizar su comportamiento estructural ante cargas que conduzcan a la falla del elemento. En este contexto, la tesis pretende cubrir dicha brecha, aportando información sobre la sensibilidad de la respuesta estructural de este tipo de losas aligeradas, lo que constituye un recurso valioso para los ingenieros civiles de la región y promueve la adopción y aplicación del sistema Bubbledeck en el diseño estructural.

## **2.4. Hipótesis**

### **Hipótesis general**

- El análisis de sensibilidad en la respuesta estructural de losas Bubbledeck permite identificar la variación de los resultados ante cambios en la configuración de esferas y el refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024.

### **Hipótesis específicas**

- La validación de un modelo numérico a partir de un ensayo experimental permite representar la respuesta estructural en capacidad para variaciones de resistencia, variaciones de refuerzo de acero y variación en la configuración de esferas de losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024.
- La realización de simulaciones numéricas permite evaluar la respuesta estructural de losas Bubbledeck en capacidad para variaciones de resistencia, variaciones de refuerzo de acero y variación en la configuración de esferas mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024.
- La determinación de la influencia en capacidad para variaciones de resistencia, variaciones de refuerzo de acero y variación en la configuración de esferas permite evaluar la respuesta estructural en losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos en Abancay, Apurímac, 2024.

## 2.5. Variable

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento de medición	Escala de Medición
<b>Variable Independiente:</b> Configuración de esferas y refuerzo de acero	<b>Configuración de esferas:</b> Según López, García, & Martínez (2018), la configuración de esferas Bubbledeck en construcción es un método innovador que implica la colocación de esferas huecas de polipropileno en una disposición específica dentro de losas de concreto armado. Estas esferas actúan como elementos de relleno, reduciendo el peso propio de la losa sin comprometer su resistencia estructural. Esta técnica mejora la eficiencia del diseño estructural al disminuir el consumo de concreto y acero, al tiempo que reduce los costos y facilita la instalación en su construcción.	<p>La configuración de esferas se refiere a la disposición y distribución específica de las esferas dentro de una estructura, especialmente en sistemas de losas aligeradas como el sistema Bubbledeck. En este contexto, las esferas se utilizan para reducir el peso de la losa, mejorando su capacidad de carga y eficiencia material. La configuración de esferas abarca tanto su tamaño como su ubicación en la losa, lo cual impacta directamente en el comportamiento estructural y la distribución de esfuerzos dentro de la losa. (Smith, 2019)</p> <p>El refuerzo de acero se refiere a las barras o mallas de acero utilizadas en el concreto para mejorar su resistencia a la tracción y aumentar su capacidad de carga. Este refuerzo se dispone de acuerdo con el diseño estructural, y su propósito es prevenir el agrietamiento o fallo del concreto, especialmente cuando está sometido a esfuerzos de tensión. El refuerzo de acero se integra en las losas, vigas y otras estructuras de concreto armado para garantizar su estabilidad y durabilidad bajo diversas condiciones de carga. (Gutiérrez, 2015)</p>	Distribución de esferas	Disposición de esferas	Modelo computacional	<b>Planos computacionales</b>  <b><math>\Phi</math> área del refuerzo de acero mm<sup>2</sup></b>
	<b>Refuerzo de Acero:</b> Según Serrano, (2020), el refuerzo de acero en construcción se refiere al proceso de incorporar barras o mallas de acero dentro de elementos de concreto, como columnas, vigas y losas, con el propósito de mejorar su resistencia a la tracción y proporcionar estabilidad estructural. Este refuerzo de acero ayuda a distribuir las cargas estructurales de manera más uniforme, reduciendo así el riesgo de falla por fractura o deformación excesiva.	<p>La respuesta estructural hace referencia al comportamiento de una estructura frente a las cargas aplicadas, considerando la deformación, las tensiones internas y las posibles fallas que puedan surgir debido a esas cargas. Este concepto abarca tanto la resistencia como la rigidez de la estructura ante diferentes condiciones de carga, ya sean estáticas o dinámicas, y su capacidad para retornar a su estado original o adaptarse a las alteraciones causadas por las mismas. (Sánchez, 2018)</p>	Capacidad para variaciones de resistencia	Capacidad para variaciones de refuerzo de acero	Diámetro del refuerzo de acero	Curva de carga / desplazamiento
<b>Variable Dependiente:</b> Respuesta estructural	<b>Respuesta estructural:</b> Se refiere a cómo una estructura reacciona ante las cargas o fuerzas que se le aplican, abarcando aspectos como desplazamientos, deformaciones, tensiones y otros efectos relacionados. Este término es crucial para garantizar la seguridad, estabilidad y desempeño de las construcciones bajo diversas condiciones de carga. (McCormac, 2015).		Capacidad para variación en la configuración de esferas	Punto de rotura del concreto, Punto de fluencia del refuerzo de acero, Carga última		

*Nota: Matriz de Operacionalización de variables.* Fuente: El autor.

### **III. Marco teórico**

#### **3.1. Antecedentes**

Reyes (2022), en su tesis de pregrado titulada “Estudio comparativo respecto al análisis y diseño entre una losa maciza de hormigón armado y una losa aligerada con esferas de polietileno de alta densidad”, tuvo como objetivo evaluar las propiedades estructurales de un sistema de aligeramiento de losas conocido internacionalmente como BubbleDeck, en comparación con el sistema convencional de losa maciza de hormigón armado. La comparación se realizó a partir de información recopilada de documentos científicos, normativas técnicas vigentes y recomendaciones de fabricantes de losas BubbleDeck.

Para el desarrollo del estudio, se modelaron tres losas aligeradas y, de manera comparativa, tres losas macizas de iguales dimensiones, utilizando el software SAP2000 versión 21. El análisis de las propiedades estructurales incluyó el cálculo del refuerzo correspondiente al estado límite último, así como la verificación de diversos estados límite de servicio, tales como la deflexión y la fisuración, conforme a los criterios establecidos en las normas ACI 318-19 y ACI 224R-01, respectivamente.

Los resultados obtenidos evidenciaron un comportamiento estructural muy similar entre ambos sistemas, destacándose una reducción significativa en el volumen de hormigón empleado en las losas BubbleDeck, con un promedio aproximado del 34 %. No obstante, este sistema presenta limitaciones en la configuración de la armadura debido a la disposición de las esferas, lo que genera una sobreestimación del acero requerido. En términos de deflexión, las losas BubbleDeck mostraron una ventaja apreciable únicamente en los paños con mayores luces.

Mahdi y Mohammed (2021), en su artículo científico titulado “Experimental and Numerical Analysis of Bubbles Distribution Influence in BubbleDeck Slab under Harmonic Load Effect”, establecieron como objetivo estudiar, tanto de forma experimental como

numérica, el comportamiento estructural de losas de hormigón armado tipo BubbleDeck sometidas al efecto de cargas armónicas. Para ello, se empleó como muestra una losa BubbleDeck de geometría cuadrada, con dimensiones de 2 500 mm × 2 500 mm × 200 mm, que incorporaba burbujas uniformemente distribuidas de 120 mm de diámetro y una separación de 160 mm entre centros (c/c). Dicho espécimen fue sometido experimentalmente a la acción de una carga armónica, complementándose el estudio con un análisis numérico desarrollado mediante el software ABAQUS.

Los resultados obtenidos a partir del modelo numérico adoptado mostraron una concordancia aceptable con los resultados experimentales. El análisis numérico del efecto de la distribución de las burbujas se llevó a cabo considerando una losa BubbleDeck bidireccional sometida a carga armónica, a partir del modelo numérico evaluado. Se analizaron dos configuraciones en las que la distribución de las burbujas mantuvo libres de aligeramiento las zonas críticas de la losa, permitieron concluir que la distribución de las burbujas influye de manera significativa en el comportamiento estructural del sistema. En particular, se observó que la respuesta máxima de la probeta con distribución optimizada no superó los 0,5 mm, mientras que la probeta con distribución uniforme de burbujas (Modelo I) alcanzó una deflexión de hasta 1,0 mm durante los primeros 0,2 s del tiempo de aplicación de la carga. Asimismo, se evidenció que la duración del tiempo de carga tiene un efecto significativo en la reducción de la fuerza durante el proceso de carga.

De acuerdo con Pimentel et al. (2021), en su artículo científico titulado “BubbleDeck: inovação, sustentabilidade e custo-benefícios no sistema construtivo de lajes BubbleDeck”, plantearon como objetivo presentar el sistema de losa BubbleDeck, de origen danés, como una alternativa innovadora frente a las losas tradicionales de hormigón armado. Este sistema se caracteriza por la incorporación de esferas plásticas distribuidas uniformemente entre mallas de acero, generando vacíos en el interior de la losa y eliminando el volumen de

hormigón que no cumple una función estructural, lo que da lugar a un elemento más ligero y eficiente desde el punto de vista estructural.

Los resultados del estudio, obtenidos a partir de una comparación con losas convencionales y presentados en el canal *Calculistas Club* (2021), evidenciaron reducciones significativas en diversos aspectos del proceso constructivo: 67 % en el uso de apuntalamientos, 95 % en el empleo de encofrados, 69 % en la cantidad total de concreto colocado in situ y 41 % en el costo total asociado a los pórticos estructurales. Asimismo, la obra analizada se ejecutó en dos turnos de trabajo, con jornadas de 19 horas diarias, alcanzando una producción aproximada de 1 200 m<sup>2</sup> en un período de 4,5 días, lo que equivale a un rendimiento estimado de 6 857 m<sup>2</sup> por mes durante un período total de ejecución de siete meses.

En este contexto, el sistema constructivo de losas con burbujas presentó resultados satisfactorios en términos de eficiencia constructiva, sostenibilidad y viabilidad económica, consolidándose como una alternativa técnicamente viable frente a los sistemas tradicionales de losas de hormigón armado.

Sagadevan (2020), en su tesis doctoral titulada “*Studies on Structural Behaviour of Biaxial Voided Slab under Flexure and Punching Shear*”, tuvo como objetivo analizar el comportamiento estructural a flexión, tanto unidireccional como bidireccional, de sistemas de losas huecas biaxiales. Para ello, se emplearon diez probetas a escala real, las cuales fueron sometidas a ensayos experimentales de flexión. De estas, cuatro muestras se evaluaron bajo flexión unidireccional y seis bajo flexión bidireccional.

La rigidez a flexión se estimó a partir del módulo de sección efectivo, considerando la presencia de los huecos, y se comparó con los resultados obtenidos de las observaciones experimentales. Asimismo, la capacidad correspondiente a las etapas de fisuración inicial, fluencia del refuerzo y falla final se determinó mediante el análisis de líneas de fluencia, en

concordancia con los lineamientos establecidos en las normas IS 456 (2000) y ACI 318 (2019). Los valores de capacidad obtenidos fueron contrastados con los resultados experimentales.

En el caso de la flexión bidireccional, los resultados experimentales se basaron tanto en datos disponibles en la literatura, correspondientes a siete muestras, como en los obtenidos en el presente estudio, que incluyó cinco muestras adicionales. Dichos resultados fueron comparados con las estimaciones derivadas del análisis de líneas de fluencia.

Adicionalmente, se investigó la influencia de la acción de tracción de membrana y la orientación del refuerzo sobre la capacidad última a flexión de las losas huecas biaxiales.

Según De Oliveira (2020), en su artículo científico titulado “Lajes BubbleDeck: um comparativo com o sistema construtivo de lajes maciças”, estableció como objetivo analizar los espesores mínimos del sistema de losas BubbleDeck y compararlos con los espesores mínimos de losas macizas convencionales, con la finalidad de verificar la cantidad de materiales empleados y su correspondiente costo. El análisis estructural de las losas se realizó mediante el software CypeCAD, mientras que la evaluación de costos se llevó a cabo utilizando hojas de cálculo proporcionadas por el Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI).

La muestra del estudio correspondió a un edificio ubicado en la ciudad de Formiga, en el estado de Minas Gerais, Brasil, con un área construida de 241,8 m<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos indicaron que la cantidad de concreto empleada en una losa tipo BD230 — correspondiente al espesor mínimo habitual del sistema BubbleDeck— es aproximadamente un 20,27 % mayor en comparación con una losa maciza convencional de 10 cm de espesor. Este incremento se explica por los espacios existentes entre las esferas y las masas de concreto requeridas en las zonas críticas por efectos de corte, las cuales resultan suficientes para superar el volumen de concreto de la losa maciza.

Asimismo, se observó una menor discrepancia en el caso de la losa BD285, presentando un consumo de concreto aproximadamente un 17,66 % mayor respecto a la losa maciza equivalente. En contraste, el sistema BD340 evidenció el mayor consumo de hormigón en comparación con una losa maciza de 200 mm de espesor, alcanzando un incremento cercano al 22,5 %, lo cual se atribuye a los espesores mínimos característicos de esta tecnología constructiva.

Según Triviño (2019), en su tesis de pregrado titulada “Edificio de servicios académicos UCSG”, tuvo como objetivo principal diseñar el edificio de servicios académicos de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. La investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico descriptivo y explicativo. La muestra seleccionada correspondió al área de servicios académicos de dicha universidad, la cual incluyó el análisis de una losa de 15,30 m × 8,80 m ubicada en el patio de comidas, así como una losa de 14,70 m × 5,20 m correspondiente a un salón multiuso, ambas apoyadas sobre pilares cuadrados de 0,30 m × 0,30 m, con refuerzos centrales.

Los resultados del estudio evidenciaron la eficiencia del sistema BubbleDeck en la conformación de losas para grandes espacios libres de apoyos intermedios, destacándose su adecuada resistencia estructural. Este comportamiento se atribuye a la utilización de una doble malla electrosoldada y esferas plásticas que actúan como elementos aligerantes, permitiendo una reducción significativa del peso propio de la estructura. Asimismo, el autor señala que este sistema constructivo ya ha sido aplicado con éxito en diversos proyectos desarrollados en Europa.

Blas y Luna (2023), en su tesis de pregrado titulada “Propuesta de diseño de losas aligeradas en edificaciones con esferas de Prenova en la ciudad de Huaraz, Perú”, establecieron como objetivo presentar una alternativa innovadora para el diseño de losas aligeradas mediante el uso de esferas de Prenova aplicadas a edificaciones ubicadas en la

ciudad de Huaraz. La investigación fue de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo y un diseño descriptivo, transversal y no experimental, tomando como referencia un edificio que incorpora losas con esferas de Prenova en un área total de 248 m<sup>2</sup>.

Los resultados fueron, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Norma Técnica E.060, el diseño preliminar determinó un espesor de losa de 23 cm y una carga muerta de 370 kg/m<sup>2</sup> para las losas con esferas de Prenova, en comparación con los 300 kg/m<sup>2</sup> correspondientes a las losas convencionales. Asimismo, las dimensiones estructurales consideradas en el estudio incluyeron columnas de 40 × 40 cm (C-1), 30 × 30 cm (C-2) y 45 × 45 cm (C-3); placas estructurales de 120 × 25 cm; vigas principales de 45 × 45 cm y vigas secundarias de 35 × 20 cm.

Finalmente, el análisis económico evidenció una diferencia de costos de S/ 44 002,39, lo cual demuestra que la implementación del sistema de losas aligeradas con esferas de Prenova genera una variación económica significativa, por lo que su aplicación requiere un sustento técnico y económico debidamente fundamentado.

Rueda y Jiménez (2021), en su tesis de pregrado titulada “Análisis y diseño estructural comparativo de una edificación de concreto armado de cuatro pisos utilizando losas BubbleDeck y losa aligerada en la ciudad de Tacna”, tuvieron como objetivo realizar un análisis estático y dinámico, así como un diseño estructural comparativo entre dos sistemas de losas: la losa aligerada tradicional y la losa BubbleDeck. El estudio se aplicó a un edificio de cuatro niveles ubicado en el distrito Coronel Gregorio Albarracín Lanchipa, avenida Humboldt B1, sobre un terreno con un área de 3 105,48 m<sup>2</sup>.

Los autores evidenciaron ventajas estructurales y económicas del sistema BubbleDeck frente a los métodos convencionales. Durante el proceso de análisis y diseño, se efectuó el predimensionamiento de los elementos estructurales conforme a la literatura especializada y a los lineamientos establecidos en la Norma Técnica E.060. Posteriormente, la estructura fue

modelada en el software ETABS, aplicándose las cargas de acuerdo con la Norma E.020 y verificándose las derivas intermedias conforme a la Norma E.030 de diseño sismorresistente. Una vez comprobado que las derivas se encontraban dentro de los límites permisibles, se procedió al diseño definitivo de los elementos estructurales. Dado que el estudio se centró exclusivamente en los aspectos estructurales y económicos, no se consideraron los detalles arquitectónicos ni las instalaciones sanitarias y eléctricas. Finalmente, se realizó una comparación sísmica, estructural y económica entre ambos sistemas de losas, destacando las fortalezas y limitaciones de cada uno.

De acuerdo con Solórzano (2022), en su tesis de pregrado titulada “Diseño de estructuras de hormigón armado sin vigas, aligeradas mediante el sistema BubbleDeck en una vivienda de cuatro pisos en la ciudad de Huaraz”, planteó como objetivo desarrollar el diseño estructural de una edificación de cuatro niveles, empleando hormigón armado y el sistema BubbleDeck sin vigas. La investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado, con un diseño no experimental y de tipo transversal.

Se evaluó el comportamiento sísmico de una edificación de cuatro pisos que incorporó el sistema BubbleDeck y lo comparó con el desempeño de una estructura convencional, utilizando el software SAP2000 para el análisis estructural. Los resultados evidenciaron que el modelo con BubbleDeck presentó una carga sísmica de 145,82 toneladas y una carga axial por columna de 17,72 toneladas, así como valores de cortante y momento de 0,33 y 0,48, respectivamente, y un desplazamiento máximo de 6,60 mm. En contraste, el modelo convencional registró una carga sísmica de 157,64 toneladas, la misma carga axial por columna (17,72 toneladas), valores de cortante y momento de 1,53 y 2,39, respectivamente, y un desplazamiento de 6,11 mm.

Asimismo, se realizó una comparación económica entre ambos sistemas estructurales, obteniéndose un costo por metro cuadrado de S/ 290,33 para losas BubbleDeck con vigas, S/

279,38 para losas convencionales con vigas, S/ 205,30 para losas BubbleDeck sin vigas y S/ 257,86 para losas convencionales sin vigas, considerando una edificación de 5,65 m × 11,90 m y un área total de 67,24 m<sup>2</sup>. En conclusión, el sistema BubbleDeck demostró un mejor desempeño estructural en comparación con el sistema tradicional, además de ofrecer ventajas relevantes en términos de eficiencia estructural y economía constructiva.

Meza y Martell (2019), en su tesis de pregrado titulada “Evaluación técnica y económica entre los sistemas prefabricados de losa con viguetas VigaCero y losa con viguetas pretensadas en un edificio multifamiliar en el distrito de Surquillo”, tuvieron como objetivo realizar un análisis comparativo, tanto técnico como económico, de los sistemas de losas prefabricadas empleados en entresijos, específicamente las losas con viguetas tipo VigaCero y las losas con viguetas pretensadas.

La investigación se desarrolló bajo una metodología descriptiva y experimental. La muestra seleccionada fue de carácter no probabilístico y correspondió a una edificación multifamiliar de catorce niveles ubicada en el distrito de Surquillo. La población de estudio estuvo conformada por edificaciones de la región Lima destinadas a vivienda y/o uso de oficinas, construidas bajo sistemas estructurales apertados o de albañilería confinada, que incorporaran losas aligeradas en su sistema constructivo.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la implementación del sistema VigaCero presenta mayores beneficios en el ámbito económico en comparación con el sistema de losa aligerada con viguetas pretensadas Techomax, destacándose como una alternativa más eficiente desde el punto de vista de costos.

Luna (2019), en su tesis de pregrado titulada “Diseño estructural de un edificio de concreto armado multifamiliar de seis pisos sin sótanos”, tuvo como objetivo desarrollar el diseño estructural de un edificio multifamiliar, garantizando que la planificación del proyecto

se encontrara debidamente articulada con el análisis estructural y sísmico de los principales elementos, tales como losas, vigas, columnas, placas y zapatas.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo y experimental. El objeto de estudio estuvo conformado por un complejo residencial compuesto por dos edificios de seis niveles cada uno. El análisis consideró estructuras ubicadas en la provincia de Lima destinadas a vivienda y oficinas, tanto de sistema aporticado como de albañilería estructural confinada, que emplearan exclusivamente losas aligeradas en los entrepisos.

Como resultados, el autor obtuvo formulaciones, procedimientos y criterios técnicos que permitieron el adecuado diseño estructural de la edificación, los cuales fueron plasmados en planos estructurales detallados para su correcta aplicación en obra. Asimismo, se definieron las secciones y refuerzos correspondientes a cada elemento estructural, incorporando detalles constructivos que facilitan la comprensión e interpretación del diseño estructural propuesto.

Quino (2019), en su tesis de pregrado titulada “Optimización de concreto en losas aligeradas en la construcción de viviendas mediante la incorporación de vacíos esféricos y la aplicación del sistema Bubbledeck”, estableció como objetivo demostrar que la incorporación de cavidades esféricas en losas de hormigón, a través del sistema Bubbledeck, permite conservar la resistencia estructural mientras se reduce de manera significativa la cantidad de concreto utilizado.

El estudio se enfocó en viviendas típicas de la ciudad de Ayacucho, construidas con materiales de adecuada calidad y provistas de losas aligeradas de hormigón, tanto del sistema Bubbledeck como de losas unidireccionales con ladrillos de arcilla. La metodología empleada se basó en procedimientos sistemáticos, críticos y empíricos, orientados al análisis de un fenómeno constructivo específico.

Los resultados evidenciaron que la incorporación de vacíos esféricos permite modelar las losas como elementos macizos en dos direcciones, manteniendo el mismo espesor, debido a la similitud de su comportamiento estructural. Asimismo, se concluyó que, para garantizar la efectividad del sistema, es recomendable alcanzar una reducción mínima del 33 % del peso propio de la losa y conservar una relación entre las dimensiones de largo y ancho de la luz menor o igual a 2.

## 3.2. Bases teóricas

### 3.2.1. Configuración de esferas *Bubbledeck*

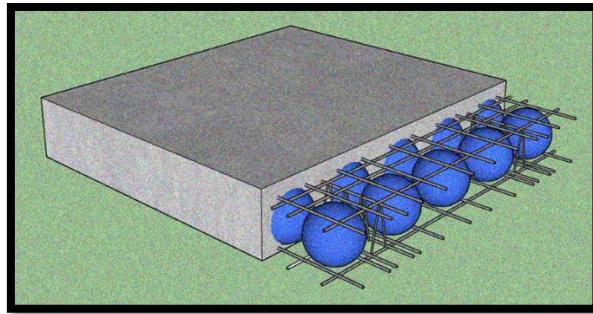
Según López, García y Martínez (2018), la configuración de esferas en el sistema *Bubbledeck* constituye una técnica constructiva innovadora que consiste en la disposición estratégica de esferas huecas de polipropileno dentro de losas de concreto armado. Estas esferas funcionan como elementos de aligeramiento, permitiendo reducir el peso propio de la losa sin afectar de manera significativa su capacidad resistente ni su comportamiento estructural. Esta metodología optimiza el diseño estructural al disminuir el volumen de concreto y la cantidad de acero requerido, lo que se traduce en una reducción de costos y en una mayor eficiencia durante el proceso constructivo.

De manera complementaria, Pimentel et al. (2021) señalan que la correcta configuración y distribución de las esferas *Bubbledeck* es un factor determinante para garantizar un adecuado desempeño estructural, ya que influye directamente en la rigidez, la capacidad portante y la respuesta global de la losa, permitiendo su aplicación eficiente en edificaciones de grandes luces y sistemas estructurales modernos.

De acuerdo a Segura (2017), a partir de la década de los 90s, aparecen nuevos sistemas de losas que enlazan espacios concreto, acero y aire en una losa de bidireccional, obteniendo surgimientos nuevos como el sistema de aligeramiento de losas que tiene por nombre *Bubbledeck*. El ingeniero de procedencia alemana Jorge Breuning creó la patente de este sistema y de la cual son notorias las propiedades: disminución de cargas de peso propio, eliminación de elementos que soportan la estructura y la reducción de peralte de losa que permite una vista plana y que se adapte a cualquier forma geométrica en la estructura. Se muestra en la Figura 3:

## Figura 1

### *Losa Bubbledeck convencional*



*Nota:* La figura muestra una vista interna de una losa Bubbledeck. Elaboración propia.

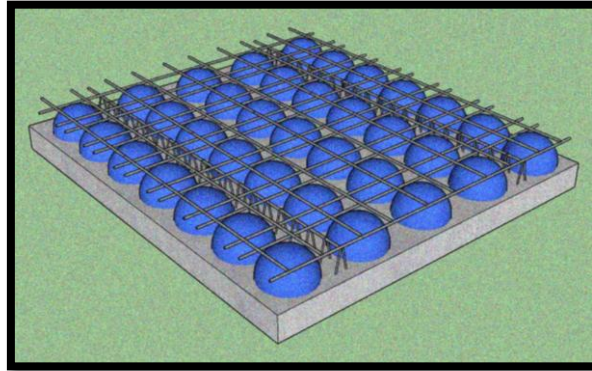
Asimismo, Amaya y Galindo (2015) señalan que las losas Bubbledeck constituyen un sistema estructural de concreto reforzado en losas planas, aligeradas mediante la incorporación de esferas plásticas de polietileno de alta densidad. Este tipo de diseño actúa como una losa rígida con un comportamiento uniforme en cualquier dirección, ya que está concebido de manera que las zonas de tensión y compresión no se vean afectadas por la presencia de los vacíos. De esta forma, los esfuerzos se distribuyen libremente en las tres dimensiones de la estructura, permitiendo un aprovechamiento óptimo del concreto.

### **Características Principales de losas Bubbledeck**

De acuerdo con Segura (2017), el sistema de losas Bubbledeck se caracteriza por una losa plana que se aligera mediante el uso de esferas hechas de plástico reciclado, específicamente polietileno de densidad media. Estas esferas reemplazan partes del concreto que no contribuyen estructuralmente, ubicándose en áreas de menor momento, y no afectan la capacidad de la losa para manejar esfuerzos de compresión y tensión. Esto permite que la losa funcione como si fuera sólida, facilitando la construcción de espacios más amplios entre columnas sin soportes intermedios. Se detalla en la Figura 4:

## Figura 2

### Característica de armado de losa Bubbledeck

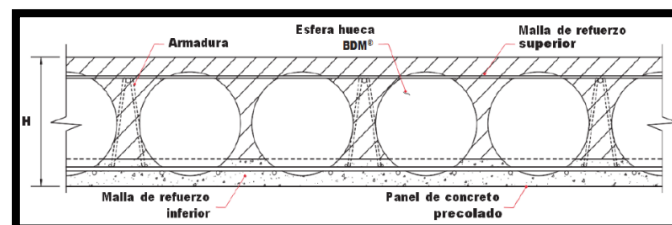


*Nota:* La figura muestra una vista interna de una losa Bubbledeck. Elaboración propia.

El método de producción implica primero la colocación de una malla electrosoldada como refuerzo inferior, seguida por la disposición de las esferas y la armadura, que luego se fijan en su lugar. Finalmente, se coloca una segunda malla electrosoldada en la parte superior, la cual funciona como refuerzo adicional, conformando una estructura de acero que envuelve las esferas. Una vez completado el armado, se procede a vaciar una capa de concreto de 6 cm de espesor sobre el refuerzo inferior, de acuerdo con las especificaciones del diseño. Este concreto se deja fraguar durante 24 horas, dando origen al panel BDM. Se detalla en la Figura 5:

## Figura 3

### Corte típico de losa Bubbledeck



*Nota:* La figura muestra una sección de corte de una losa Bubbledeck. Adaptado de (BDM®)

PARA EDIFICACIONES por Segura García, 2017.

### 3.2.1.1. Distribución de esferas

De acuerdo a Smith (2019), la distribución de esferas en el sistema Bubbledeck hace referencia a la disposición geométrica y estratégica de los elementos esféricos dentro de la losa de concreto armado, con el objetivo principal de reducir el peso propio del elemento estructural y optimizar el uso de materiales. Esta distribución considera tanto el diámetro de las esferas como su espaciado y ubicación dentro de la sección de la losa, aspectos que influyen directamente en la capacidad portante, la rigidez y la correcta transferencia de esfuerzos internos.

En concordancia, Mahdi y Mohammed (2021) señalan que una distribución adecuada de las esferas Bubbledeck resulta determinante para el desempeño estructural de la losa, ya que condiciona su respuesta frente a cargas estáticas y dinámicas, así como su comportamiento ante la flexión y las deformaciones, permitiendo mejorar la eficiencia estructural sin comprometer la seguridad del sistema.

#### **Tipos de losas Bubbledeck**

Las losas Bubbledeck comúnmente presentan 3 tipos los cuales comercialmente son los más usados, estos tipos son:

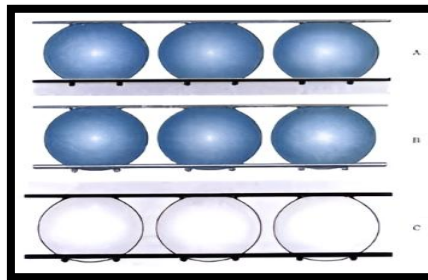
- **Filigree elements / Elementos Filigrana (A):** “Elementos parciales de hormigón prefabricados, los cuales vienen con una delgada franja inferior de hormigón prefabricada, las conexiones entre elementos y sobre hormigonado se vierten in situ” (Mahalakshmi & Nanthini , 2017).
- **Reinforcement Modules/ Módulos de refuerzo (B):** “Consiste en un confinamiento de las esferas por medio de mallas de acero, este módulo se lleva a obra y se coloca en los encofrados tradicionales, se conectan con cualquier refuerzo adicional y se hormigona por medio de los métodos tradicionales” (Mahalakshmi & Nanthini , 2017).

- **Finished Plank/ Placa Terminada (C):** “La placa terminada es un módulo fabricado en taller que incluye las esferas de plástico, la malla de refuerzo y el hormigón en su formato terminado” (Mahalakshmi & Nanthini , 2017).

La figura 6 detalla la configuración de las losas descritas.

#### Figura 4

*Configuración de losas Bubbledeck*



*Nota:* La figura muestra los tipos de losas Bubbledeck. Adaptado de *Bubble Deck*.

*International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, V(3), por Mahalakshmi & Nanthini , 2017.

#### 3.2.2. Refuerzo de Acero

Según Serrano (2020), el refuerzo de acero en la construcción consiste en la incorporación de barras, varillas o mallas de acero dentro de elementos de concreto armado, tales como vigas, columnas y losas, con la finalidad de incrementar su capacidad resistente frente a esfuerzos de tracción y mejorar su estabilidad estructural. Este refuerzo permite una distribución más eficiente de las cargas actuantes, contribuyendo a controlar la fisuración y a limitar las deformaciones excesivas del elemento estructural. Además, Nilson et al. (2018) señalan que el acero de refuerzo trabaja de forma solidaria con el concreto, aprovechando la elevada resistencia a la compresión de este último y la alta capacidad a tracción del acero, lo que permite que los elementos estructurales presenten un comportamiento dúctil y seguro frente a cargas estáticas y dinámicas.

### **3.2.2.1. Diámetro del refuerzo de acero**

El diámetro del refuerzo de acero corresponde a la dimensión nominal de las barras empleadas en los elementos de concreto armado y constituye un parámetro esencial en el diseño estructural, dado que influye directamente en la capacidad resistente, la ductilidad y el desempeño del elemento frente a esfuerzos de tracción y flexión. Una adecuada selección del diámetro permite optimizar la cuantía de acero y controlar el comportamiento estructural bajo condiciones de carga. Según Nilson et al. (2018), la elección apropiada del diámetro del refuerzo garantiza una eficiente transferencia de esfuerzos entre el acero y el concreto, así como el cumplimiento de los estados límite de resistencia y de servicio exigidos por la normativa estructural vigente. Además, MacGregor (2019) señalan que el uso correcto de los diámetros de refuerzo contribuye a mejorar la adherencia, controlar la fisuración y asegurar un comportamiento dúctil adecuado de los elementos estructurales.

### **3.2.3. Respuesta estructural**

Según McCormac (2015), la respuesta estructural se define como el conjunto de reacciones que experimenta una estructura ante la aplicación de cargas y acciones externas, manifestándose a través de desplazamientos, deformaciones, esfuerzos internos y estados de tensión, los cuales permiten evaluar su comportamiento mecánico. Asimismo, Chopra (2017) indica que el análisis de la respuesta estructural resulta esencial para garantizar la seguridad, estabilidad y adecuado desempeño de las edificaciones frente a condiciones de servicio y eventos extremos, como acciones sísmicas, asegurando el cumplimiento de los criterios normativos de resistencia y funcionalidad.

Para detallar la respuesta estructural del concreto armado se debe tener en cuenta las siguientes propiedades mecánicas del concreto y acero consideradas en la presente tesis.

### **Resistencia a la compresión**

Harmsen (2017) señala que esta propiedad se determina mediante ensayos realizados en probetas cilíndricas estándar de 6 pulgadas (15 cm) de diámetro y 12 pulgadas (30 cm) de altura. Después del moldeo, la muestra permanece en su molde durante 24 horas y luego se sumerge en agua hasta completar 28 días de curado. Posteriormente, se somete a una carga aplicada de manera uniforme a una velocidad de  $2.45 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$  hasta alcanzar la rotura. La resistencia a la compresión se obtiene promediando los resultados de varias probetas elaboradas con la misma mezcla y ensayadas a los 28 días.

### **Resistencia a la Tracción**

Harmsen (2017) explica que la resistencia a la tracción del concreto es significativamente menor que su resistencia a la compresión, representando solo entre el 8% y el 15% de esta. Debido a la complejidad de los ensayos directos para medir dicha propiedad —principalmente por los efectos secundarios generados por los dispositivos de carga—, estos no suelen emplearse. En su lugar, se recurren a métodos indirectos, como la prueba brasileña o ensayo de división por compresión (split test), y la determinación de la resistencia a la tracción mediante ensayos de flexión.

### **Módulo de poisson**

Harmsen (2017) indica que, en el caso del concreto, este valor oscila entre 0.15 y 0.20. Cuando una probeta de concreto es sometida a un esfuerzo de compresión axial, se observa una disminución en su longitud acompañada de una expansión en sentido transversal. Estas deformaciones son mínimas, y la relación entre la deformación longitudinal y la transversal se denomina módulo de Poisson.

### **Módulo de elasticidad**

Harmsen (2017) define el módulo de elasticidad como un parámetro que cuantifica la variación del esfuerzo dentro de la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación del concreto. Este valor refleja la rigidez del material y, por lo general, se determina como la pendiente de dicha curva, la cual se considera una línea recta que parte del origen y llega hasta el punto donde el esfuerzo alcanza aproximadamente el  $0.45f'_c$ . Según diversos estudios, el módulo de elasticidad del concreto puede expresarse mediante la siguiente relación:

$$E_c = 15100 * \sqrt{f'_c}$$

### **Ensayo de resistencia a la flexión**

Siguiendo las normativas para sistemas de cubiertas y pisos intermedios, se efectúan pruebas de flexión mediante el ensayo de carga a los tercios de la longitud de la losa conforme a la norma ASTM C78, la cual es una prueba estructural en la que se aplica una carga concentrada en un punto específico de una losa. Este ensayo se realiza para evaluar la capacidad de la losa para soportar cargas localizadas y para analizar el comportamiento del material bajo una carga concentrada, lo cual es fundamental para entender cómo responderá la losa a condiciones de carga realistas que podrían incluir el impacto de objetos pesados, la carga de maquinaria, o concentraciones de carga en pequeñas áreas.

De acuerdo con Tecnología Bubbledeck (2008) detalla que la capacidad a flexión de este sistema proporciona un sistema de aligerado en general económico y eficiente en la construcción; es ecológico ya que el formador de huecos está hecho de plástico reciclado. Se llevaron a cabo estudios experimentales o analíticos y numéricos para evaluar la capacidad de flexión unidireccional de losas biaxiales con huecos con diferentes formas de formadores de huecos. Estos estudios proporcionaron evidencia de que las losas biaxiales con huecos tienen

una rigidez ligeramente menor y una resistencia similar en comparación con la de las losas sólidas.

Según Valivonis et al. (2014), la losa con cavidades en forma de rosca presentó una capacidad de flexión prácticamente equivalente a la de una losa maciza. Las características del material y la resistencia propia de las cavidades en forma de rosquilla influyen de manera significativa en la resistencia a la flexión de este tipo de losas.

Según Kim et al. (2011), la rigidez a la flexión de la losa con huecos de forma esférica es del 80 al 90 % de la de la losa sólida, sin embargo, la losa con huecos mostró la misma resistencia a la flexión que la de la losa sólida.

Según Lai (2010) Los elementos aligerados se colocan en la zona central, donde el concreto tiene menor participación estructural, mientras que las secciones macizas se disponen en las partes superior e inferior.

Según Lai (2010), las losas Bubbledeck eliminan el concreto no estructural de la sección, sustituyéndolo por esferas huecas de polietileno de alta densidad. Esto permite que el bloque de compresión mantenga un espesor similar al de una losa maciza. En situaciones donde los elementos están sometidos a mayores esfuerzos, el bloque de compresión puede extenderse parcialmente hacia la zona de los vacíos esféricos, siempre que esta extensión no exceda el 20% del volumen ocupado por las esferas, como se muestra en la Figura 7.

**Figura 5**

*Equipo de resistencia a flexión unidireccional*



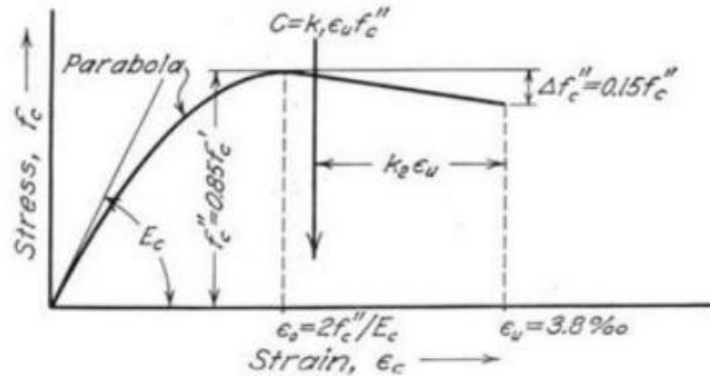
*Nota:* Fotografía de ensayo a flexión. Adaptado de *Efect of void former shapes on one-way flexural behaviour of biaxial hollow slabs*, por R. Sagadevan & N. Rao, 2019.

**Modelo Hognestad**

Según Hognestad (1951), a partir de teorías y planteamientos previos, analizó el modelo propuesto por Stussi (1932) respecto al comportamiento de los elementos estructurales sometidos a flexión y carga axial. Mediante ensayos de compresión concéntrica en concreto, desarrolló expresiones matemáticas que describen la relación esfuerzo-deformación, las cuales también fueron aplicadas al análisis de flexión. El autor advirtió que las deformaciones producidas por flexión son considerablemente mayores que las generadas bajo compresión, por lo que estableció la siguiente relación, representada en la figura siguiente:

**Figura 6**

Diagrama esfuerzo / deformación del concreto



Nota: El gráfico representa la curva de esfuerzo / deformación del concreto mediante fórmulas matemáticas. Adaptado de *Estructuras de concreto reforzado*, por R. Park & T. Paulay, 1988, Limusa Editorial.

El valor del esfuerzo máximo a flexión, definido como  $0.85 \cdot f'_c$ , se determinó a partir del promedio de los resultados obtenidos en ensayos de columnas sometidas a carga concéntrica. La porción inicial de la curva esfuerzo-deformación se describe mediante la siguiente ecuación:

$$f_c = f'_c * \left[ 2 * \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

$$\epsilon_0 = \frac{2 * f'_c}{E_c}$$

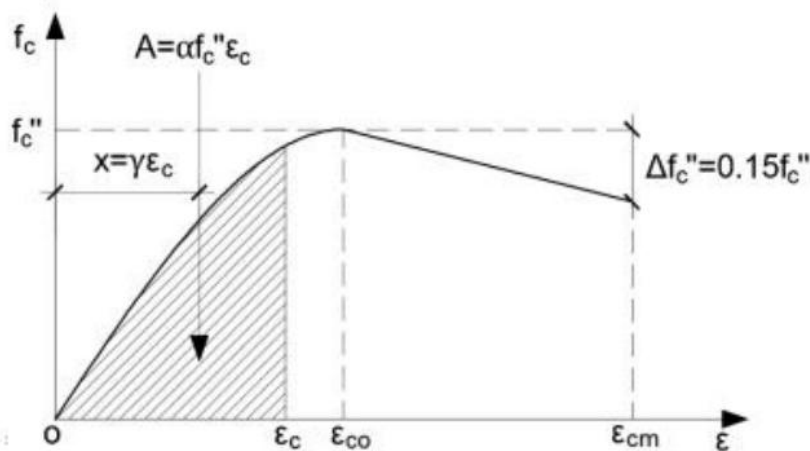
En los ensayos realizados sobre elementos de concreto sometidos a cargas concéntricas, se observó la respuesta del material en función de la dispersión respecto a su resistencia máxima. Como resultado, se determinó que la deformación máxima del concreto alcanzó el siguiente valor:

$$\epsilon_u = 0.0038$$

Se resume en la siguiente figura:

## Figura 7

### Resumen del modelo de Hognestad



*Nota:* El gráfico representa el modelo constitutivo de Hognestad. Adaptado de *Estructuras de concreto reforzado*, por R. Park y T. Paulay, 1988, Limusa Editorial.

El modelo constitutivo de Hognestad es ampliamente reconocido por su capacidad de representar adecuadamente el comportamiento no lineal del concreto bajo cargas de compresión. Este modelo, desarrollado originalmente por Hognestad en 1951, describe de manera precisa la relación esfuerzo-deformación del concreto, incluyendo su fase elástica, el pico de resistencia y la etapa de ablandamiento post-pico. Su uso es especialmente ventajoso en simulaciones numéricas que requieren una representación realista del daño y la degradación del material, como es el caso del modelo Concrete Damage Plasticity (CDP) en el software Abaqus.

El CDP es un modelo avanzado de plasticidad que permite simular el comportamiento del concreto sometido a cargas monotónicas o cíclicas, incorporando tanto la degradación por tracción como por compresión. En este contexto, la curva de compresión proporcionada por Hognestad resulta particularmente útil, ya que ofrece un perfil representativo del daño progresivo y permite calibrar los parámetros del modelo con mayor realismo físico. Como señalan Mazzotti et. al. (2008), el modelo de Hognestad proporciona una base confiable para

establecer las curvas de entrada del concreto en el análisis no lineal, mejorando la correlación entre resultados experimentales y numéricos. Por tanto, emplear el modelo de Hognestad como referencia para la compresión en el CDP de Abaqus es conveniente debido a su simplicidad, su amplia validación experimental y su capacidad para describir de forma precisa el comportamiento degradado del concreto estructural. Se detalla las ventajas en las tablas 1 y 2.

**Tabla 1**

*Ventajas del modelo constitutivo de Hognestad*

<b>Ventaja</b>	<b>Concepto</b>
Representación precisa de la curva tensión–deformación en compresión	El modelo de Hognestad (1951) proporciona una formulación clásica para la rama ascendente y el ablandamiento post-pico del concreto, esencial para definir el comportamiento no lineal en CDP.

*Nota:* Adaptado de A model for damage analysis of concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, por Cao, V. V. (2013).

**Tabla 2**

*Ventajas del modelo constitutivo de Hognestad*

<b>Ventaja</b>	<b>Concepto</b>
Integración efectiva en modelos de daño	Diversas investigaciones (por ejemplo, en modelos de daño multiaxial o CDP), emplean la formulación de Hognestad como base confiable para describir la degradación progresiva del concreto bajo cargas.

*Nota:* Adaptado de Analytical study on tensile strength of concrete. *International Journal of Concrete Research*, por Madandoust et. al. (2017).

### **Propiedades mecánicas del acero**

Según lo establecido en la Norma Técnica Peruana E.060 (2009), durante el diseño estructural no se permite que el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo ( $f_y$ ) exceda los

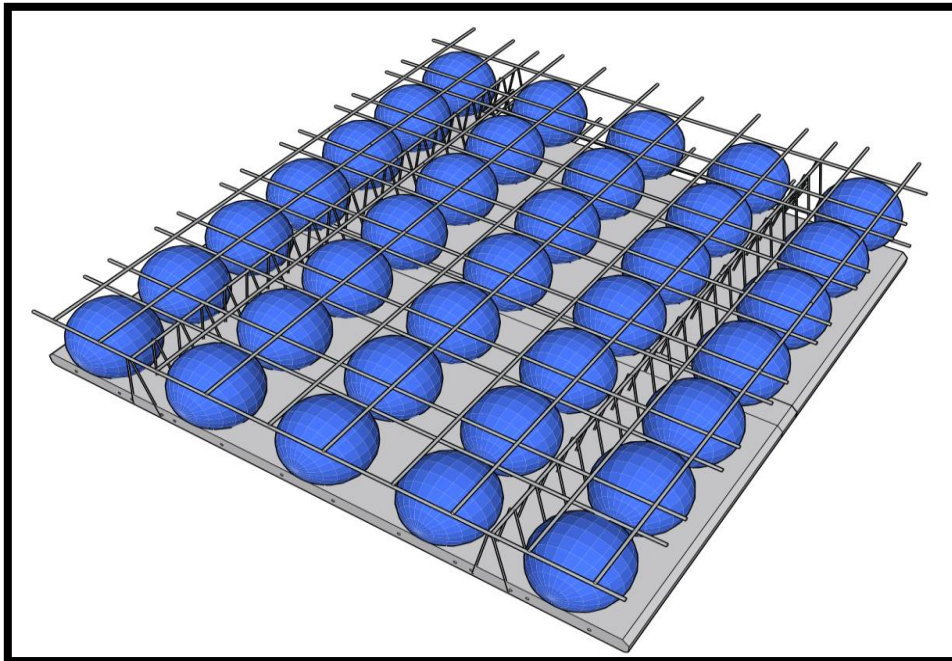
5600 kg/cm<sup>2</sup>, excepto en el caso de los aceros destinados al preesfuerzo. Asimismo, tanto la normativa peruana como las disposiciones del ACI prohíben el uso de aceros de refuerzo con esfuerzos de fluencia superiores al Grado 60 en elementos estructurales que cumplen una función sísmica.

### **Método de elementos finitos**

Para Zienkiewicz, Taylor, & Zhu (2013), en *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, el método de los elementos finitos constituye una herramienta numérica de gran eficacia, ampliamente aplicada para resolver ecuaciones diferenciales parciales que modelan fenómenos en ingeniería y física. Este procedimiento se basa en dividir el dominio de estudio en un número finito de elementos, dentro de los cuales se calculan soluciones aproximadas mediante interpolación, integrándolas posteriormente en un sistema global de ecuaciones algebraicas. Se muestra en la Figura 8.

### **Figura 8**

*Representación isométrica de losa Bubbledeck convencional*

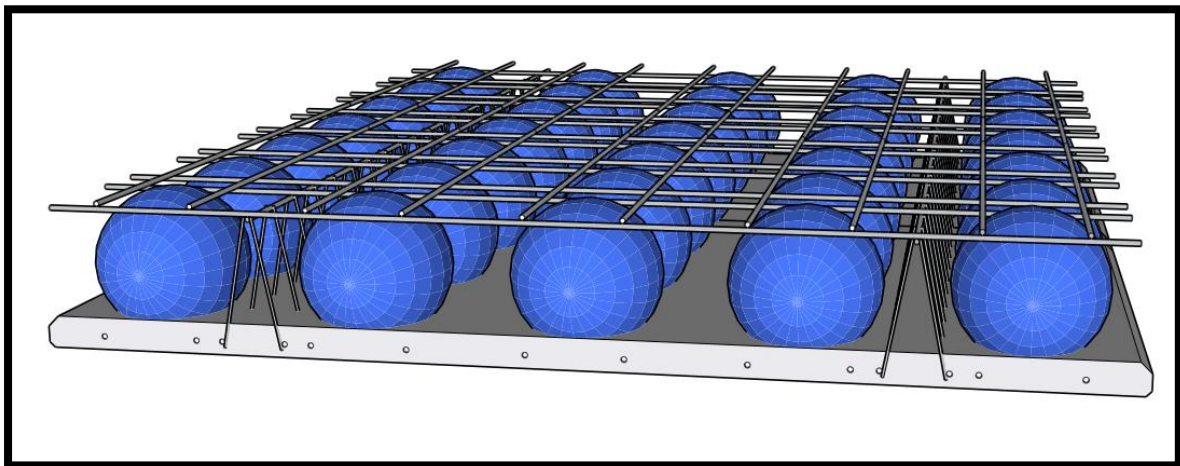


*Nota:* La figura muestra el enmallado de una losa Bubbledeck. Elaboración Propia.

Se ha reconocido que las ecuaciones integrales y las ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mejor mediante el método de elementos finitos (MEF). Por lo tanto, FEM se ha convertido en el método numérico más preferido para resolver muchos Problemas de campo de ingeniería y ciencias aplicadas. Dado que FEM necesita una cantidad mínima de formación y programas informáticos versátiles, se volvió más recomendado para resolver diferentes problemas prácticos. Durante las últimas tres décadas, el rápido desarrollo de las técnicas de elementos finitos y asistidas por computadora proporcionó una solución económica para realizar muchos análisis estructurales 3D aceptados. Se detalla en la Figura 9:

### Figura 9

*Representación de mallado para las esferas de polietileno de alta densidad*



*Nota:* La figura muestra el enmallado de una losa Bubbledeck. Elaboración Propia.

### Concrete Damage Plasticity – ABAQUS

Según Hafezolghorani et al. (2017) el modelo de daño para concreto se caracteriza por su alta capacidad para representar con precisión el comportamiento del concreto y otros materiales en diversos tipos de estructuras. Este modelo combina los principios de la teoría de la elasticidad con los conceptos de daño y plasticidad isotrópica, tanto en tracción como en compresión, lo que permite describir de manera efectiva la respuesta no lineal del material. Puede aplicarse de forma individual al concreto, al acero o a ambos simultáneamente. Su

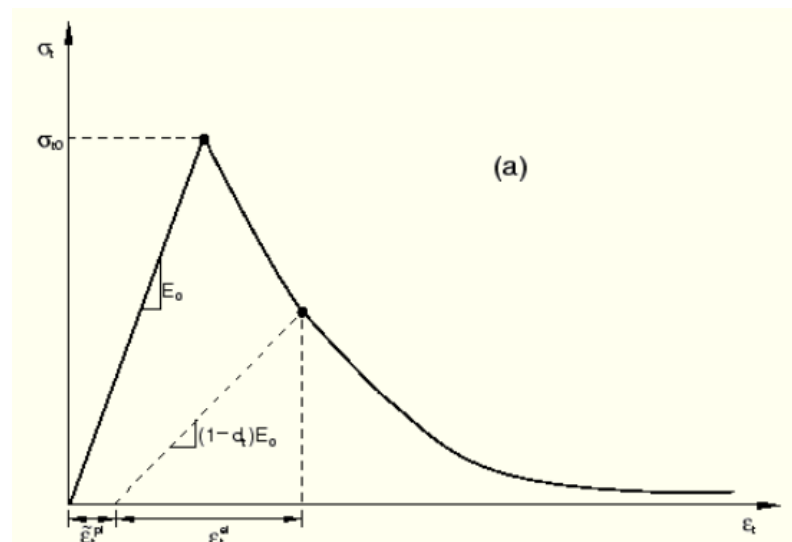
principal finalidad es simular el desempeño del concreto bajo cargas monótonas, cíclicas o dinámicas, incluso en condiciones de confinamiento. Gracias a la integración de la elasticidad, la plasticidad y el daño isotrópico, el modelo logra representar el deterioro irreversible asociado al proceso de fractura del concreto.

### Comportamiento a esfuerzos de tracción

Según Dsimulia (2009), el modelo implementado en el software ABAQUS indica que, bajo condiciones de tracción uniaxial, la curva esfuerzo-deformación presenta un comportamiento lineal elástico hasta alcanzar el punto de ruptura por tracción, momento en el cual comienzan a generarse microfisuras en el concreto. Posteriormente, estas microfisuras se manifiestan a nivel macroscópico en la curva esfuerzo-deformación mediante un proceso de ablandamiento, que provoca la concentración o localización de la deformación dentro de la estructura del material. Se ilustra en la Figura 10.

### Figura 10

*Respuesta a carga uniaxial del concreto en tracción*



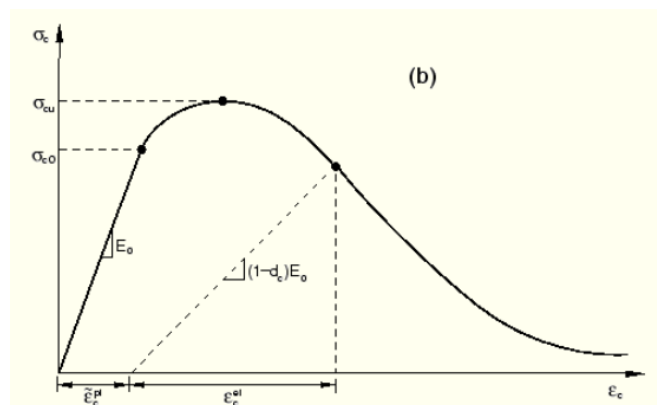
*Nota:* El gráfico representa la curva de respuesta a carga uniaxial del concreto a tracción mediante fórmulas matemáticas. Adaptado de *ABAQUS Manual de Dsimulia*, 2009.

## Comportamiento a esfuerzos de compresión

De acuerdo con Simulia (2009), el modelo implementado en el software ABAQUS describe que, bajo una carga de compresión uniaxial, el comportamiento del concreto es lineal hasta alcanzar el punto de inicio de fluencia. Posteriormente, en la fase plástica, el material muestra un endurecimiento causado por la tracción, seguido de un ablandamiento por deformación una vez superado el esfuerzo máximo. Aunque esta descripción es una simplificación, permite representar adecuadamente los aspectos esenciales del comportamiento del concreto. Asimismo, se establece que las curvas uniaxiales de esfuerzo-deformación pueden transformarse en curvas de tracción frente a deformación plástica. En el software ABAQUS, dicha conversión se efectúa de manera automática a partir de los datos inelásticos de la curva esfuerzo-deformación que el usuario ingresa. Se muestra la Figura 11.

### Figura 11

*Respuesta a carga uniaxial del concreto en compresión*

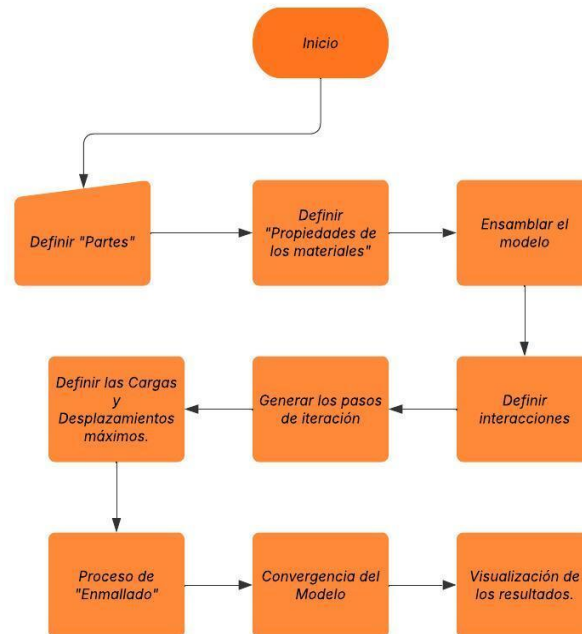


*Nota:* El gráfico representa la curva de respuesta a carga uniaxial del concreto a compresión mediante fórmulas matemáticas. Adaptado de ABAQUS Manual de Dsimulia, 2009.

Se detalla en la Figura 12:

**Figura 12**

*Diagrama de flujo de modelación del método de elementos finitos en ABAQUS*



*Nota:* El gráfico representa el flujo del modelamiento en ABAQUS. Elaboración Propia.

### 3.2.3.1. Capacidad para variaciones de resistencia

Según Nilson et al. (2018), la capacidad para variaciones de resistencia en la respuesta estructural de elementos de concreto armado se define como la aptitud del sistema estructural para conservar un comportamiento seguro, estable y funcional frente a fluctuaciones en la resistencia de los materiales, originadas por variabilidad en las propiedades mecánicas del concreto y del acero, imperfecciones constructivas o acciones de carga no previstas. Esta capacidad se logra mediante la aplicación de factores de reducción de resistencia, criterios de diseño por capacidad y requisitos de ductilidad, los cuales permiten que la estructura absorba dichas variaciones sin comprometer su integridad ni su capacidad portante. Asimismo, MacGregor (2019) indica que un adecuado diseño estructural considera márgenes de seguridad y mecanismos de redistribución de esfuerzos que favorecen un

desempeño confiable ante incertidumbres propias del comportamiento real de los materiales y de las solicitaciones externas.

### **3.2.3.2. Capacidad para variaciones de refuerzo de acero**

Según Nilson et al. (2018), la capacidad para variaciones de refuerzo de acero en la respuesta estructural de elementos de concreto armado se define como la aptitud del sistema estructural para conservar niveles adecuados de resistencia, ductilidad y seguridad ante modificaciones en la cuantía, disposición o diámetro del acero de refuerzo, originadas por tolerancias constructivas, ajustes de diseño o condiciones reales de ejecución. Este comportamiento se sustenta en el principio de diseño dúctil del concreto armado, el cual permite que el elemento estructural redistribuya esfuerzos y disipe energía sin desarrollar mecanismos de falla frágil, siempre que se respeten los límites normativos de refuerzo mínimo y máximo establecidos. Asimismo, MacGregor (2019) indica que la correcta disposición del refuerzo de acero influye directamente en la capacidad de control de fisuración y en el desempeño estructural global, especialmente bajo cargas variables y acciones sísmicas, contribuyendo a un comportamiento más estable y predecible del elemento.

### **3.2.3.3. Capacidad para variación en la configuración de esferas**

Según De Oliveira (2020), la capacidad para la variación en la configuración de esferas en la respuesta estructural de losas de concreto armado tipo BubbleDeck se define como la aptitud del sistema estructural para conservar un desempeño adecuado en términos de resistencia, rigidez y condiciones de servicio frente a modificaciones en la disposición, separación, diámetro o patrón geométrico de las esferas de aligeramiento ubicadas en la zona neutra de la losa. Una configuración apropiada de las esferas permite una reducción significativa del peso propio del elemento sin comprometer de manera relevante su capacidad resistente ni su comportamiento global, siempre que se respeten los criterios de diseño y las

disposiciones constructivas propias del sistema. Asimismo, Pimentel et al. (2021), indica que la variación controlada en la configuración de vacíos influye directamente en la distribución de esfuerzos y en la respuesta a flexión y corte, por lo que su análisis resulta fundamental para garantizar un comportamiento estructural eficiente y seguro en losas aligeradas de tipo BubbleDeck.

#### **3.2.3.4. Punto de rotura del concreto, Punto de fluencia del refuerzo de acero y Carga última**

##### **Punto de rotura del concreto**

Según el ACI (2019), el punto de rotura del concreto se define como el estado límite en el cual un elemento de concreto alcanza su capacidad máxima de resistencia frente a una carga aplicada, produciéndose la fractura del material y la pérdida de su capacidad portante. Este punto constituye un parámetro fundamental en los ensayos de compresión del concreto, ya que permite determinar la resistencia última del material bajo condiciones controladas de laboratorio y evaluar su comportamiento mecánico previo a la falla. Asimismo, Neville (2011), indica que la identificación del punto de rotura resulta esencial en el diseño estructural, dado que proporciona la base para establecer los criterios de resistencia y los factores de seguridad necesarios para garantizar un desempeño estructural confiable y evitar fallas frágiles en los elementos de concreto armado

##### **Punto de fluencia del refuerzo de acero**

Según el ACI (2019), el punto de fluencia del refuerzo de acero se define como el nivel de tensión a partir del cual el acero de refuerzo inicia un comportamiento plástico, perdiendo la capacidad de recuperar su forma original una vez retirada la carga aplicada. En este estado, el material experimenta deformaciones permanentes significativas, de modo que incrementos adicionales de carga generan aumentos considerables de deformación sin una variación proporcional de la tensión, característica propia del régimen plástico del acero. De

acuerdo a Park & Paulay (1975), este fenómeno resulta fundamental en el comportamiento de los elementos de concreto armado, ya que el inicio de la fluencia del refuerzo permite la redistribución de esfuerzos, incrementa la ductilidad del sistema y actúa como un mecanismo de advertencia previo a la falla estructural, contribuyendo a un desempeño más seguro y controlado de la estructura.

### **Carga última**

Según el ACI (2019), la carga última se define como el nivel máximo de carga que una estructura o elemento estructural es capaz de resistir antes de alcanzar un estado de falla o colapso, a partir del cual se produce una pérdida irreversible de su capacidad resistente y estabilidad. En este punto crítico, el comportamiento del material o del sistema estructural transita de un régimen seguro hacia una condición de inestabilidad, pudiendo manifestarse mediante la fractura de los materiales, la formación de mecanismos plásticos o el colapso total del elemento. Además, Nilson et al. (2018) indica que la determinación de la carga última constituye un aspecto esencial del diseño estructural, ya que permite establecer márgenes adecuados de seguridad y verificar que los elementos de concreto armado operen dentro de los límites de resistencia y desempeño exigidos por la normativa vigente

### **3.3. Definición de términos**

**Losa Aligerada:** Según el ACI (2019), la losa aligerada es un elemento estructural de concreto armado que incorpora vacíos o materiales aligerantes en zonas de menor sollicitación estructural, con el fin de reducir su peso propio sin afectar significativamente su resistencia ni su desempeño estructural. Este sistema permite una optimización del uso de materiales y una disminución de las cargas transmitidas a los elementos portantes de la edificación.

**Losa Bubbledeck:** Según De Oliveira (2020), la losa BubbleDeck es un sistema estructural de concreto armado aligerado que emplea esferas plásticas huecas dispuestas en la zona neutra de la losa para reducir el peso propio del elemento, manteniendo un

comportamiento estructural similar al de una losa maciza. Este sistema permite optimizar el consumo de concreto, disminuir las cargas gravitacionales y mejorar la eficiencia estructural sin comprometer la resistencia ni la rigidez global de la losa.

**Resistencia a la flexión:** Según Nilson et al. (2018), la resistencia a la flexión es la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos de flexión inducidos por cargas aplicadas, sin alcanzar estados de falla, controlando la formación de fisuras y las deformaciones excesivas. Esta propiedad depende de las características mecánicas del concreto, del acero de refuerzo y de la adecuada interacción entre ambos materiales, siendo un parámetro esencial en el diseño de elementos de concreto armado.

**Refuerzo de Acero:** Según Serrano (2020), el reforzamiento con acero en la construcción consiste en incluir barras o mallas de acero dentro de elementos de concreto estructural como columnas, vigas y losas, con el fin de aumentar su capacidad de resistencia a la tracción y brindar mayor estabilidad a la estructura. Este tipo de refuerzo contribuye a distribuir las cargas de manera equilibrada, disminuyendo el riesgo de fisuras o deformaciones excesivas en los elementos estructurales.

**Deflexiones:** Según Hibbeler (2016), las deflexiones estructurales corresponden a la deformación que sufre un elemento de una estructura al ser sometido a una carga, y se expresan generalmente como el desplazamiento vertical que ocurre en un punto específico del elemento estructural.

**Cargas muertas:** Según el ACI (2019), las cargas muertas son aquellas acciones permanentes que actúan de manera constante sobre una estructura durante toda su vida útil, y están constituidas principalmente por el peso propio de los elementos estructurales, acabados, muros y otros componentes fijos. Estas cargas son determinantes en el diseño estructural, ya que influyen directamente en el dimensionamiento y en la estabilidad global de la edificación.

**Cargas Vivas:** Según el ACI (2019), las cargas vivas son aquellas acciones variables que actúan sobre una estructura como consecuencia del uso y ocupación de la edificación, tales como personas, mobiliario, equipos y desplazamientos temporales. Estas cargas pueden variar en magnitud y distribución a lo largo del tiempo, por lo que su adecuada estimación resulta fundamental para garantizar la seguridad y el correcto desempeño estructural.

**Esfera de plástico:** Según Pimentel et al. (2021), la esfera de plástico es un elemento hueco, generalmente fabricado de polipropileno o polietileno reciclado, utilizado como material aligerante en losas de concreto armado para generar vacíos en zonas de baja sollicitación estructural. Su incorporación permite reducir el peso propio del elemento, optimizar el uso de concreto y mejorar la eficiencia estructural sin afectar significativamente la resistencia ni la rigidez de la losa.

**Polietileno de Alta Densidad (HDPE):** Según PlasticsEurope (2020), el polietileno de alta densidad (HDPE) es un polímero termoplástico caracterizado por su alta resistencia mecánica, rigidez y durabilidad, ampliamente utilizado en aplicaciones estructurales y constructivas, como elementos aligerantes en losas de concreto, debido a su bajo peso, estabilidad química y capacidad de reciclaje.

**Configuración de esferas Bubbledeck:** Según De Oliveira (2020), La configuración de esferas BubbleDeck se refiere a la disposición geométrica, el espaciamiento y el diámetro de las esferas plásticas ubicadas en la zona neutra de la losa, cuya finalidad es reducir el peso propio del elemento sin afectar de manera significativa su resistencia ni su rigidez estructural. Una configuración adecuada permite optimizar el comportamiento estructural y la eficiencia del sistema constructivo.

**Método de Elementos Finitos:** Según Zienkiewicz, Taylor y Zhu (2013), el método de los elementos finitos es una herramienta numérica altamente eficiente, empleada de forma extensa para resolver ecuaciones diferenciales parciales que modelan fenómenos en

ingeniería y física. Este método se basa en dividir el dominio de estudio en un conjunto finito de elementos, dentro de los cuales se obtienen soluciones aproximadas mediante la interpolación de resultados locales, para luego integrar dichos valores en un sistema global de ecuaciones algebraicas.

**Modelamiento Numérico:** Según Zienkiewicz, Taylor y Zhu (2013), el modelamiento numérico es el proceso mediante el cual se representa el comportamiento físico de un sistema estructural a través de modelos matemáticos y computacionales, permitiendo simular su respuesta ante diversas condiciones de carga y analizar variables como esfuerzos, deformaciones y desplazamientos de manera eficiente y controlada.

**Análisis de sensibilidad:** Según Saltelli (2004), es un método empleado para analizar el impacto que las variaciones en los parámetros de entrada tienen sobre los resultados de un modelo. Este procedimiento permite determinar los factores más relevantes que afectan las decisiones o salidas del modelo, además de evaluar la estabilidad y confiabilidad de los resultados frente a posibles cambios en las condiciones iniciales.

**Respuesta estructural:** Según Hibbeler (2016), la respuesta estructural es el conjunto de efectos que experimenta una estructura al ser sometida a acciones externas, manifestándose principalmente en desplazamientos, deformaciones y esfuerzos internos. Su análisis permite evaluar el desempeño, la estabilidad y la seguridad de los elementos estructurales frente a diferentes condiciones de carga.

**Punto de rotura del concreto:** Según el ACI (2019), define que el punto de rotura del concreto se refiere a la carga máxima que un elemento de concreto puede soportar antes de que se fracture o se rompa, perdiendo su capacidad de resistencia. Este punto es fundamental en los ensayos de compresión del concreto, ya que indica la resistencia final del material bajo condiciones controladas.

**Punto de fluencia del refuerzo de acero:** Según el ACI (2019), define que el punto de fluencia del refuerzo de acero se refiere al nivel de tensión (o esfuerzo) al cual el acero comienza a deformarse plásticamente, es decir, cuando el material ya no vuelve a su forma original al ser descargado. En este punto, el acero alcanza un estado de deformación permanente, y aunque se continúe aplicando carga, el aumento de deformación será más pronunciado sin un aumento proporcional de la tensión.

**Carga última:** Según el ACI (2019), define que la carga última se refiere a la carga máxima que una estructura o elemento de construcción puede soportar antes de fallar o colapsar. Es el valor crítico de carga en el cual el comportamiento del material o la estructura cambia de manera irreversible, pasando de un estado seguro a uno de inestabilidad, lo que podría resultar en la fractura o el colapso total.

**Análisis No Lineal:** Según Chopra (2017), el análisis no lineal es un procedimiento de evaluación estructural que considera el comportamiento real de los materiales y de la geometría del sistema cuando las relaciones entre cargas y deformaciones dejan de ser proporcionales. Este tipo de análisis permite representar con mayor precisión fenómenos como la fisuración del concreto, la fluencia del acero y la redistribución de esfuerzos en los elementos estructurales.

## **IV. Metodología**

### **4.1. Tipo y nivel de investigación**

#### **Tipo de investigación**

La presente investigación se clasifica como de tipo básica. De acuerdo con Hernández-Sampieri & Mendoza (2018), la investigación es de tipo básica, puesto que tiene como finalidad ampliar y profundizar el conocimiento teórico, sin perseguir una aplicación práctica inmediata. Además, Collado et al. (2020) indica que una investigación es de tipo básica dado que está orientada a la generación y profundización de conocimientos teóricos. Este tipo de investigación contribuye al desarrollo del conocimiento científico fundamental y sirve de base para estudios aplicados futuros. En este contexto, la investigación básica resulta adecuada para esta tesis, ya que se centra en analizar la sensibilidad de la respuesta estructural de las losas Bubbledeck a partir de un ensayo experimental; al comparar y validar los resultados del modelo con los datos experimentales, este estudio aporta a la comprensión de las capacidades y limitaciones de los métodos utilizados para representar comportamientos estructurales complejos.

#### **Nivel de investigación**

Según Hernández-Sampieri & Mendoza (2018), la investigación explicativa pretende “establecer las causas de los eventos y las condiciones en que se manifiestan”, busca identificar y analizar las relaciones de causa–efecto entre variables, explicando por qué y en qué medida ocurre un fenómeno determinado. En este tipo de investigación, el investigador manipula deliberadamente una o más variables independientes para observar su influencia sobre las variables dependientes, permitiendo comprobar hipótesis causales. De acuerdo con Ñaupás et al. (2021), la investigación explicativa busca establecer relaciones causa–efecto y explicar por qué ocurre un fenómeno bajo determinadas condiciones. Este nivel es propio de

estudios experimentales y de simulación en ingeniería, donde se analizan los efectos de variaciones paramétricas sobre la respuesta del sistema.

En este contexto, la presente investigación se desarrolla bajo un nivel explicativo, ya que pretende evaluar la sensibilidad de la respuesta estructural de las losas Bubbledeck ante diferentes configuraciones de esferas y refuerzo de acero, permitiendo analizar detalladamente el comportamiento estructural de las losas y entender las variaciones de los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos.

### **Diseño de la Investigación**

El diseño de la investigación es experimental. De acuerdo con Hernández-Sampieri & Mendoza (2018) el diseño experimental busca establecer relaciones de causa–efecto mediante el control sistemático de las variables, se caracteriza por la manipulación deliberada y controlada de una o más variables independientes con el propósito de analizar su efecto causal sobre una o más variables dependientes. Además Ñaupas et al. (2021) señalan que este diseño es el más adecuado para establecer relaciones causales con mayor rigor científico. En investigaciones de ingeniería estructural, este diseño puede desarrollarse mediante experimentación física o computacional, cuando las variables se modifican en un entorno controlado de simulación. En el presente estudio, la variación de la configuración de esferas y del refuerzo de acero en modelos numéricos de losas Bubbledeck permite evaluar su influencia sobre la respuesta estructural.

## **4.2. Ámbito Temporal y Espacial**

### **Ámbito temporal**

La presente investigación se llevó a cabo entre los años 2024 y 2025, abarcando un periodo de ejecución comprendido entre setiembre de 2024 y febrero de 2025.

## **Ámbito espacial**

La presente investigación se desarrolló en la ciudad de Abancay, ubicada en la región de Apurímac, y se enfoca en analizar la respuesta estructural de las losas Bubbledeck frente a diferentes configuraciones de esferas y refuerzo de acero, aplicando un análisis de sensibilidad mediante el método de elementos finitos, basado en la calibración de un ensayo experimental.

### **4.3. Población y muestra**

#### **Población**

De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la población se define como el conjunto total de elementos o unidades de análisis que comparten características comunes y sobre los cuales se desea realizar inferencias en una investigación. De manera complementaria, Ñaupas et al. (2021) señalan que la población comprende la totalidad del fenómeno de estudio, incluyendo todos los casos, sujetos u objetos relevantes que pueden ser medidos y analizados conforme a los objetivos planteados.

En el contexto del presente estudio, la población está conformada por las losas Bubbledeck susceptibles de ser analizadas bajo condiciones de carga a flexión, considerando específicamente aquellas que pueden someterse a cargas puntuales diversas con el fin de evaluar su respuesta estructural hasta alcanzar la falla.

#### **Muestra**

De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la muestra es un subconjunto representativo de la población, seleccionado mediante procedimientos sistemáticos, que permite obtener información válida y confiable para realizar inferencias sobre el total del universo de estudio. Asimismo, Ñaupas et al. (2021) definen la muestra como una parte de la población elegida con criterios metodológicos, en la cual se observan y miden las variables de interés con el fin de describir, analizar y explicar el fenómeno investigado.

En esta investigación específica, la muestra consistirá en 01 modelo calibrado de losas Bubbledeck procedente de un ensayo experimental y 09 modelos generados para simulaciones numéricas en base al modelo calibrado, representadas a través del método de elementos finitos.

#### **4.4. Instrumentos**

Rodríguez (2008), explica que la técnica es el instrumento utilizado para recopilar datos, destacando métodos como la observación y las encuestas. Para este estudio, se empleó principalmente el análisis documental, que consiste en examinar literatura relevante como normativas, artículos, libros y tesis previas, así como especificaciones técnicas relacionadas con el tema investigado. Esta revisión documental estableció la dirección para alcanzar los resultados deseados en la tesis. Además, se recogieron datos procedentes del modelamiento numérico en el software ABAQUS aplicando el método de elementos finitos.

Arias (2012), señala que los instrumentos de recolección de datos son herramientas, ya sean dispositivos o formatos físicos o digitales, diseñados específicamente para registrar y conservar la información recabada, con respecto a la presente investigación se obtendrá datos de un ensayo experimental debido a ese motivo se utilizará como instrumento de información la curva de carga / desplazamiento, para así calibrar un modelo numérico en el software ABAQUS y plantear las variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos, con el fin de realizar un análisis de sensibilidad en la respuesta estructural de los mismos.

Se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19)
- Investigaciones con ensayos experimentales en losas Bubbledeck de R. Sagadevan, B. N. Rao, 2019.
- Parámetros de Ensayo de Flexión estática ASTM-C78.

- Software ABAQUS Student Edition.
- Microsoft Excel, Word, Power Point.

El software ABAQUS se empleó para calibrar el modelo experimental y realizar las simulaciones de los modelos numéricos con las variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero, y Excel se usó como base de datos para realizar las curvas de carga / desplazamientos obtenidos de la simulación mediante el método de elementos finitos.

#### 4.5. Procedimientos

El procedimiento general de la investigación consiste en analizar la sensibilidad de la respuesta estructural de las losas Bubbledeck ante variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos. Este análisis se llevará a cabo en Abancay, Apurímac, 2024. A continuación, se detalla el procedimiento unificado para cumplir con los objetivos específicos:

**Revisión de Literatura y Definición de Parámetros Locales:** Se realizará una revisión bibliográfica sobre losas Bubbledeck y métodos de elementos finitos, especialmente sobre ensayos realizados de forma experimental.

Losa Bubbledeck 01

- R. Sagadevan, B. N. Rao, (2019), realizado en DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY MADRAS, India.

**Definición del ensayo Experimental:** Se designará el modelo realizado de manera experimental el cual debe proporcionar información suficiente para realizar la calibración del mismo en un modelo numérico en ABAQUS mediante el método de elementos finitos.

**Desarrollo del Modelo Numérico:** Usando software de elementos finitos (Abaqus), se crearán modelos numéricos de las losas Bubbledeck que replicarán las condiciones del modelo experimental, para poder calibrar el modelo experimental y así obtener una

aproximación exacta de la curva de carga / desplazamiento obtenido en ensayos experimentales.

**Simulaciones Numéricas y Validación del Modelo:** Se realizarán simulaciones numéricas para obtener la respuesta estructural de las losas bajo diferentes configuraciones de esferas y refuerzo de acero. Los resultados de las simulaciones se compararán con los datos obtenidos en el ensayo experimental para validar la precisión del modelo numérico.

**Evaluación de Respuestas ante Variaciones:** Se procederá a analizar la respuesta estructural de las losas Bubbledeck ante diferentes configuraciones de esferas (disposición) y refuerzo de acero (diámetro). Estas simulaciones se realizarán bajo las mismas condiciones de carga para garantizar la coherencia y la comparabilidad de los resultados, los cuales se verán reflejados en la curva de carga / desplazamiento.

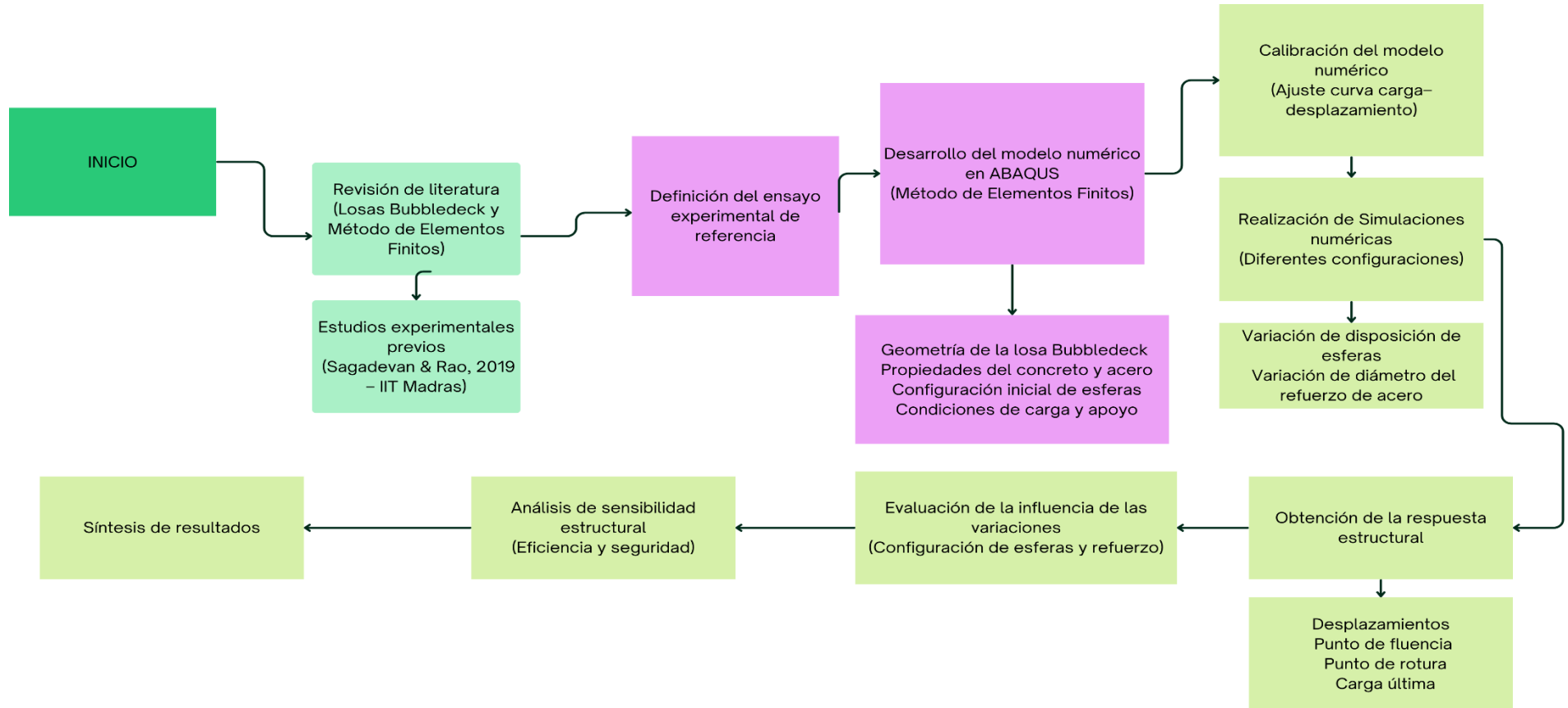
**Determinación de la Influencia de las Variaciones:** Se evaluará cómo las variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero afectan la respuesta estructural de las losas. Se analizarán puntos de rotura, punto de fluencia y cargas últimas.

**Análisis de sensibilidad:** Los resultados de las simulaciones serán comparados para identificar cuál configuración de esferas y refuerzo de acero proporciona un mejor rendimiento estructural, evaluando tanto la eficiencia como la seguridad de las losas.

Finalmente, se sintetizarán los hallazgos de la investigación, se ofrecerán recomendaciones sobre la configuración óptima de las losas Bubbledeck para condiciones de carga no lineales, y se discutirá la aplicabilidad de los resultados en el diseño estructural en Abancay, Apurímac.

Figura 13

Procedimientos- Diagrama de flujo



Nota: El gráfico representa el flujo de procedimientos del desarrollo de la tesis. Elaboración Propia.

#### **4.6. Análisis de datos**

De acuerdo con Montgomery y Runger (2018), la estadística inferencial proporciona herramientas fundamentales para generalizar resultados muestrales hacia una población con un nivel controlado de incertidumbre. De manera complementaria, Devore (2021) señala que este enfoque estadístico permite cuantificar la variabilidad y el riesgo asociado a las inferencias, garantizando conclusiones científicamente válidas en investigaciones aplicadas y experimentales. En el marco de esta investigación, los datos serán procesados y analizados mediante tablas y gráficos estadísticos elaborados en Excel, con el propósito de facilitar la interpretación de los resultados en relación con los objetivos planteados.

#### **4.7. Consideraciones éticas**

De acuerdo con el tipo y nivel de la investigación, se contemplan los siguientes principios éticos:

- La calibración numérica se realizará con total veracidad y rigor técnico.
- Los resultados obtenidos serán presentados con precisión, objetividad y transparencia.
- Los hallazgos de la investigación constituirán un aporte valioso para los estudiantes de la Universidad Tecnológica de los Andes, en la ciudad de Abancay, Apurímac.

## V. Resultados y discusión

### 5.1. Resultados

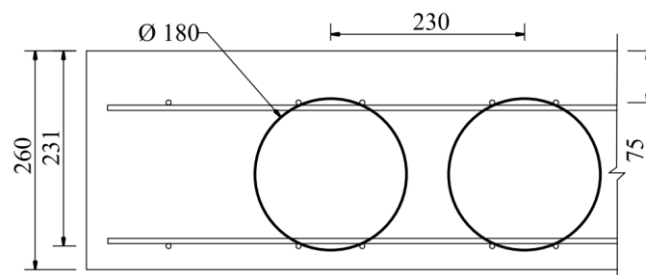
#### 5.1.1. Ensayo Experimental de la Losa Bubbledeck 01

##### 5.1.1.1. Datos de la Sección Ensayada Experimentalmente

Los resultados obtenidos por R. Sagadevan y B. N. Rao (2019) provienen de ensayos experimentales realizados sobre una losa tipo Bubbledeck, cuyas dimensiones corresponden a un peralte de 260 mm, ancho de 1500 mm y longitud de 3300 mm, con una separación entre apoyos de 3000 mm, diseñada para una falla controlada por flexión. La losa incorpora como refuerzo interno una malla superior e inferior de acero de  $\varnothing 6$  mm @ 115 mm, además de un sistema de aligeramiento compuesto por esferas de polietileno de alta densidad del tipo Bubbledeck, con un diámetro de 180 mm, que generan los vacíos esféricos característicos en la estructura. Se ilustra en la Figura 13.

#### Figura 14

*Sección de la losa*

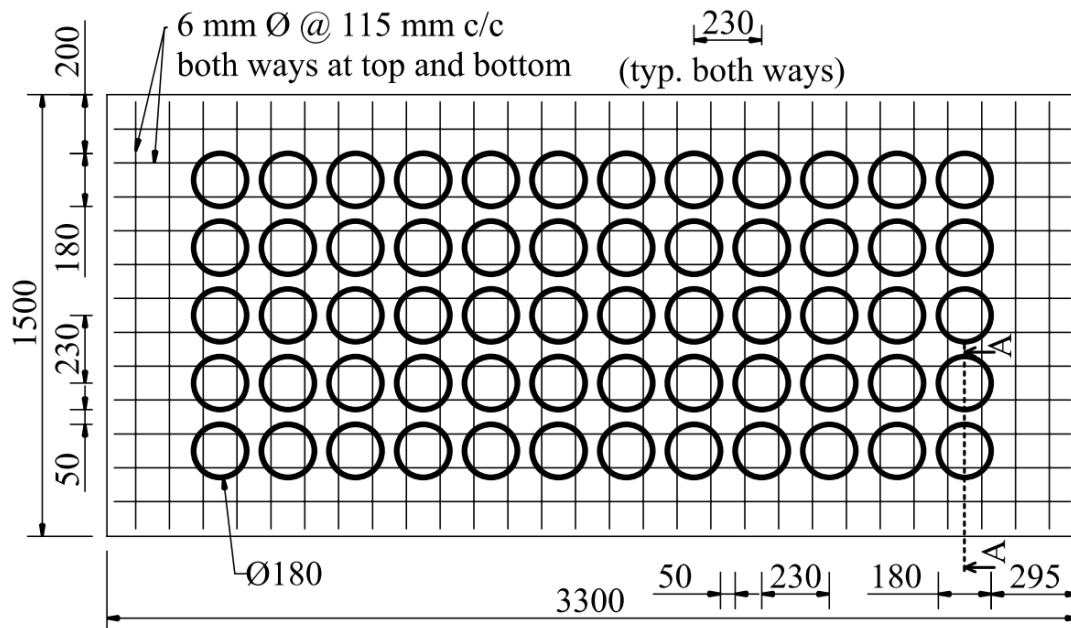


*Nota:* Obtenido de *Effect of void former shapes on one-way flexural behaviour of biaxial hollow slabs* (p.3), por R. Sagadevan y B. N. Rao (2019), *International Journal of Advanced Structural Engineering*.

El refuerzo de acero está dado por una malla superior e inferior de  $\varnothing 6$  mm @ 115 mm (Grado 60; 500Mpa), ubicado en cada zona, el refuerzo se coloca de manera simétrica en toda la losa. Se detalla en la Figura 14:

**Figura 15**

Vista en planta de la losa del ensayo.



*Nota:* Obtenido de *Effect of void former shapes on one-way flexural behaviour of biaxial hollow slabs* (p.3), por R. Sagadevan y B. N. Rao (2019), *International Journal of Advanced Structural Engineering*.

### 5.1.1.2. Ensayo Experimental

R. Sagadevan y B. N. Rao (2019) presentaron resultados experimentales sobre el comportamiento estructural de una losa Bubbledeck sometida a dos cargas puntuales aplicadas en los tercios de su longitud, conforme al ensayo de flexión estática ASTM-C78. Los datos obtenidos de dicho estudio serán utilizados para la calibración de un modelo numérico mediante el método de elementos finitos, con el propósito de obtener la curva carga-desplazamiento. Posteriormente, se desarrollarán modelos numéricos adicionales, introduciendo variaciones en la distribución de las esferas y del refuerzo de acero, los cuales serán discretizados mediante el método de elementos finitos utilizando el software ABAQUS. Este procedimiento permitirá analizar la sensibilidad de la respuesta estructural de las losas

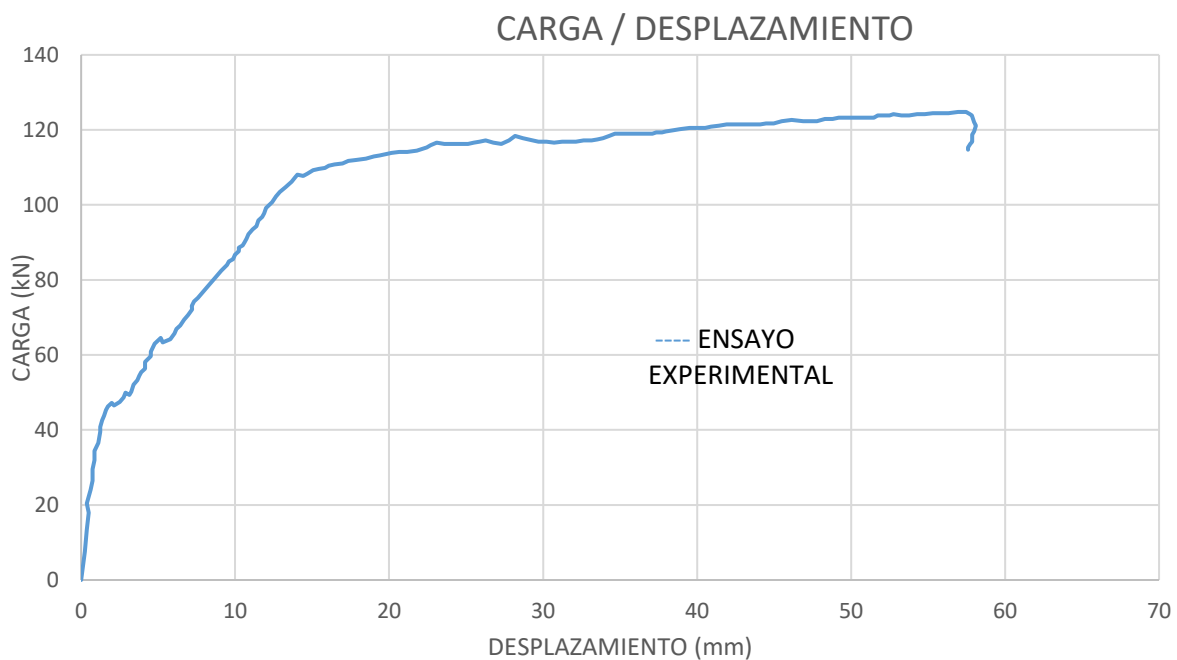
Bubbledeck, considerando la relación entre la carga máxima y el desplazamiento máximo obtenidos en el ensayo experimental de Sagadevan y Rao (2019).

### 5.1.1.3. Resultados obtenidos

La figura muestra la curva carga-desplazamiento obtenida en el estudio de R. Sagadevan y B. N. Rao (2019). En ella se observa la respuesta estructural de la losa ensayada bajo la aplicación de dos cargas puntuales colocadas en los tercios de su longitud, conforme a lo establecido en el ensayo de flexión estática ASTM-C78. Se detalla en la Figura 15:

#### Figura 16

*Curva Carga / Desplazamiento*



Nota: El gráfico representa la curva de carga / desplazamiento del ensayo experimental.

Adaptado de *Efect of void former shapes on one-way flexural behaviour of biaxial hollow slabs* (p.7), por R. Sagadevan y B. N. Rao (2019), *International Journal of Advanced Structural Engineering*.

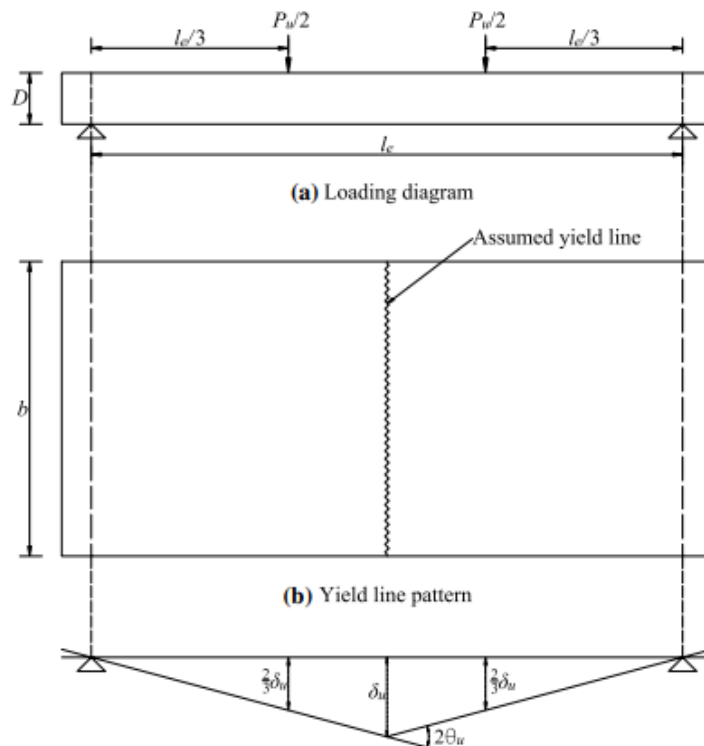
## 5.1.2. Método de elementos finitos ABAQUS de la Losa Bubbledeck 01

### 5.1.2.1. Geometría del modelo

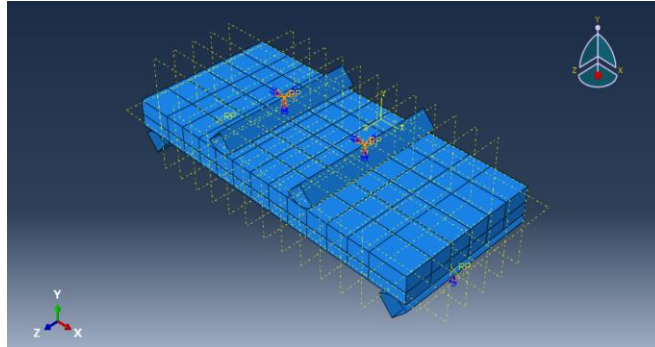
La losa Bubbledeck simplemente apoyada presenta las siguientes dimensiones: un peralte de 260 mm, un ancho de 1500 mm y una longitud de 3300 mm, con una separación entre apoyos de 3000 mm. El modo de falla es controlado por flexión, incorporando como refuerzo interno una malla superior e inferior de acero de  $\varnothing 6$  mm cada 115 mm. Asimismo, se utiliza un sistema de esferas de polietileno de alta densidad de 180 mm de diámetro, conocido como Bubbledeck, el cual genera vacíos esféricos dentro de la losa. Estos detalles se ilustran en las Figuras 16 y 17:

### Figura 17

*Geometría del ensayo experimental*



*Nota:* Obtenido de *Effect of void former shapes on one-way flexural behaviour of biaxial hollow slabs* (p.3), por R. Sagadevan y B. N. Rao (2019), *International Journal of Advanced Structural Engineering*.

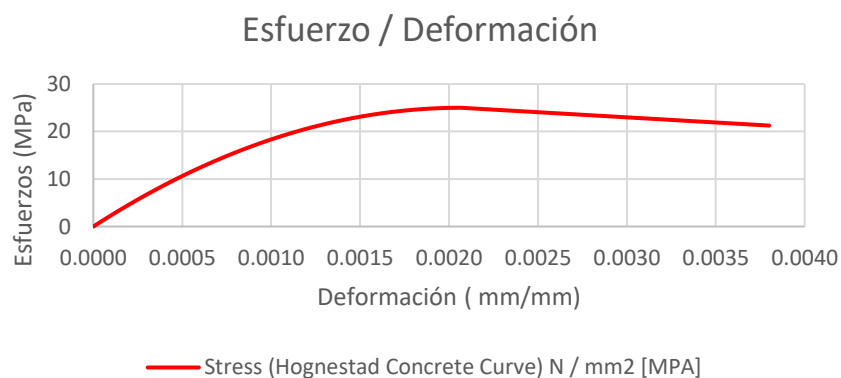
**Figura 18***Geometría de la losa Bubbledeck*

*Nota:* La figura representa la sección, dimensiones de la losa además de la colocación de los apoyos y la celda de carga.

### 5.1.2.2. Materiales y modelos constitutivos

#### Concreto a compresión

El modelo constitutivo empleado se fundamenta en el modelo de Hognestad. El concreto presenta una resistencia a la compresión de 25.00 MPa, una densidad de  $2.4 \times 10^{-5}$  N/mm<sup>3</sup> y un módulo de elasticidad de 23,500 MPa. Estos parámetros se ilustran en la Figura 18.

**Figura 19***Curva esfuerzo / deformación del concreto a compresión*

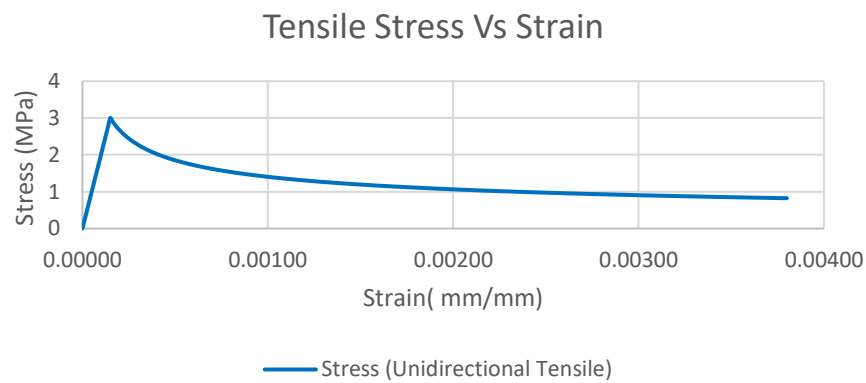
*Nota:* Fuente: El autor.

## Concreto a tensión

Se detalla en la Figura 19:

### Figura 20

*Curva esfuerzo / deformación del concreto a tensión*



Nota: Fuente: El autor.

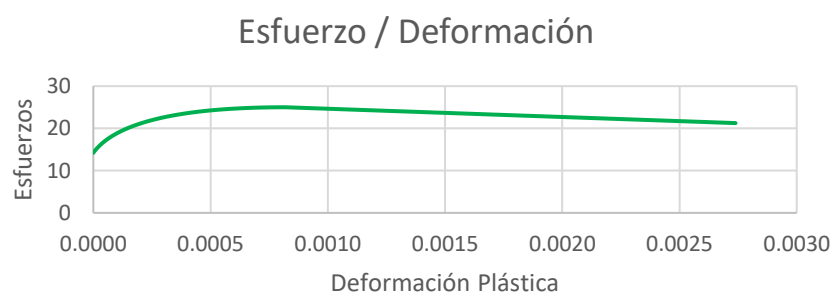
## Plasticidad del daño del concreto

La gráfica muestra un comportamiento lineal hasta alcanzar una resistencia de 14.22 MPa. Para la zona no lineal del modelo, se determinó la deformación plástica aplicando la ecuación correspondiente, tal como se muestra en la Figura 20.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_c - \left(\frac{\varepsilon_c}{E_c}\right)$$

### Figura 21

*Curva esfuerzo - deformación plástica*

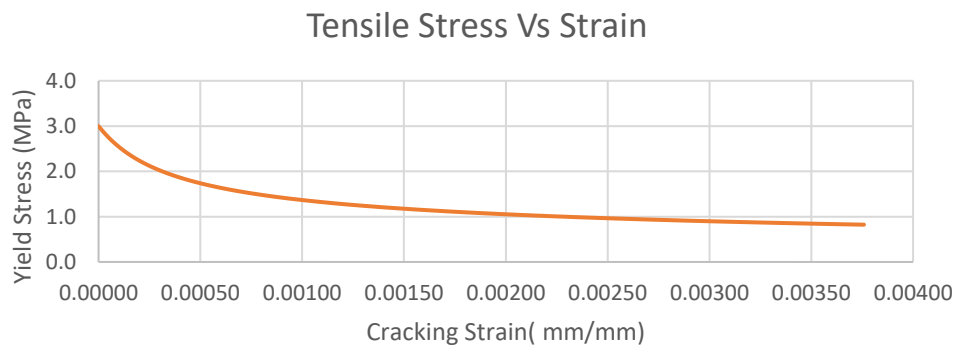


Nota: Fuente: El autor

Se define también la deformación por fisuras en la resistencia a tracción, el comportamiento del concreto se mantiene lineal hasta el módulo de ruptura  $f_r = 2.99 \text{ MPa}$  y se detalla en la Figura 21:

### Figura 22

*Curva esfuerzo a tracción del concreto – deformación plástica*

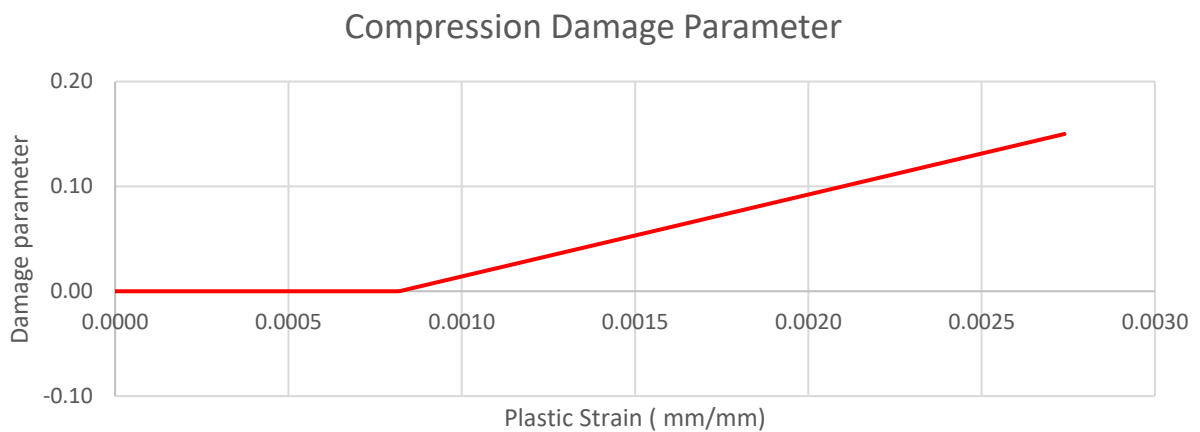


Nota: Fuente: El autor.

(Milad, 2017) Desarrolla un método que nos permite determinar el nivel de daño por tensión y compresión del concreto, tal como se muestra en la figura 22 y 23:

### Figura 23

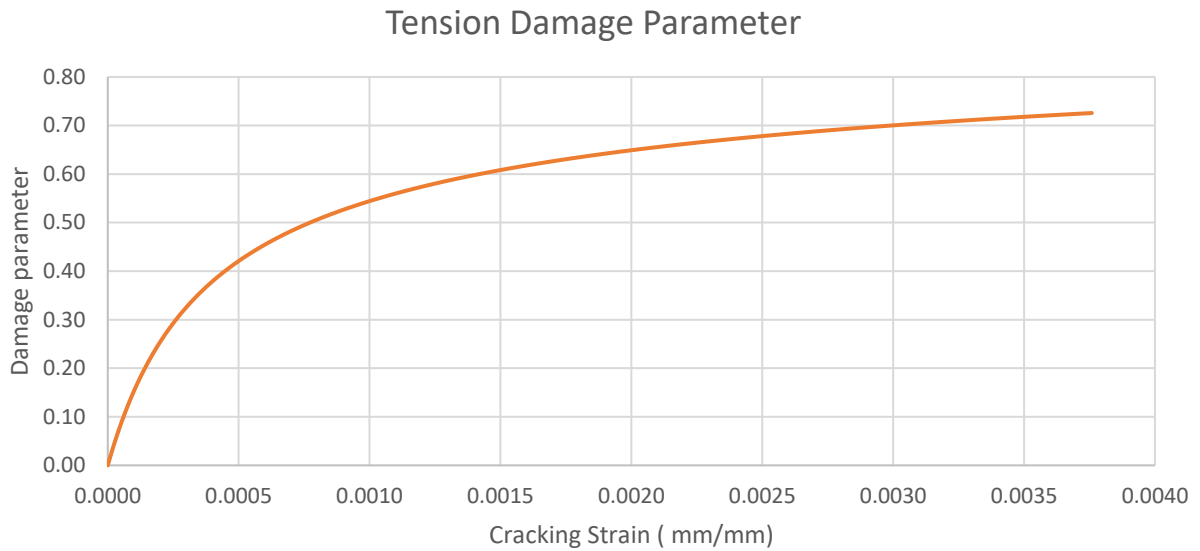
*Parámetro del daño a la compresión*



Nota: Fuente: El autor.

## Figura 24

*Parámetro del daño a la tensión*



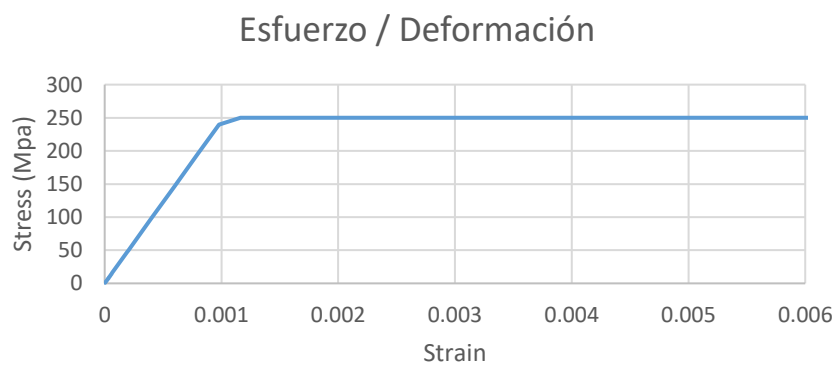
*Nota:* Fuente: El autor.

### Acero

Se presenta el modelo bilineal propuesto por Park y Paulay (1980), el cual considera una densidad de  $7.85 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$ , un módulo de elasticidad de 210000 MPa y una resistencia a la fluencia de 500 MPa. Se detalla en la Figura 24:

## Figura 25

*Curva esfuerzo – deformación del acero*



*Nota:* Fuente: El autor.

### 5.1.2.3. Modelado mediante el método de elementos finitos

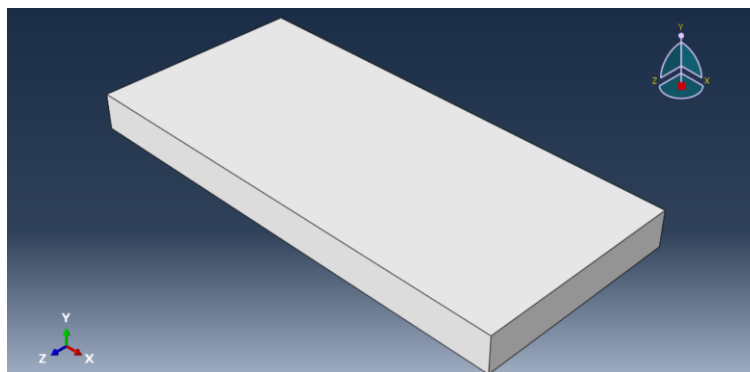
Para la definición de los elementos se recrea elementos de concreto, barras de refuerzo de acero, vacíos esféricos del sistema Bubbledeck ubicados mediante un sistema de coordenadas y después fueron unidos en un modelo federado.

#### Losa de concreto

Se detalla en la Figura 25:

#### Figura 26

*Módulo Part – Dimensiones de la losa*



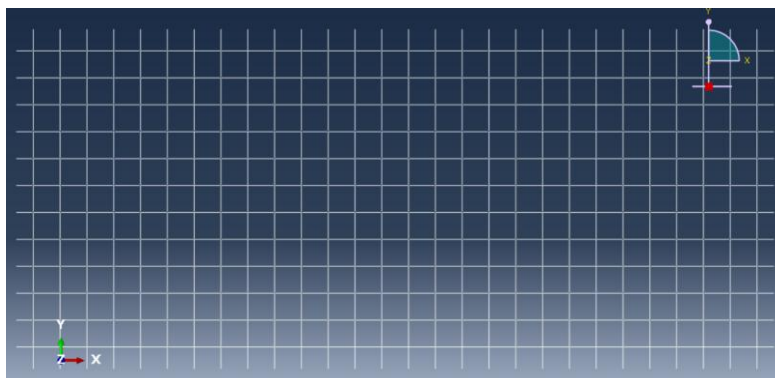
*Nota:* Fuente: El autor.

#### Acero – Malla de refuerzo

Se detalla en la Figura 26:

#### Figura 27

*Módulo Part – Refuerzo de acero*



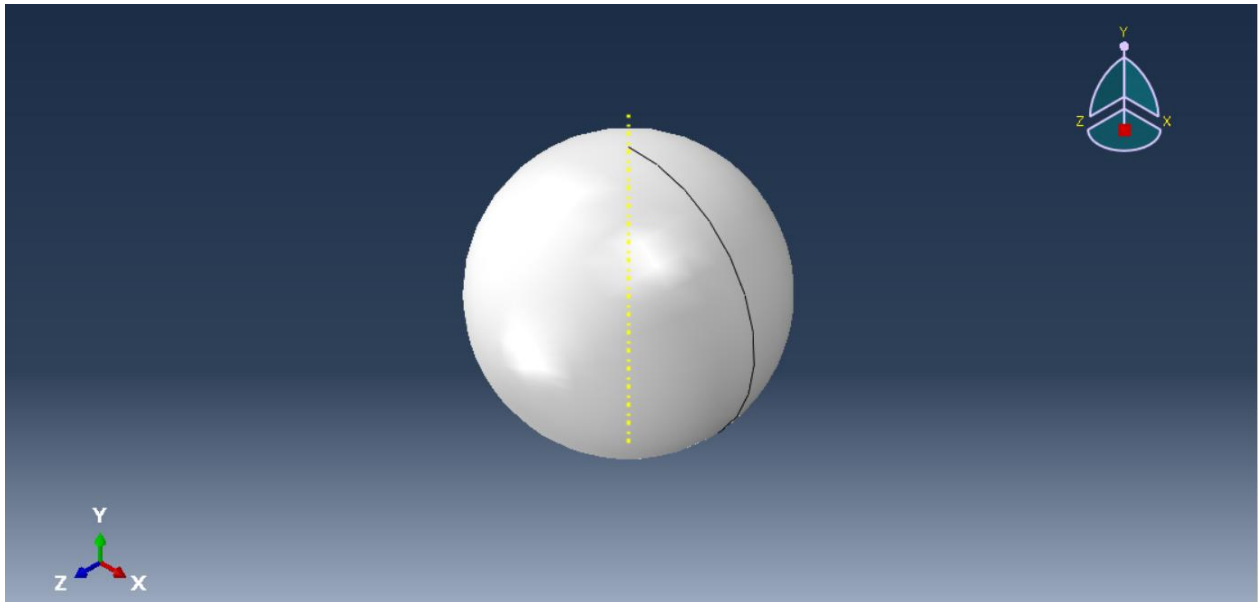
*Nota:* Fuente: El autor.

## Esferas Bubbledeck

Se detalla en la Figura 27:

### Figura 28

*Módulo Part – Esfera Bubbledeck (vacío esférico)*



*Nota:* Fuente: El autor.

#### 5.1.2.4. Propiedades

En el presente módulo se definen los modelos constitutivos y las propiedades de los materiales en ABAQUS. Se detalla en la Figura 28:

### Figura 29

*Módulo Property – Concreto*

Data					
	Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
1	31	0.1	1.16	0.667	0.001

*Nota:* Fuente: El autor

## Concreto

Se detalla en las Figuras 29, 30 y 31:

**Figura 30**

*Módulo Property – Densidad y Módulo de elasticidad*

The image shows two overlapping 'Edit Material' dialog boxes for 'Concrete'. The foreground dialog is focused on the 'Density' and 'Elastic' properties.

**Material Behaviors:** Density, Elastic, Concrete Damaged Plasticity, Concrete Compression Damage, Concrete Tension Damage.

**General | Mechanical | Thermal | Electrical/Magnetic | Other**

**Density:**  
 Distribution: Uniform  
 Use temperature-dependent data  
 Number of field variables: 0  
 Use temperature-dependent data  
 Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term  
 No compression  
 No tension

**Data:**

	Mass Density
1	2.4E-05

**Elastic:**  
 Type: Isotropic  
 Use temperature-dependent data  
 Number of field variables: 0  
 Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term  
 No compression  
 No tension

**Data:**

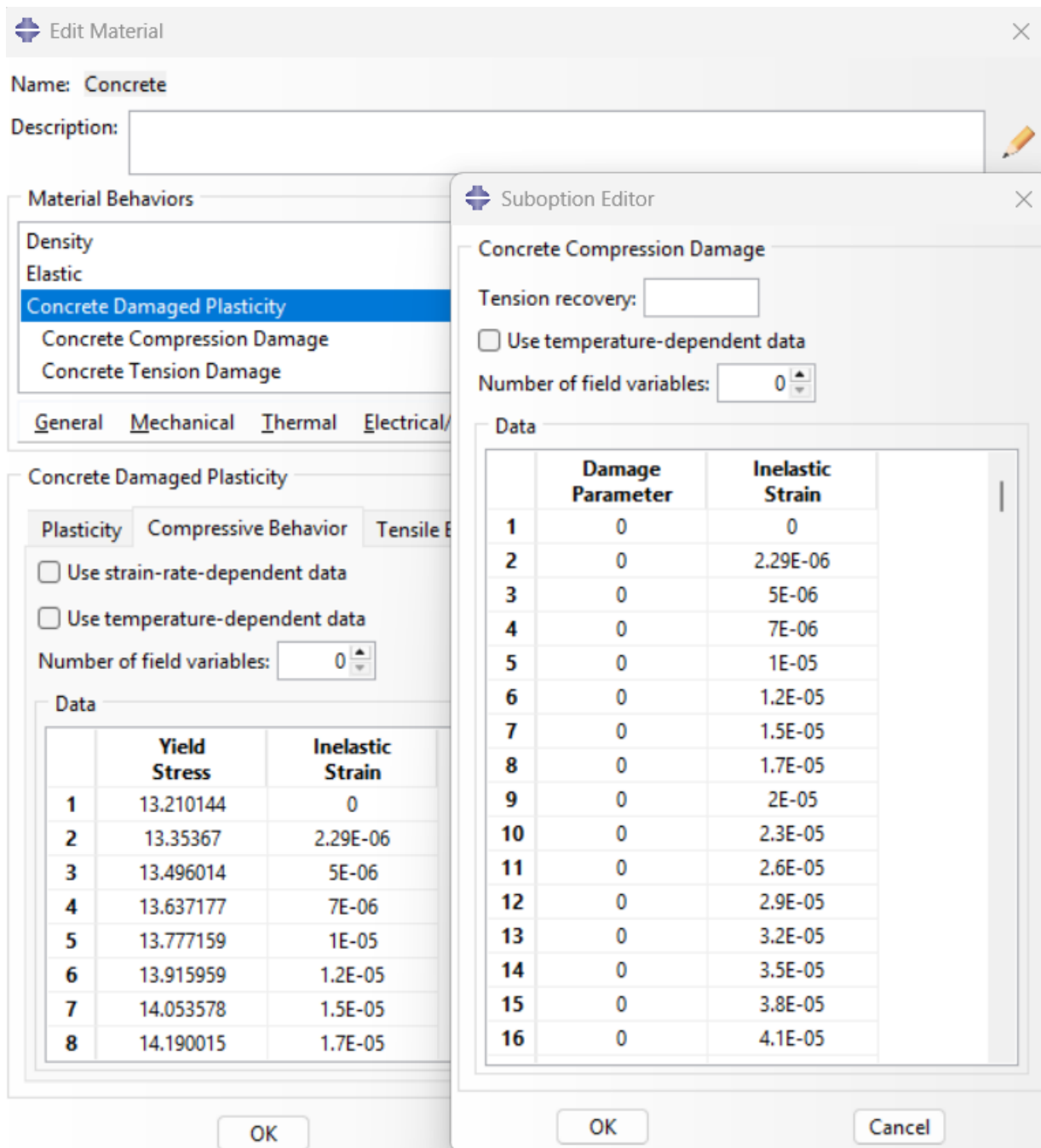
	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	23500	0.18

Buttons: OK, Cancel

*Nota:* Fuente: El autor.

Figura 31

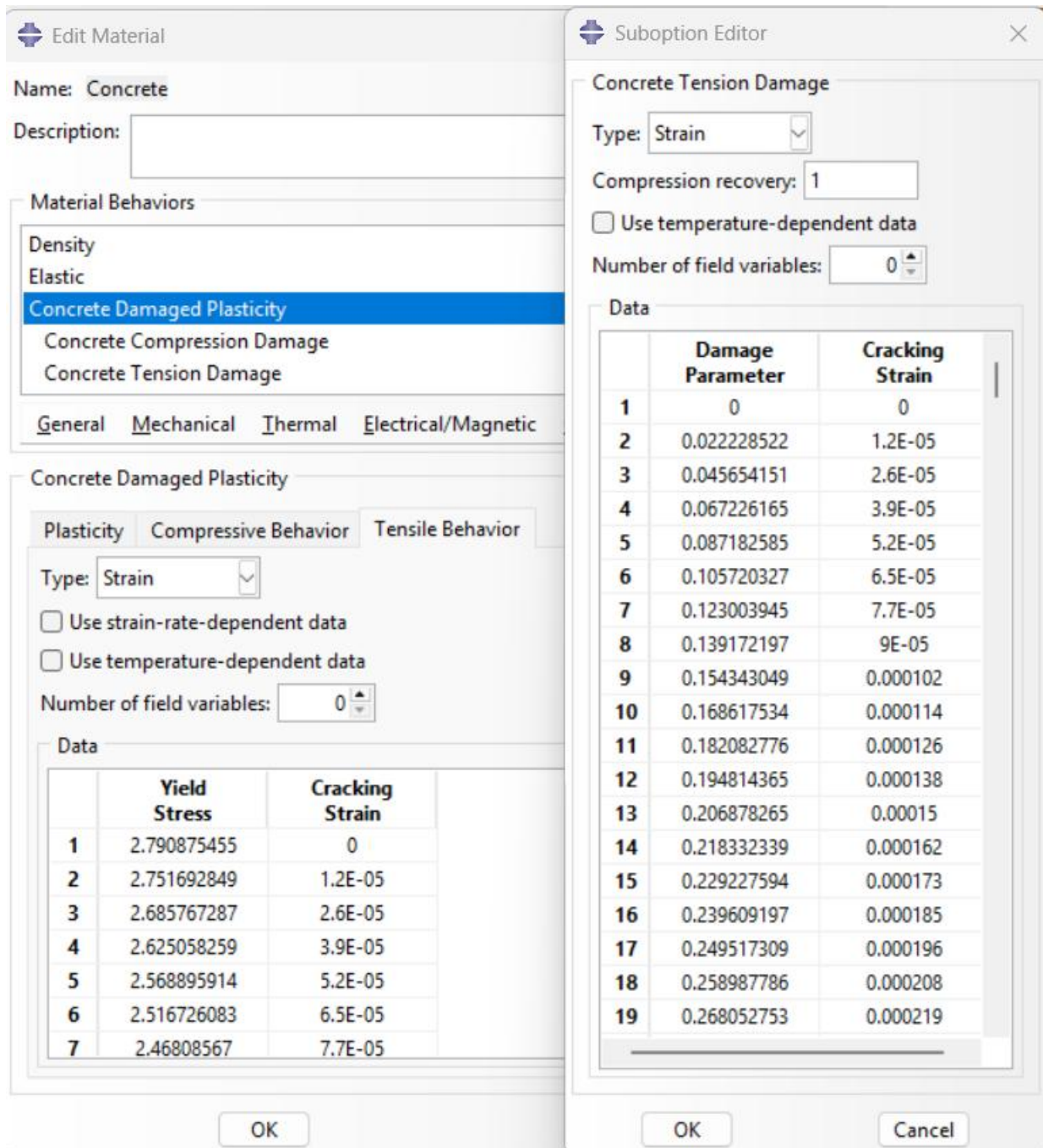
Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto (Comportamiento a compresión)



Nota: Fuente: El autor.

Figura 32

Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto (Comportamiento a tracción)



Nota: Fuente: El autor.

## Acero

Se detallan las propiedades para el acero que se definieron previamente. Se muestran en las Figuras 32 y 33:

**Figura 33**

*Módulo Property – Acero de refuerzo*

**Material Behaviors**

Density  
Elastic  
Plastic

**General Mechanical**

Density

Distribution: Uniform

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

No compression

No tension

**Data**

	Mass Density
1	7.8E-05

**Elastic**

Type: Isotropic

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

No compression

No tension

**Data**

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	210000	0.3

OK Cancel

*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 34**

*Módulo Property – Acero de refuerzo (Propiedades plásticas)*

**Edit Material**

Name: Steel

Description:

Material Behaviors

- Density
- Elastic
- Plastic**

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Plastic

Hardening:  Suboptions

Use strain-rate-dependent data

Use temperature-dependent data

Number of field variables:

Data

	Yield Stress	Plastic Strain
1	500	0

OK Cancel

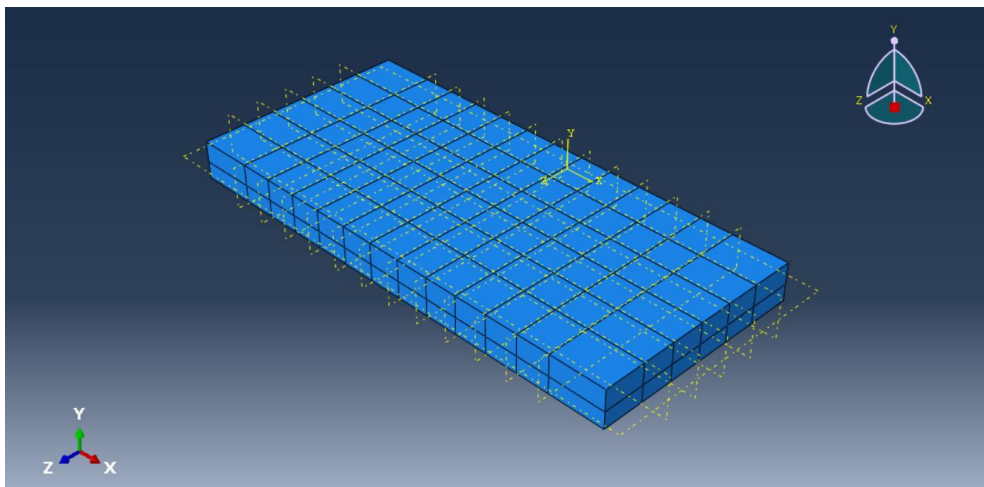
*Nota:* Fuente: El autor.

### 5.1.2.5. Ensamblaje del modelo

En el módulo ASSEMBLY, los modelos generados para el concreto, refuerzo de acero y vacíos esféricos del aligerado Bubbledeck; se colocaron mediante el sistema de coordenadas que usa el software Abaqus. Se detalla en las Figuras 34, 35, 36 y 37:

**Figura 35**

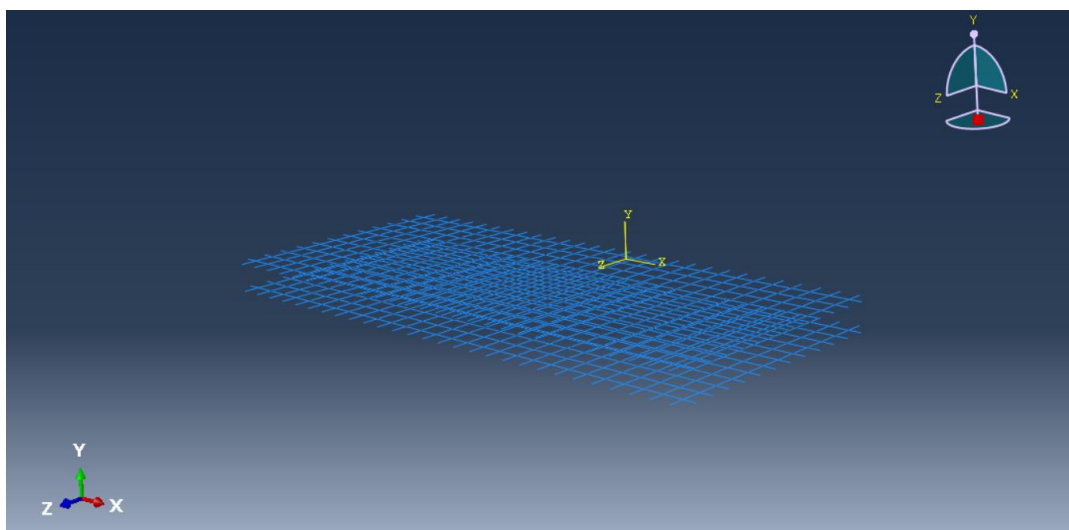
*Módulo Assembly - Ensamblaje de la losa Bubbledeck*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 36**

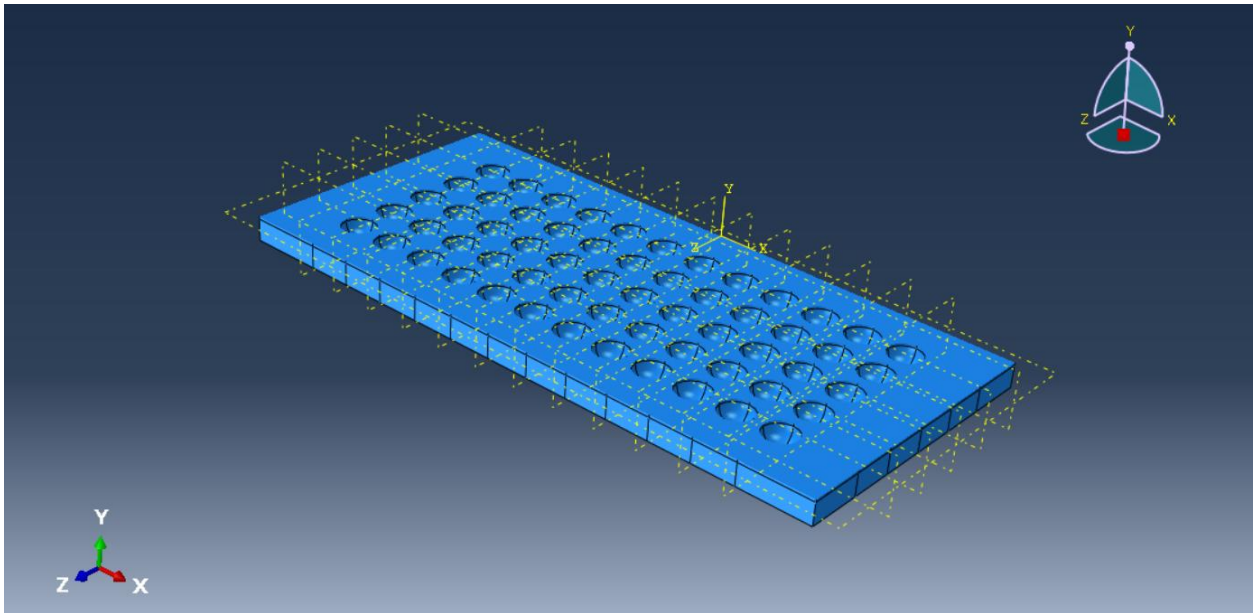
*Módulo Assembly - Ensamblaje del refuerzo de acero (Malla superior e inferior)*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 37**

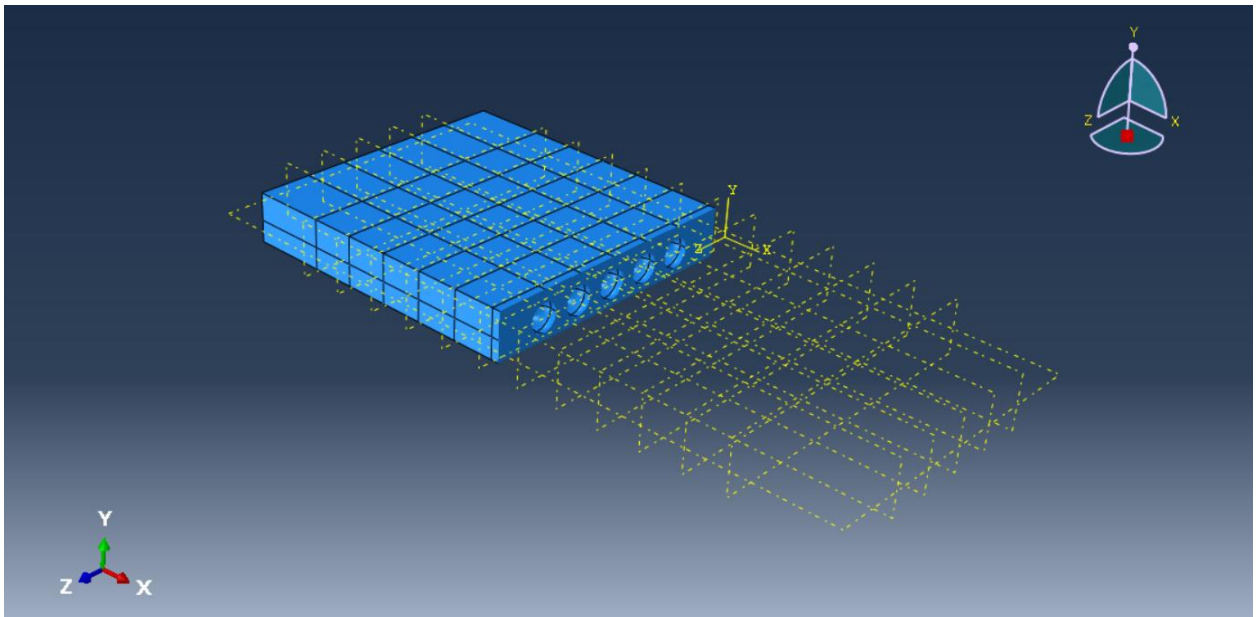
*Módulo Assembly - Ensamblaje de los vacíos esféricos (eje "y")*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 38**

*Módulo Assembly - Ensamblaje de los vacíos esféricos (eje "x")*



*Nota:* Fuente: El autor.

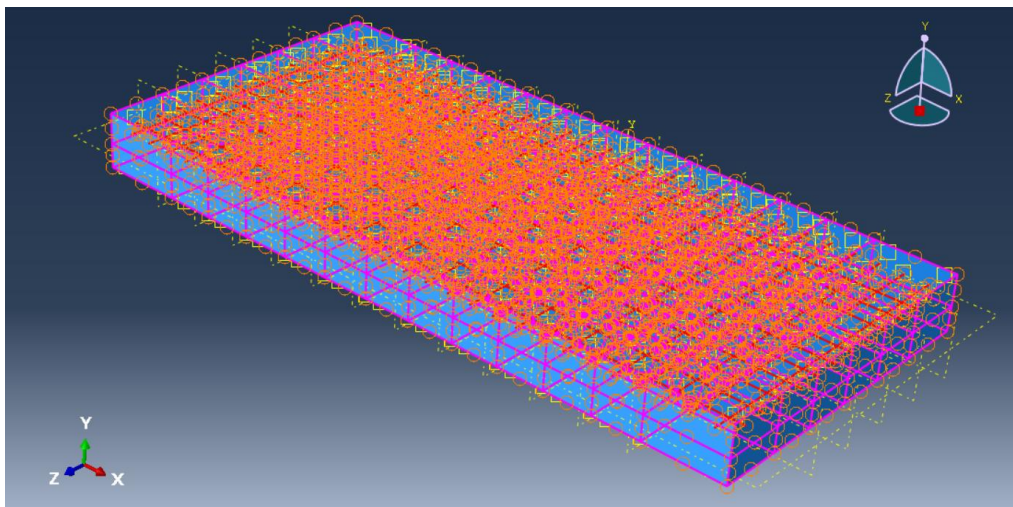
### 5.1.2.6. Restricciones asignadas

#### Restricción embebida

El refuerzo de acero y los vacíos esféricos se encuentra en el interior de la losa de concreto, para realizar éste proceso se usa el Módulo Interaction – Parámetro Constraint. Se detalla en las Figuras 38 y 39:

#### Figura 39

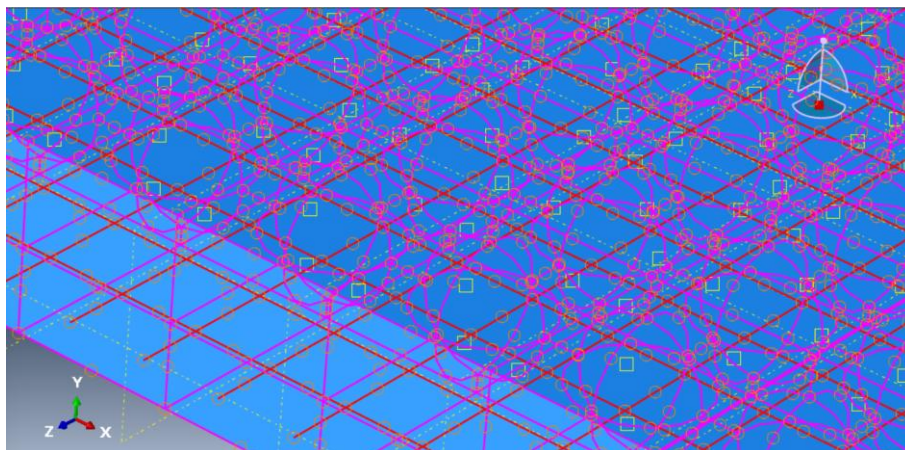
*Módulo Interaction – Parámetro Constraint*



*Nota:* Fuente: El autor.

#### Figura 40

*Módulo Interaction – Parámetro Constraint (Vista zoom de las regiones embebidas)*



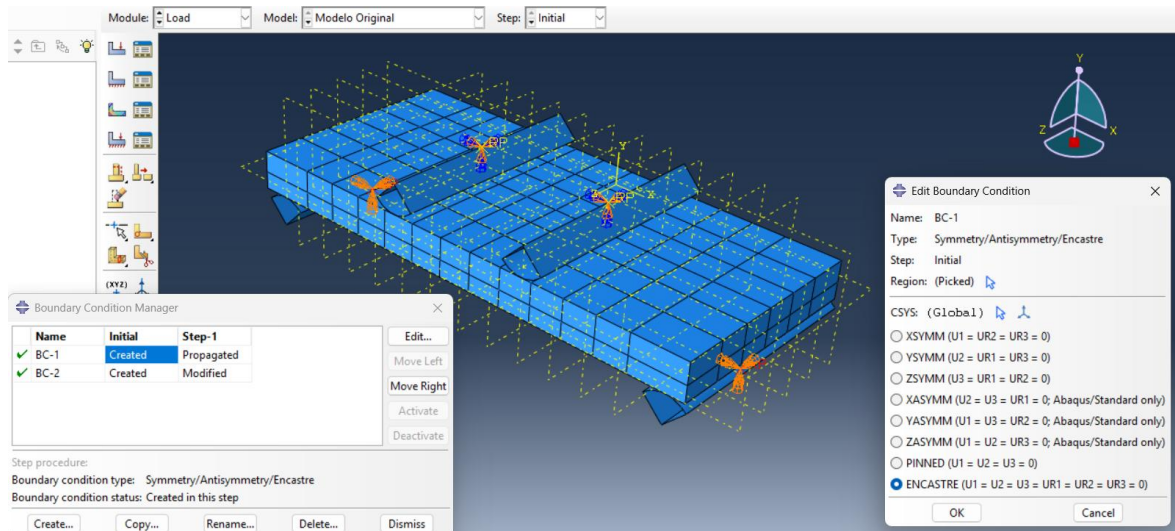
*Nota:* Fuente: El autor.

### 5.1.2.7. Asignación de cargas

**Condiciones de contorno:** Se detalla en las Figuras 40 y 41:

**Figura 41**

*Módulo Load - Restricción en los Apoyos*

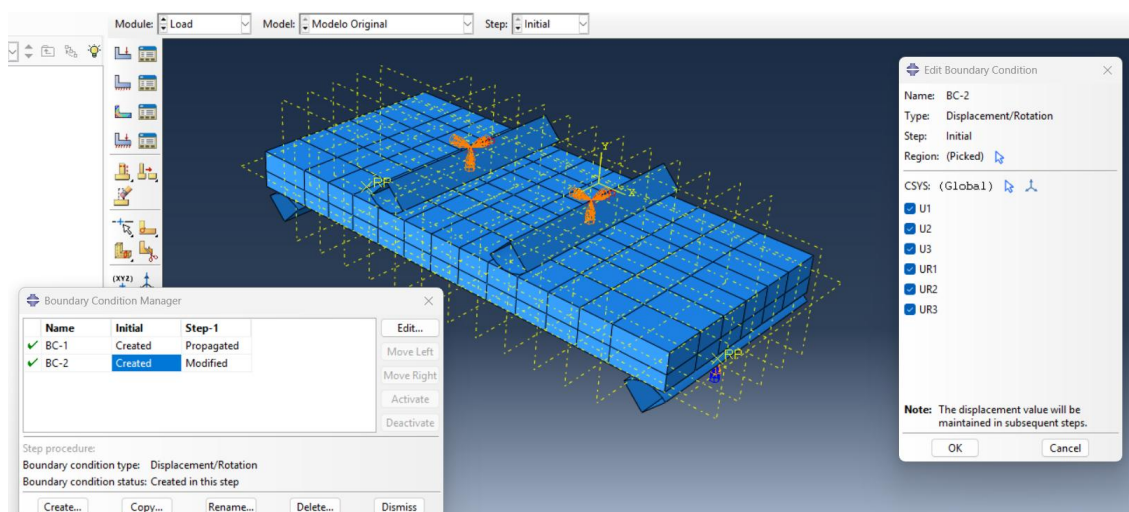


*Nota:* Fuente: El autor.

### Administrador de carga

**Figura 42**

*Módulo Load – Celdas de Carga ubicadas en los tercios de la longitud de la losa*



*Nota:* Fuente: El autor.

### 5.1.2.8. Enmallado

#### Losa Bubbledeck de concreto con vacíos esféricos embebidos

#### Enmallado

De acuerdo con Cook et al. (2002), un mallado más fino permite capturar con mayor precisión los gradientes de esfuerzo y deformación, mejorando la convergencia del modelo y reduciendo el error de discretización, especialmente en zonas críticas del análisis estructural.

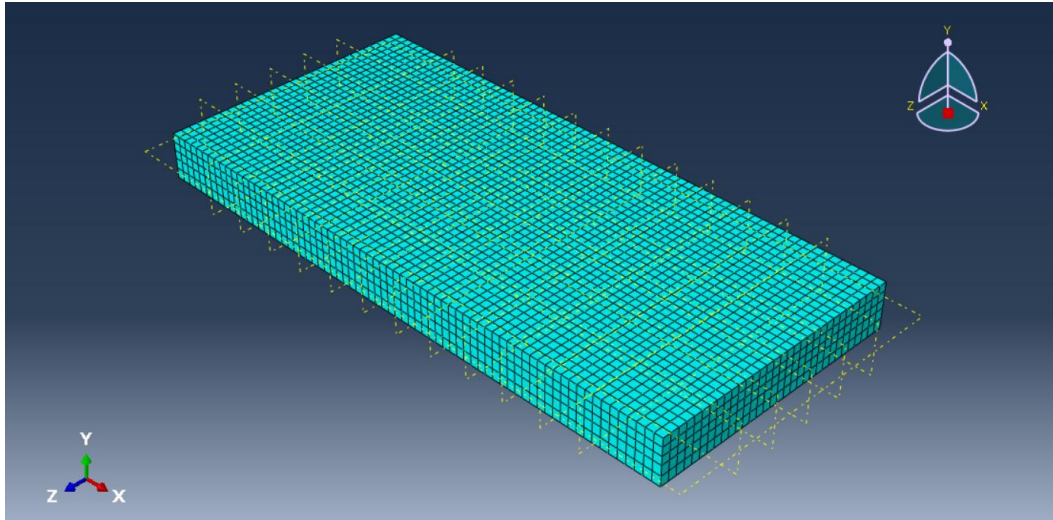
El tamaño del mallado (enmallado) es un factor crítico que afecta directamente la precisión de los resultados y el costo computacional del análisis, pues se considera los siguientes puntos:

- **Mayor precisión de resultados:** Al reducir el tamaño del elemento, el modelo puede capturar con mayor detalle los gradientes de deformación, esfuerzos y desplazamientos, especialmente en zonas donde hay concentraciones de esfuerzos o cambios bruscos en la geometría o condiciones de carga.
- **Mejor aproximación de discontinuidades y contactos:** En modelos con fisuras, juntas, interfaces o materiales compuestos, el mallado fino permite una mejor representación del comportamiento real, lo que es crucial si se desea simular roturas, plastificación localizada o interacción entre materiales.
- **Convergencia numérica:** Al disminuir el tamaño de los elementos, se reduce el error de discretización, lo que mejora la convergencia de la solución en análisis no lineales (materiales, geometría o contacto).
- **Mayor tiempo de cómputo y uso de memoria:** Un mallado más fino genera más nodos y elementos, lo que incrementa significativamente el tiempo de cálculo y el uso de recursos computacionales. Por eso se busca siempre un equilibrio entre precisión y costo computacional.

Para el presente modelo numérico se realizaron mallados a 50mm, 100mm y 200 mm como se aprecian en las Figuras 42, 43 y 44:

### Figura 43

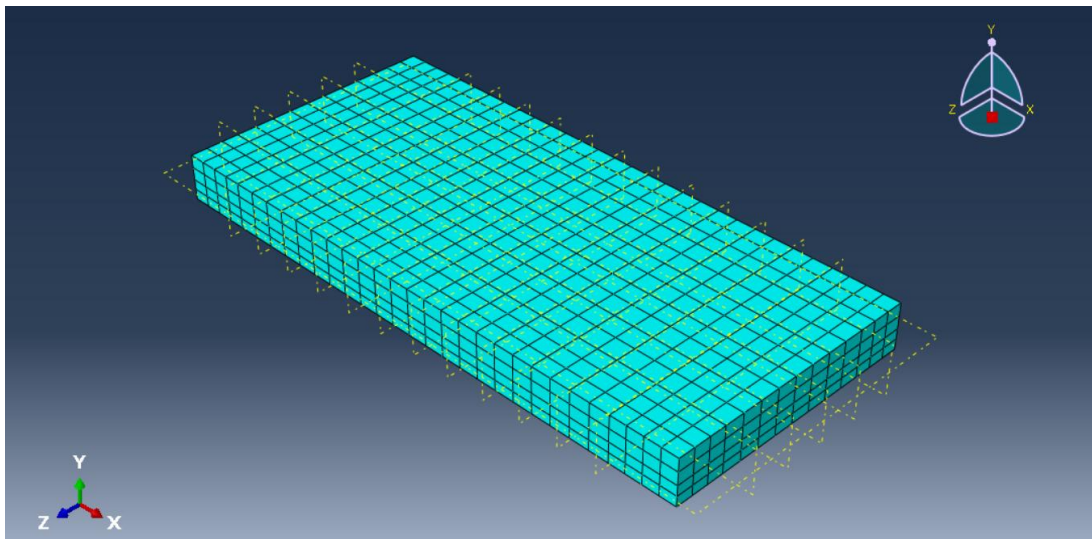
*Módulo Mesh -Enmallado a 50mm*



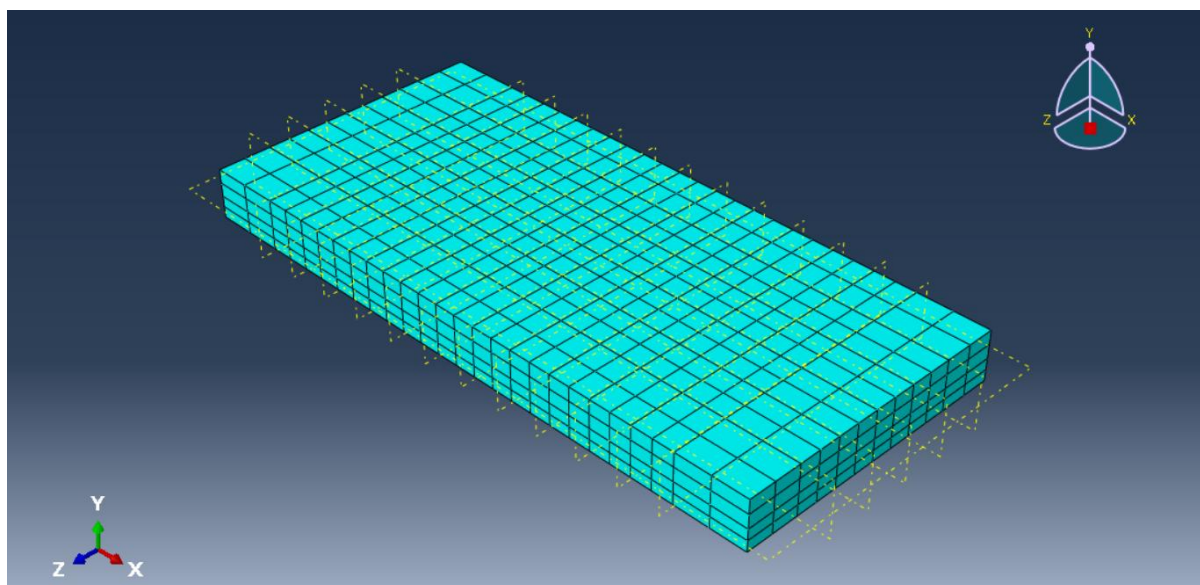
*Nota:* Fuente: El autor.

### Figura 44

*Módulo Mesh -Enmallado a 100mm*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 45***Módulo Mesh -Enmallado a 200mm*

*Nota:* Fuente: El autor.

Se detalla en la siguiente tabla la comparación entre el tamaño de mallas:

**Tabla 3***Comparación de tamaños de malla*

<b>Tamaño de malla</b>	<b>Precisión</b>	<b>Tiempo de cómputo</b>	<b>Recomendación</b>
50 mm	Alta	Alto	Más recomendable en zonas críticas
100 mm	Media	Medio	Aceptable en zonas no críticas
200 mm	Baja	Bajo	Solo recomendable en zonas con bajo gradiente de esfuerzos

*Nota:* Fuente: El autor.

### **Elementos lineales de tensión en 3D**

Según Zienkiewicz et al. (2005), los elementos hexaédricos proporcionan resultados más precisos y estables en análisis tridimensionales que los elementos tetraédricos, especialmente en problemas de deformaciones o esfuerzos concentrados. Además, requieren un menor número de elementos para lograr una solución con error aceptable.

En el método de elementos finitos (FEM), al trabajar con modelos tridimensionales (3D), es muy común elegir entre elementos hexaédricos (cuadriláteros en 3D) y elementos tetraédricos (triangulares en 3D). La selección del tipo de elemento tiene un gran impacto en la precisión, estabilidad y eficiencia del análisis. Los elementos hexaédricos lineales (8 nodos) se caracterizan por: tienen mejor comportamiento numérico, requieren menos elementos para obtener buena precisión y son menos susceptibles a distorsión geométrica que los tetraédricos.

El software Abaqus define una nomenclatura de tipos específicos de elementos finitos 3D que describe su forma, dimensión, tipo de interpolación y nodos. Los cuales se detallan en las siguientes tablas:

**Tabla 4**

*Elementos Hexaédricos (cuadriláteros en 3D)*

Nombre	Descripción
<b>C3D8</b>	Elemento <b>hexaédrico lineal</b> , con <b>8 nodos</b> (uno en cada vértice del cubo). Muy preciso.
<b>C3D8R</b>	Igual que el C3D8, pero con <b>reducción de integración</b> ("R" = reduced). Es más eficiente computacionalmente pero puede presentar <i>hourglassing</i> si no se controla. Ideal para grandes modelos estructurados.

*Nota.* Adaptado de \*ABAQUS Analysis User's Manual\* (Version 6.9), por Dassault Systèmes

SIMULIA Corp., 2009.

**Tabla 5**

*Elementos Tetraédricos (triangulares en 3D)*

Nombre	Descripción
<b>C3D4</b>	Elemento <b>tetraédrico lineal</b> , con <b>4 nodos</b> (uno en cada vértice del tetraedro). Menor precisión.
<b>C3D10</b>	Elemento <b>tetraédrico cuadrático</b> , con <b>10 nodos</b> (incluye nodos en el centro de cada arista). Mejor precisión que C3D4, pero más costoso computacionalmente. Ideal para geometrías complejas.

*Nota.* Adaptado de \*ABAQUS Analysis User's Manual\* (Version 6.9), por Dassault Systèmes

SIMULIA Corp., 2009.

**Tabla 6**

*Comparación entre elementos hexaédricos y tetraédricos*

<b>Característica</b>	<b>Hexaédrico (cuadrilátero 3D)</b>	<b>Tetraédrico (triangular 3D)</b>
Tipo de malla	Regular	Irregular / adaptable
Precisión por elemento	Alta	Media a baja
Sensibilidad a distorsión	Baja	Alta
Ideal para geometría compleja	Difícil	Fácil
Cantidad de elementos necesarios	Menor	Mayor
Tiempo de cálculo con misma precisión	Menor	Mayor
Estabilidad en análisis no lineales	Alta	Moderada
Tipo de elemento en ABAQUS	C3D8, C3D8R	C3D4, C3D10
Recomendado para análisis estructurales 3D	Sí	Solo si no es posible mallado estructurado

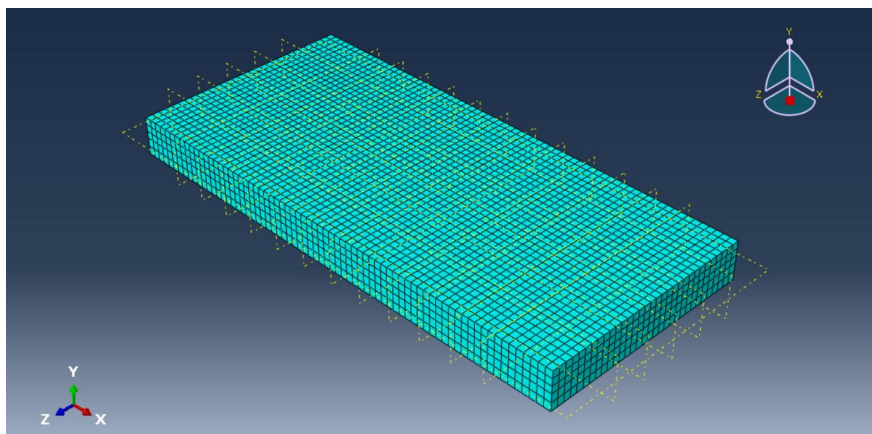
Nota. Adaptado de \*ABAQUS Analysis User's Manual\* (Version 6.9), por Dassault Systèmes

SIMULIA Corp., 2009.

En base a las recomendaciones de Simulia (2009), el enmallado se realizó en el Módulo Mesh con un tamaño de 50mm, 100mm y 200mm, se utilizará elemento lineales de tensión en 3D (cuadriláteros), cada elemento contiene 8 vértices (nodos) y sus grados de libertad es equivalente a 3. Se detalla en las Figuras 45 y 46:

**Figura 46**

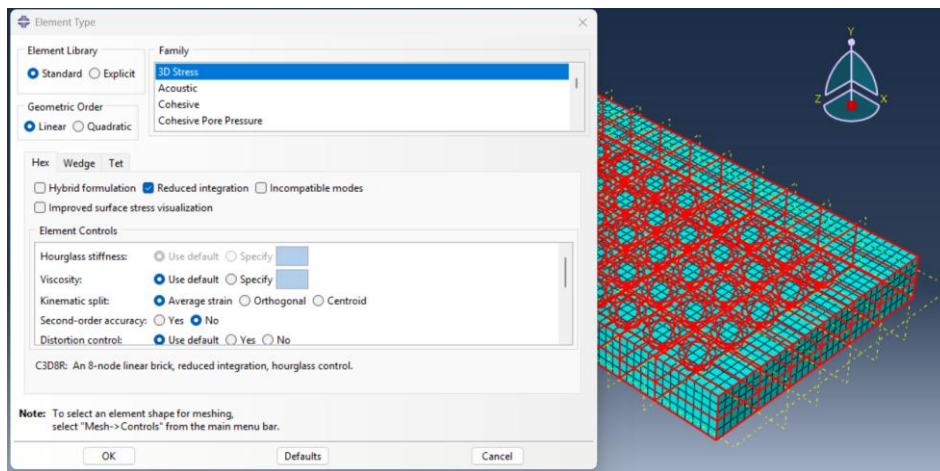
*Módulo Mesh – Losa Bubbledeck de concreto con vacíos esféricos*



Nota: Fuente: El autor.

**Figura 47**

*Módulo Mesh – Propiedades del enmallado de la Losa Bubbledeck con vacíos esféricos*



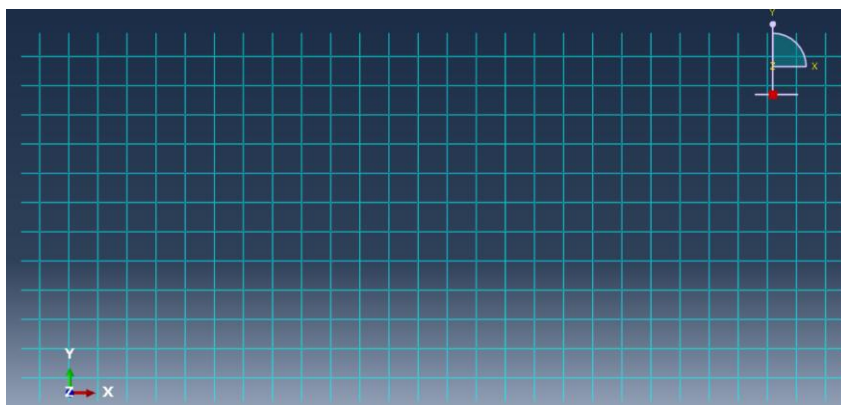
*Nota:* Fuente: El autor.

## Acero

El modelamiento del refuerzo de acero se realizó como una malla superior e inferior 3D, con un enmallado de 50mm y de orden geométrico lineal. Cada elemento del refuerzo de acero tendrá dos nodos, dado que se modela como líneas. Se detalla en las Figuras 47 y 48:

**Figura 48**

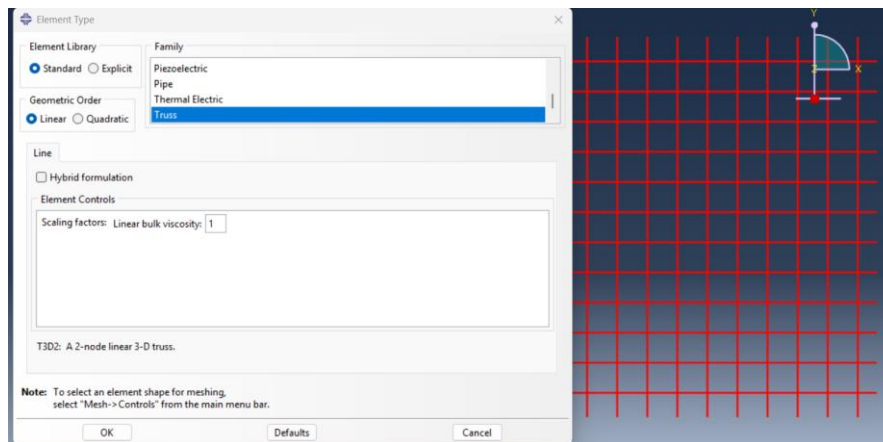
*Módulo Mesh – Enmallado del refuerzo de acero*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 49**

*Módulo Mesh – Propiedades del enmallado*



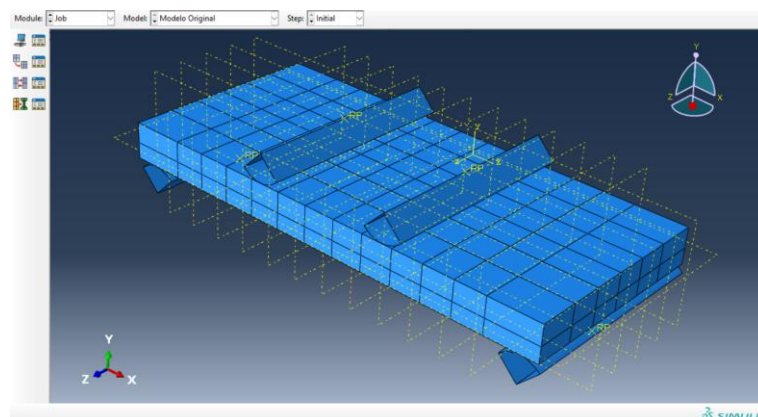
*Nota:* Fuente: El autor.

### 5.1.2.9. Convergencia del modelo

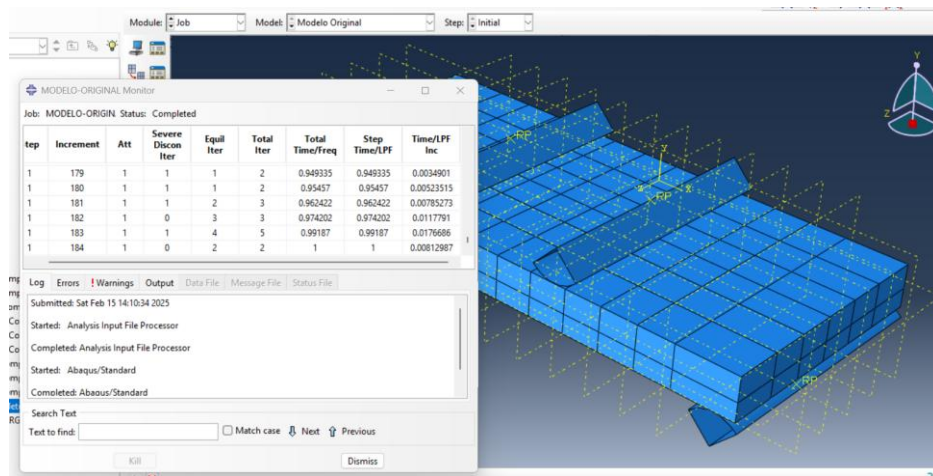
El modelo federado con los diferentes parámetros de enmallado y embebido es sometido a la convergencia mediante el Módulo Job, el cual realiza la solución de las ecuaciones diferenciales del método de elementos finitos, mediante iteraciones de acuerdo a los parámetros del enmallado, las soluciones e iteraciones se pueden observar en el Monitor del Módulo Job. Se detalla en las Figuras 49 y 50:

**Figura 50**

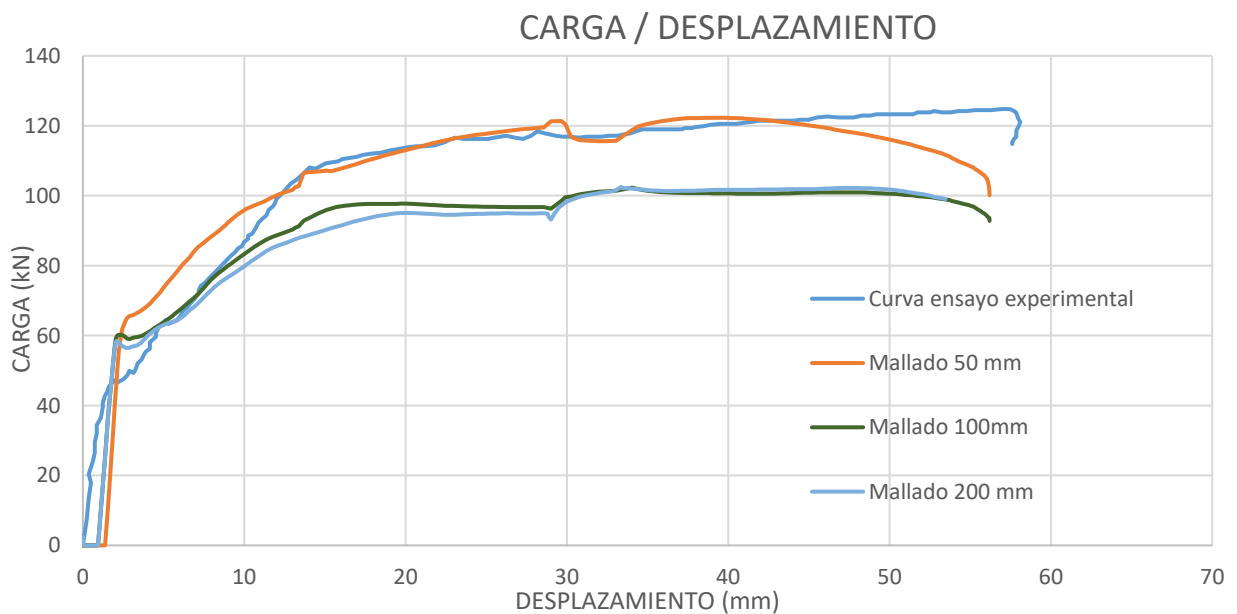
*Módulo Job – Modelo federado*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 51***Módulo Job – Monitor de convergencia**Nota:* Fuente: El autor.

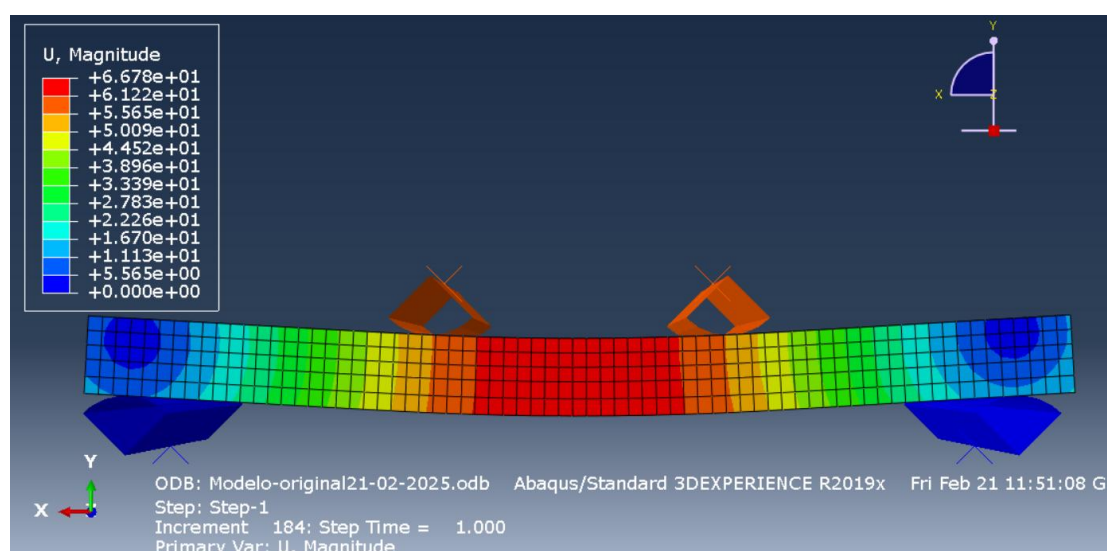
**5.1.2.10. Resultados Obtenidos de la simulación en el Software ABAQUS:** Se detalla en las Figuras 51 y 52:

**Figura 52***Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento**Nota:* Fuente: El autor.

Se observa en la Figura N°51 los resultados de la convergencia en curvas de carga desplazamiento donde se aprecia que la aproximación a la curva experimental es mucho mejor mientras las partículas discretizadas sean de menor dimensión, el enmallado que se tomará para la calibración será el de tamaño de 50mm, elementos lineales de tensión en 3D (cuadriláteros), cada elemento contiene 8 vértices (nodos) y sus grados de libertad es equivalente a 3. Los resultados de la convergencia se aprecian en la figura N°52.

### Figura 53

*Módulo Visualization – Resultados de la simulación 50mm*



*Nota:* Fuente: El autor.

Aplicación del método del Error Absoluto Promedio (MAE) (Hyndman, 2018) para comparar la curva del modelo numérico con la curva experimental:

### Tabla 7

*Datos calculados*

Desplazamiento (mm)	Carga Experimental (kN)	Carga Modelo (kN)	Error Absoluto (kN)
0.00	0.00	0.00	0.00
4.29	45.00	43.00	2.00
8.57	78.00	76.00	2.00
12.86	98.00	97.00	1.00

17.14	110.00	111.00	1.00
21.43	118.00	118.00	0.00
25.71	122.00	121.00	1.00
30.00	125.00	123.00	2.00
34.29	126.00	124.00	2.00
38.57	126.00	124.00	2.00
42.86	124.00	121.00	3.00
47.14	122.00	117.00	5.00
51.43	120.00	112.00	8.00
55.71	119.00	105.00	14.00
60.00	117.00	95.00	22.00

*Nota:* Fuente: El autor.

### **Cálculos:**

Error Absoluto promedio (MAE):

$$\frac{\sum |Carga_{exp} - Carga_{modelo}|}{n} = \frac{65}{15} = 4.33kN$$

Valor máximo experimental: 126 kN

Porcentaje de semejanza (%):

$$100 - \left( \frac{MAE}{Carga\ máx.\ experimental} * 100 \right) = 100 - \left( \frac{4.33}{126} * 100 \right) = 96.56\%$$

El modelo numérico **se asemeja en un 96.56% al ensayo experimental** según el método del **Error Absoluto Promedio**, lo que indica una **muy buena calibración** especialmente en la fase previa al colapso. Las principales diferencias se observan en la zona post-pico.

### **5.1.3. Realización de simulaciones numéricas de losas Bubbledeck ante diferentes configuraciones de esferas y refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos**

Para poder realizar las simulaciones numéricas, previamente se requería un modelo calibrado del ensayo experimental el cual nos dará una aproximación a la curva Carga – Desplazamiento; obtenida ésta curva procedemos a realizar variaciones en la resistencia a la

compresión de la losa Bubbledeck, configuración de esferas y el refuerzo de acero, para así poder contar con las curvas de carga – deformación con las variaciones mencionadas, para interpretar la respuesta estructural de las mismas ante un desplazamiento base que procede del ensayo experimental.

### 5.1.3.1. Variaciones en la resistencia a compresión del concreto

Obtenido el modelo calibrado, procedemos a realizar variaciones en los parámetros de resistencia a compresión del concreto ( $f^c$ ), se tomará los siguientes valores de diseño a la compresión del concreto en base al Modelo de Hognestad, los cuales serán sometido a la simulación:  $f^c = 21.00$  MPa,  $f^c = 28.00$  MPa,  $f^c = 35.00$  MPa.

Para el modelado del refuerzo de acero se detalla el modelo bilineal de Park y Paulay (1980) con una densidad de  $7.85 \times 10^{-5}$  N/mm<sup>3</sup> y con un Módulo de elasticidad de 210000 MPa, su resistencia a la fluencia es de 500 MPa, éste modelo se mantendrá en las variaciones de la resistencia a compresión del concreto.

**Tabla 8**

*Variaciones de la resistencia a compresión del modelo calibrado*

<b>Muestra</b>	<b><math>f^c</math> (Modelo experimental)</b>	<b>Dimensiones (Modelo experimental)</b>	<b>Carga</b>	<b>Diámetro del refuerzo de acero</b>	<b>Variación de resistencias a la compresión</b>
<b>Losa calibrada</b>	$f^c = 25.00$ MPa	1500 mm x 3300 mm	Tercios	$\emptyset = 6$ mm	$f^c = 21.00$ MPa $f^c = 28.00$ MPa $f^c = 35.00$ MPa

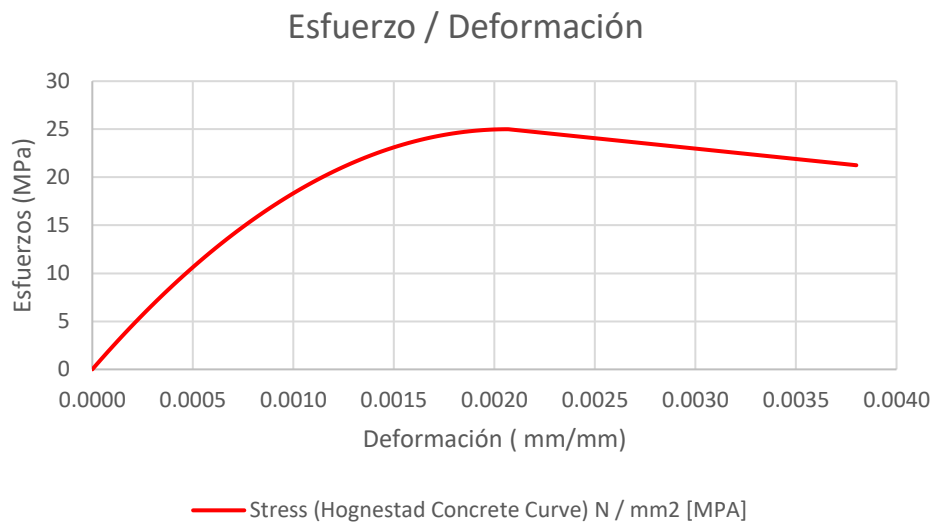
*Nota:* Fuente: El autor.

### Concreto $f'_c = 21.00 \text{ MPa}$

Se detalla en las Figuras 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61 y 62:

#### Figura 54

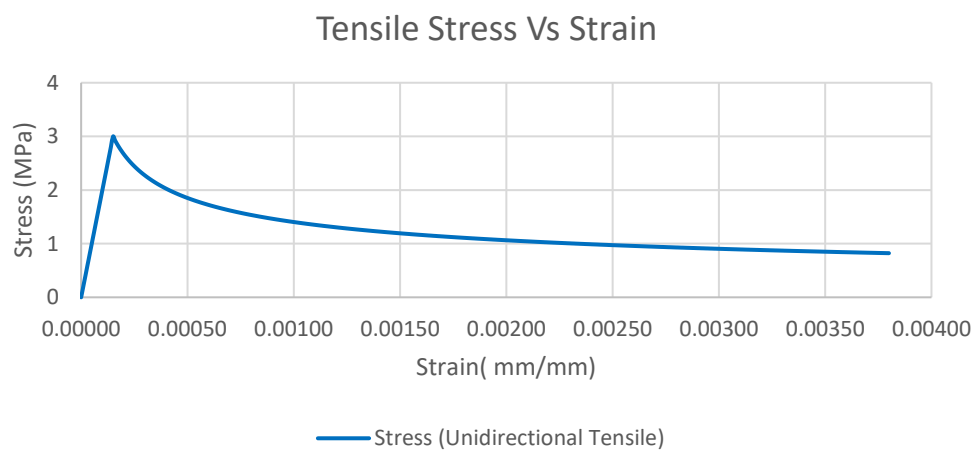
*Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a compresión*



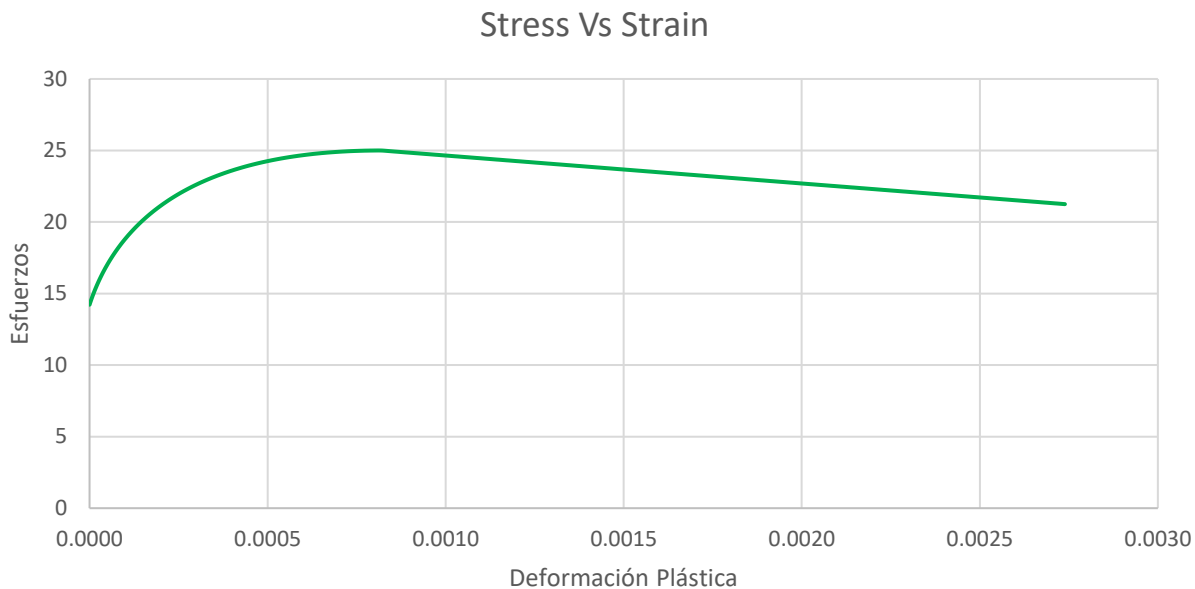
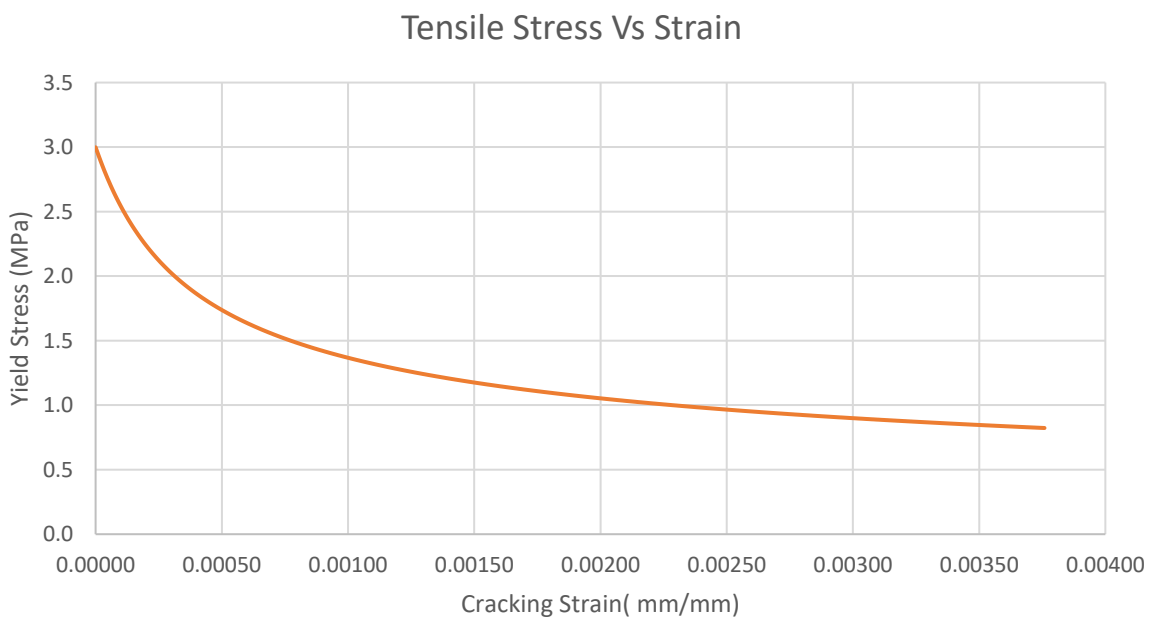
*Nota:* Fuente: El autor.

#### Figura 55

*Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a tensión*

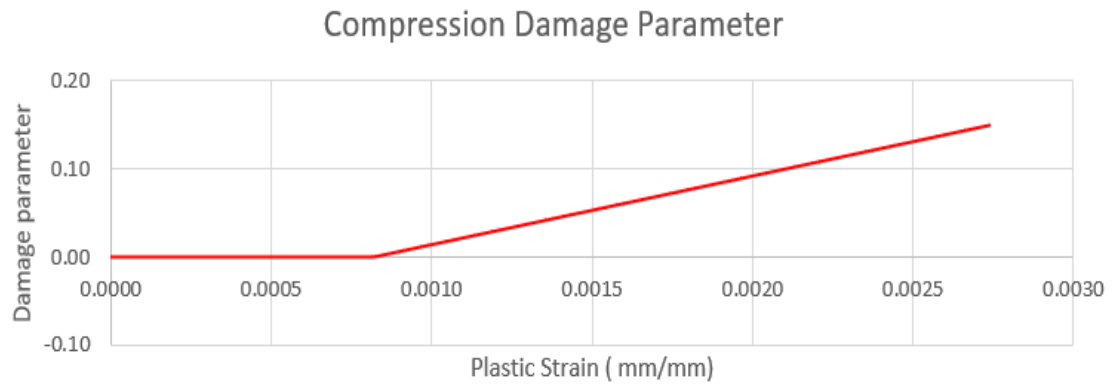


*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 56***Curva Esfuerzo – Deformación plástica**Nota:* Fuente: El autor.**Figura 57***Curva Esfuerzo a tracción del concreto – Deformación plástica**Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 58**

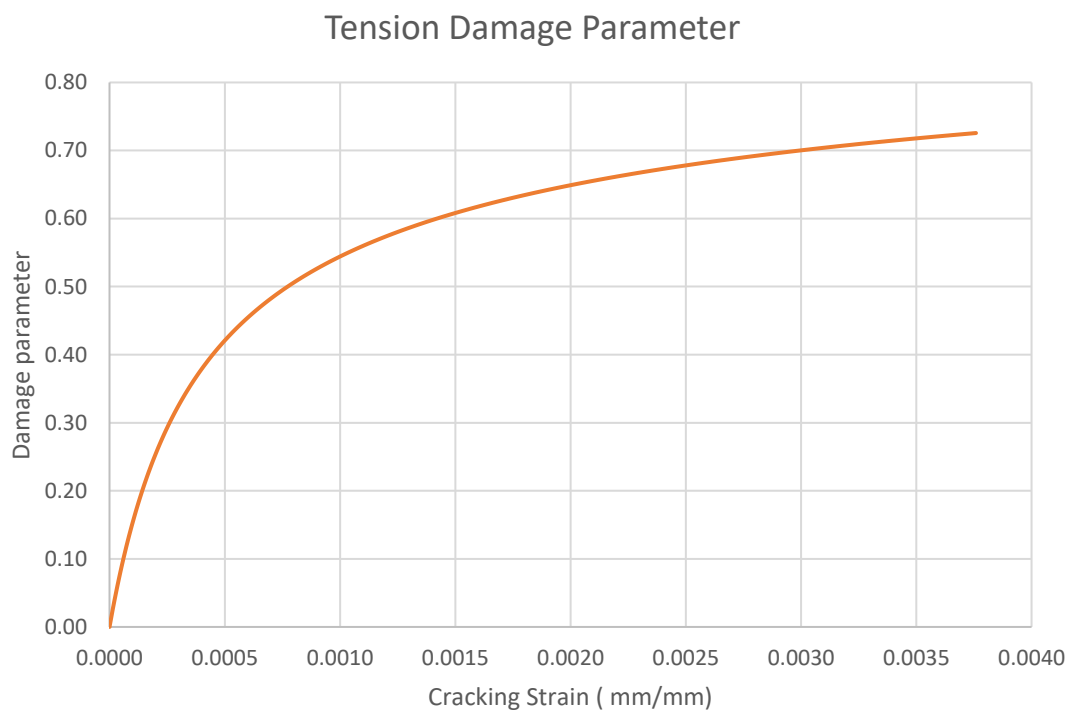
*Parámetro de daño a compresión*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 59**

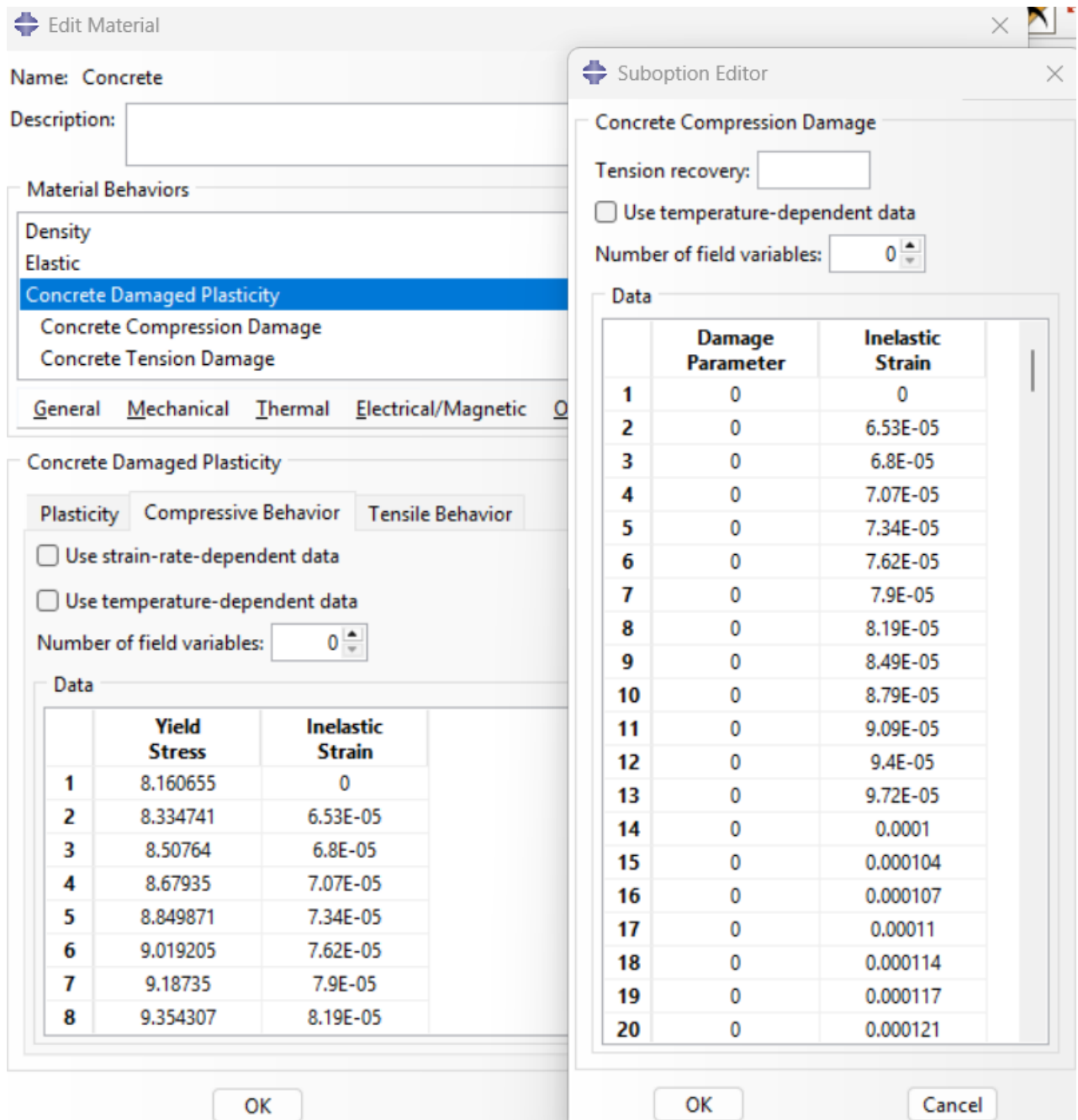
*Parámetro de daño a tensión*



*Nota:* Fuente: El autor.

Figura 60

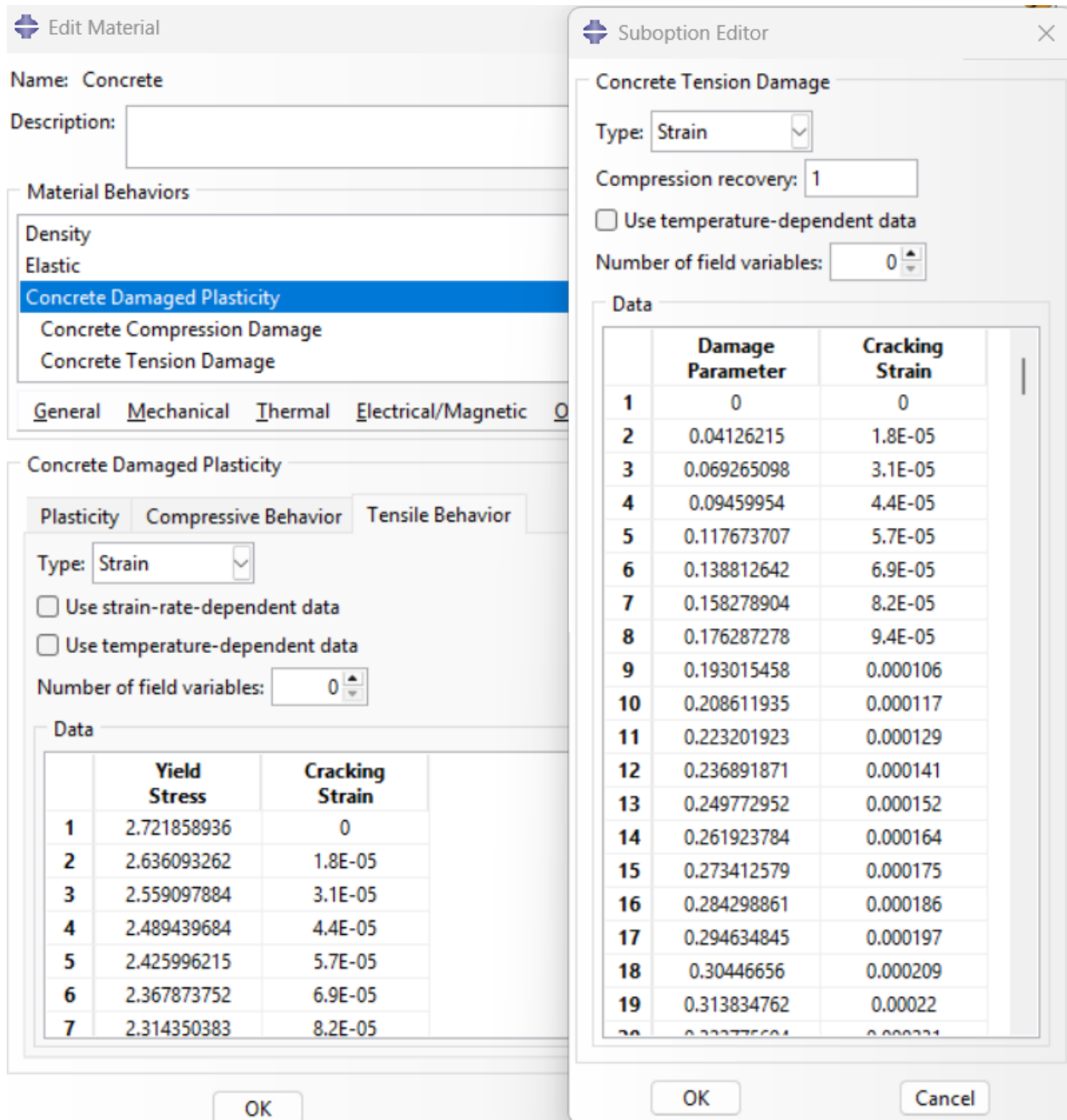
Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto  $f'c=21.00$  MPa (Comportamiento a compresión)



Nota: Fuente: El autor.

**Figura 61**

*Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto  $f'_c=21.00$  MPa (Comportamiento a tracción)*

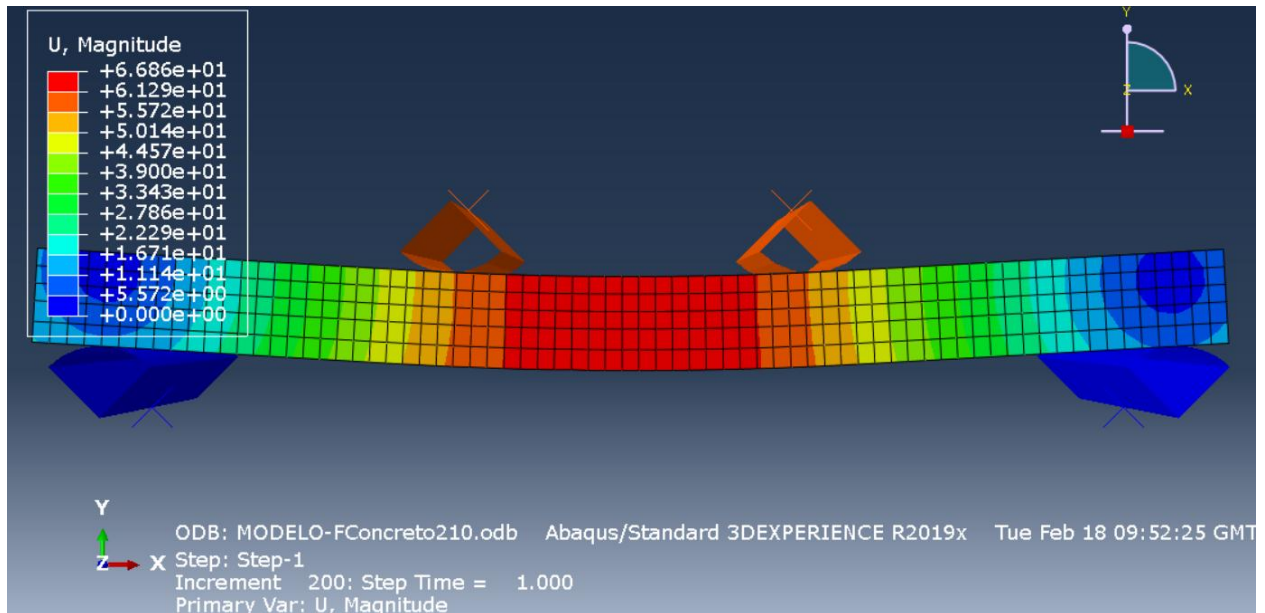


*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 62**

Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con  $f'_c=21.00$

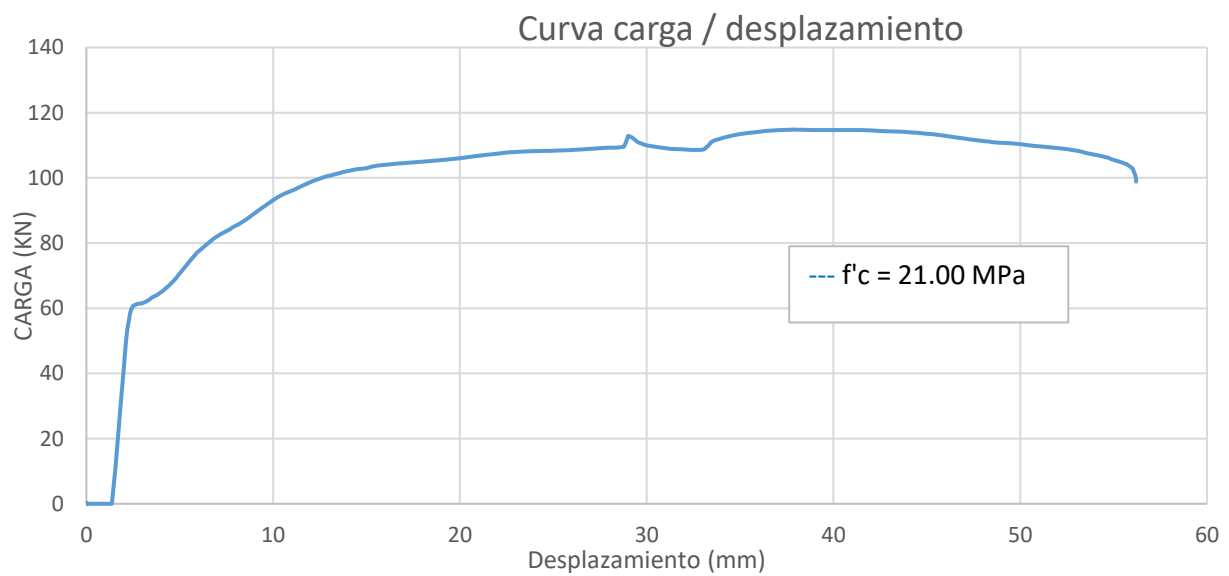
MPa.



Nota: Fuente: El autor.

**Figura 63**

Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento



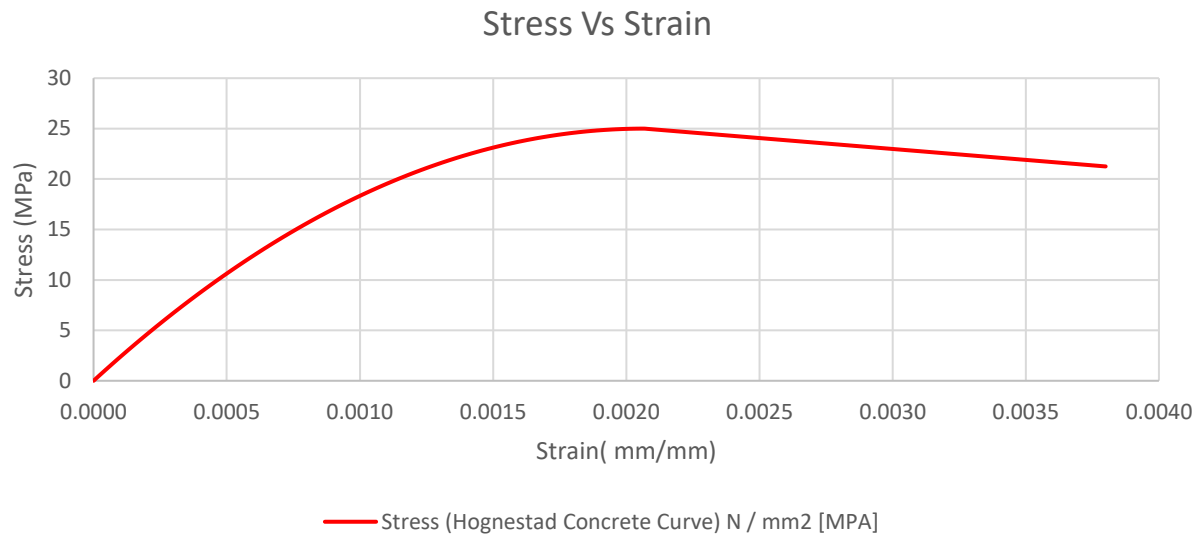
Nota: Fuente: El autor.

### Concreto $f'_c = 28.00$ MPa

Se detalla en las Figuras 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71 y 72:

#### Figura 64

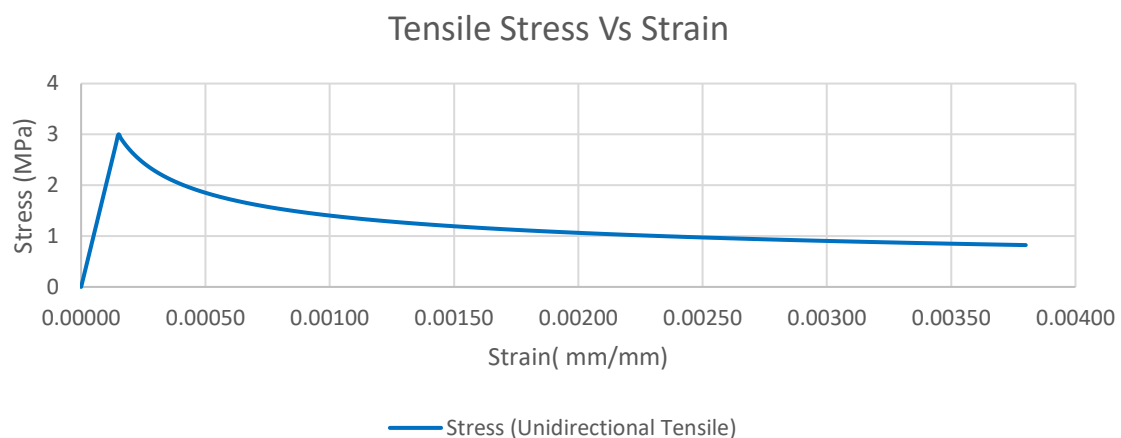
*Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a compresión*



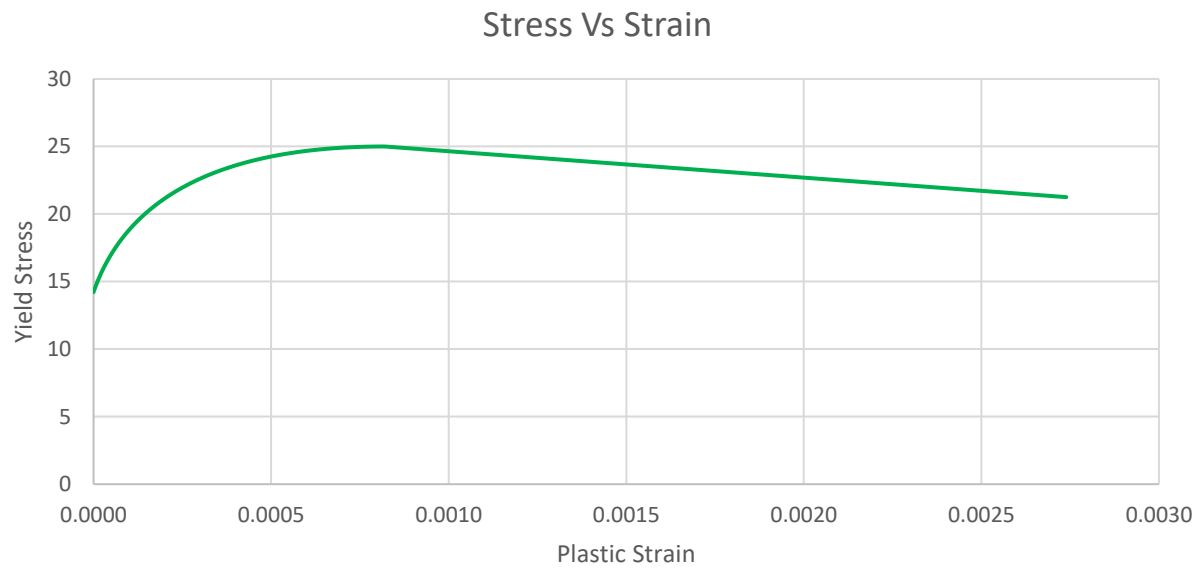
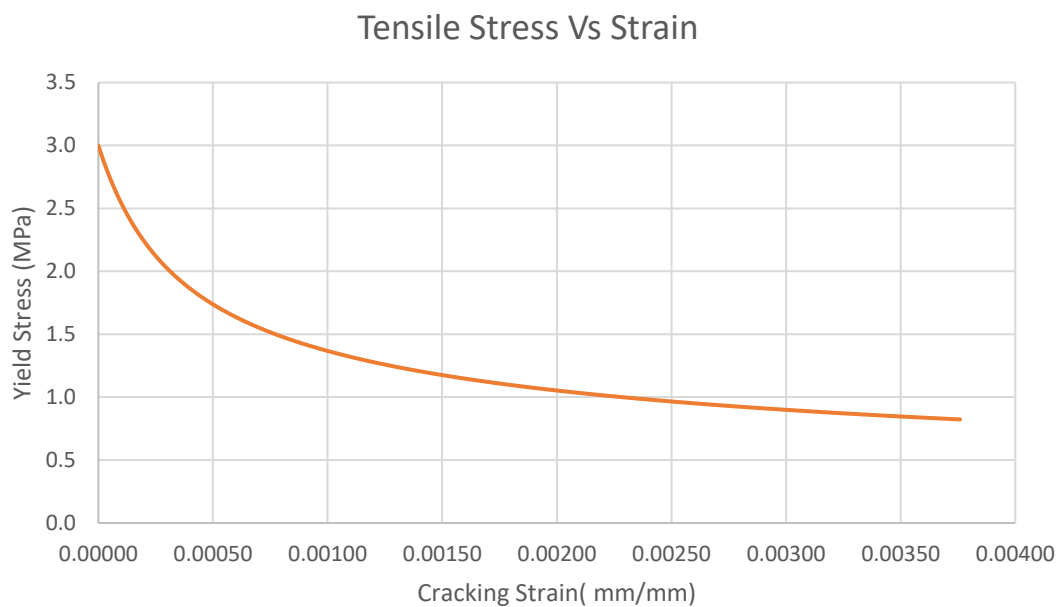
*Nota:* Fuente: El autor.

#### Figura 65

*Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a tensión*

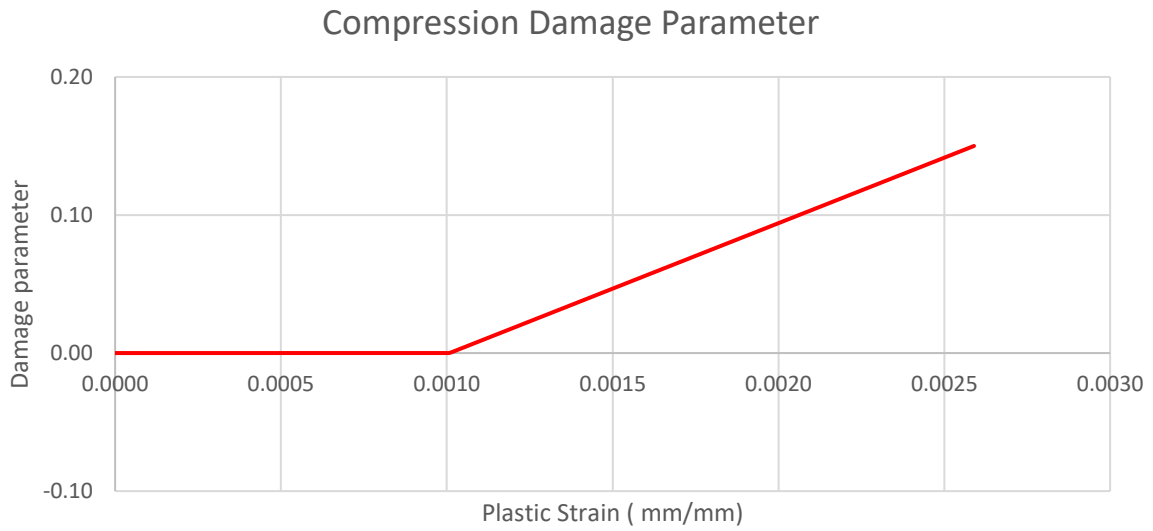


*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 66***Curva Esfuerzo – Deformación plástica**Nota:* Fuente: El autor.**Figura 67***Curva Esfuerzo a tracción del concreto – Deformación plástica**Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 68**

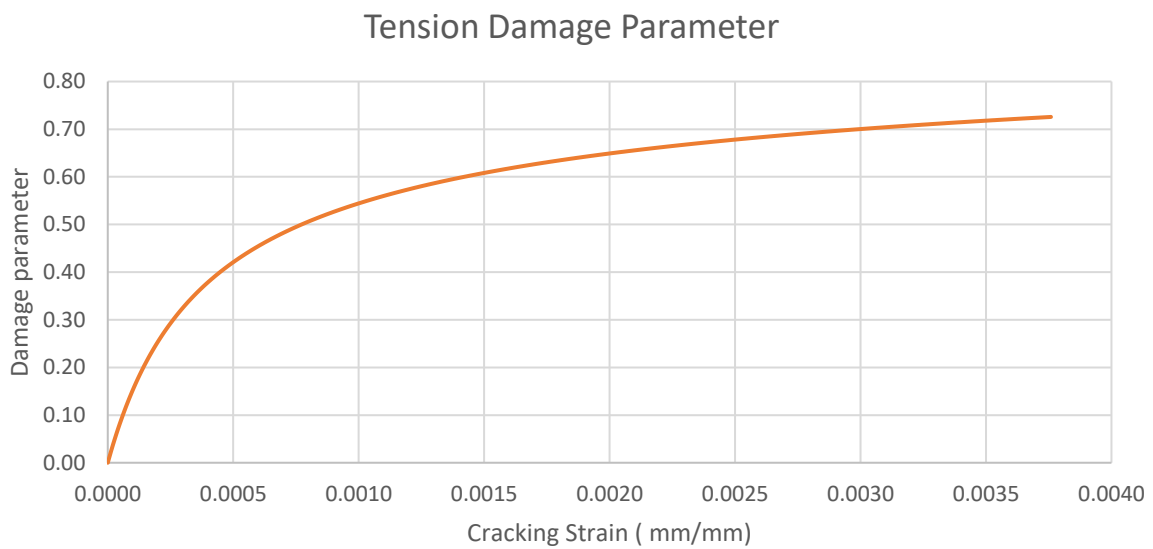
*Parámetro de daño a compresión*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 69**

*Parámetro de daño a tensión*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 70**

*Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto  $f'c=28.00$  MPa (Comportamiento a compresión)*

The image shows two overlapping software windows. The 'Edit Material' window on the left is titled 'Concrete' and shows various material behavior options. The 'Suboption Editor' window on the right is titled 'Concrete Compression Damage' and contains a table of data.

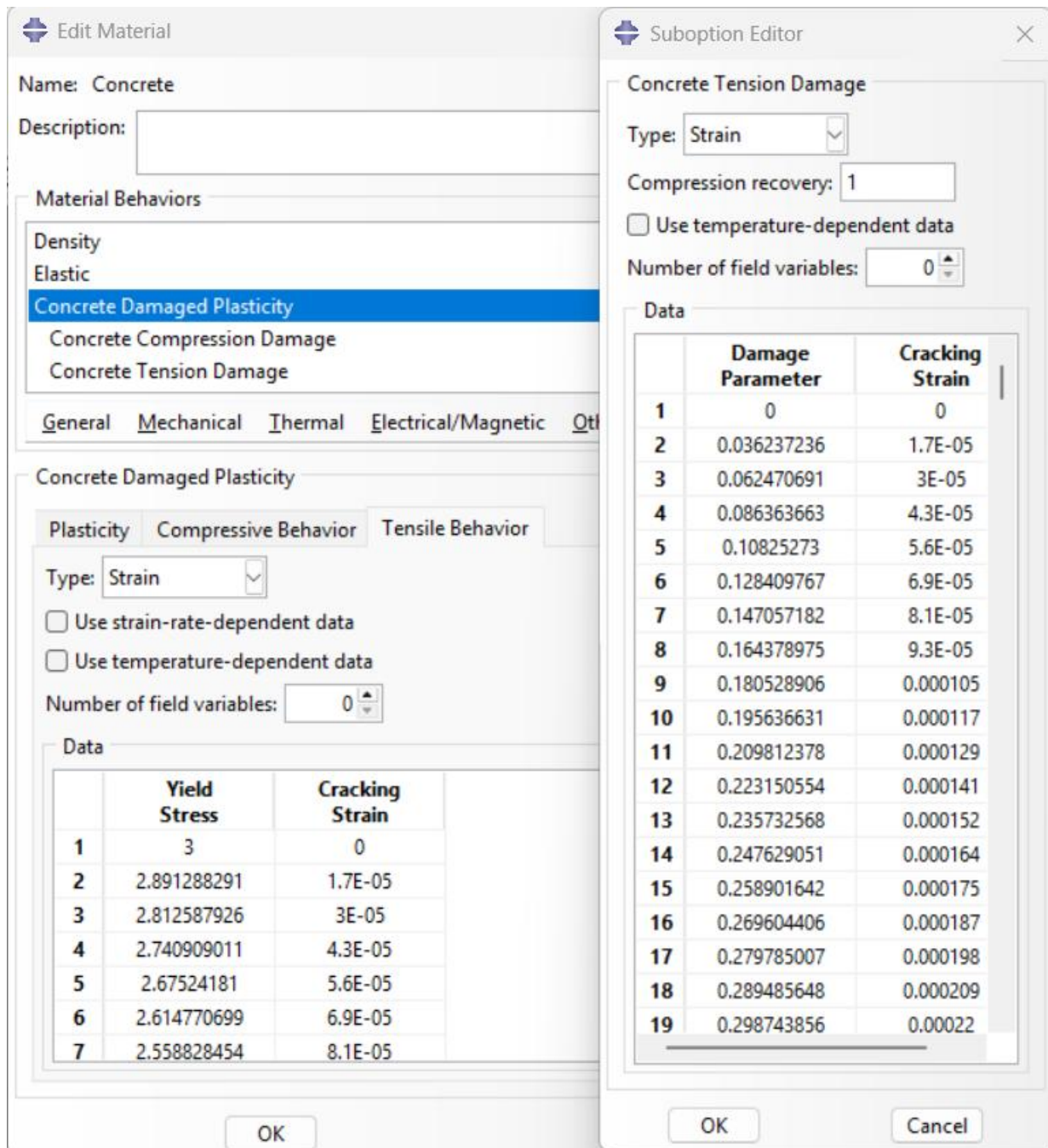
**Concrete Compression Damage Data Table:**

	Damage Parameter	Inelastic Strain
1	0	0
2	0	6.97E-06
3	0	8.2E-06
4	0	9.49E-06
5	0	1.08E-05
6	0	1.22E-05
7	0	1.36E-05
8	0	1.51E-05
9	0	1.66E-05
10	0	1.82E-05
11	0	1.99E-05
12	0	2.15E-05
13	0	2.33E-05
14	0	2.5E-05
15	0	2.69E-05
16	0	2.88E-05
17	0	3.07E-05
18	0	3.27E-05
19	0	3.47E-05
20	0	3.68E-05
21	0	3.89E-05

*Nota:* Fuente: El autor.

Figura 71

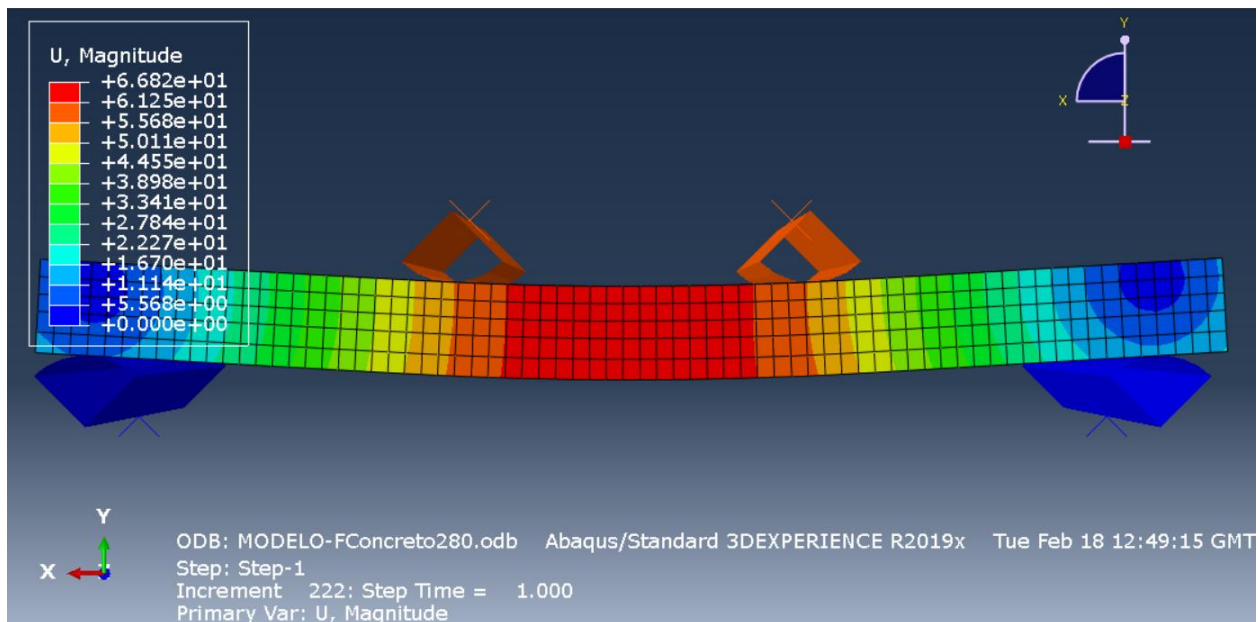
Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto  $f'_c=28.00$  MPa (Comportamiento a tracción)



Nota: Fuente: El autor.

**Figura 72**

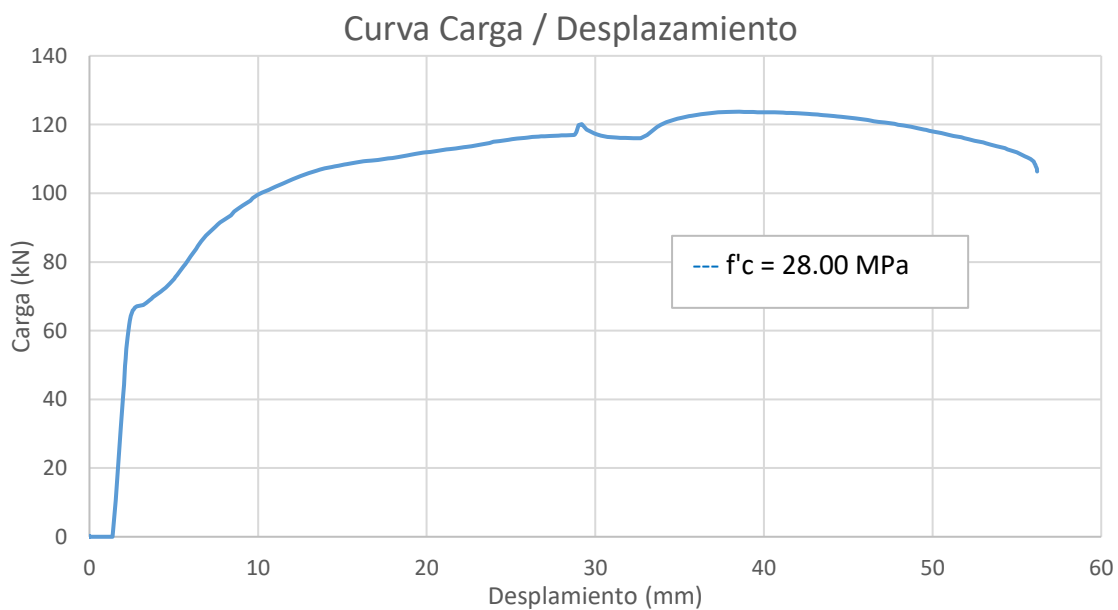
Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con  $f'c=28.00$  MPa.



Nota: Fuente: El autor.

**Figura 73**

Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento



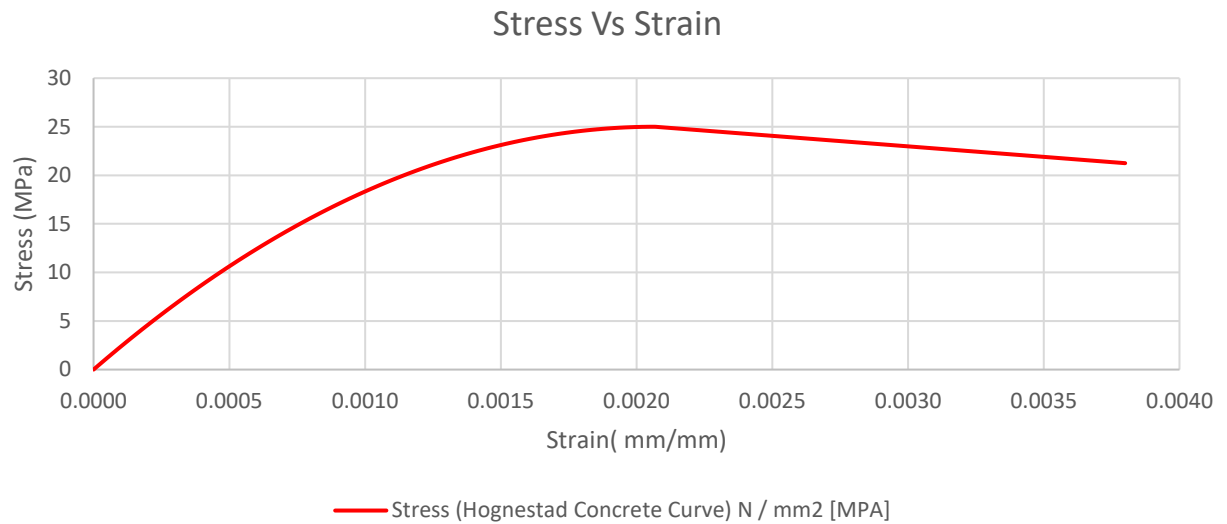
Nota: Fuente: El autor.

### Concreto $f'_c = 35.00$ MPa

Se detalla en las Figuras 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81 y 82:

#### Figura 74

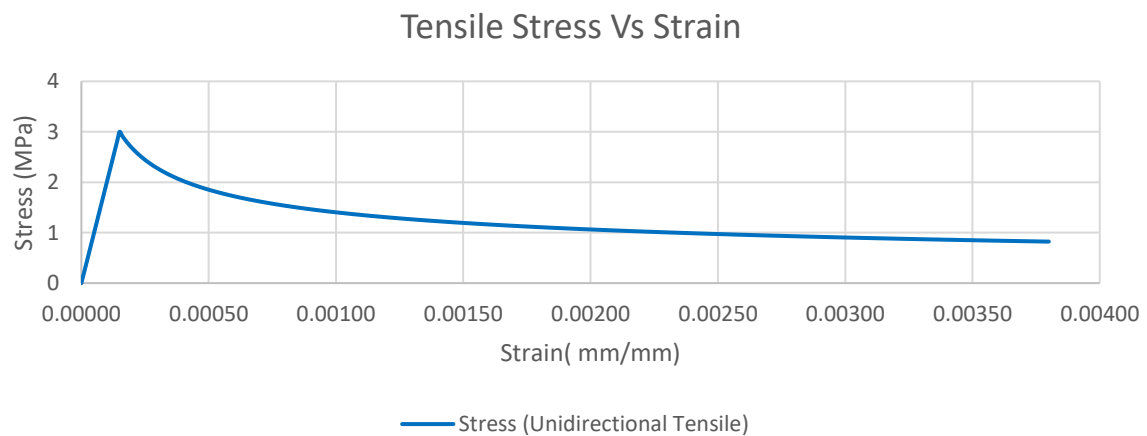
*Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a compresión*



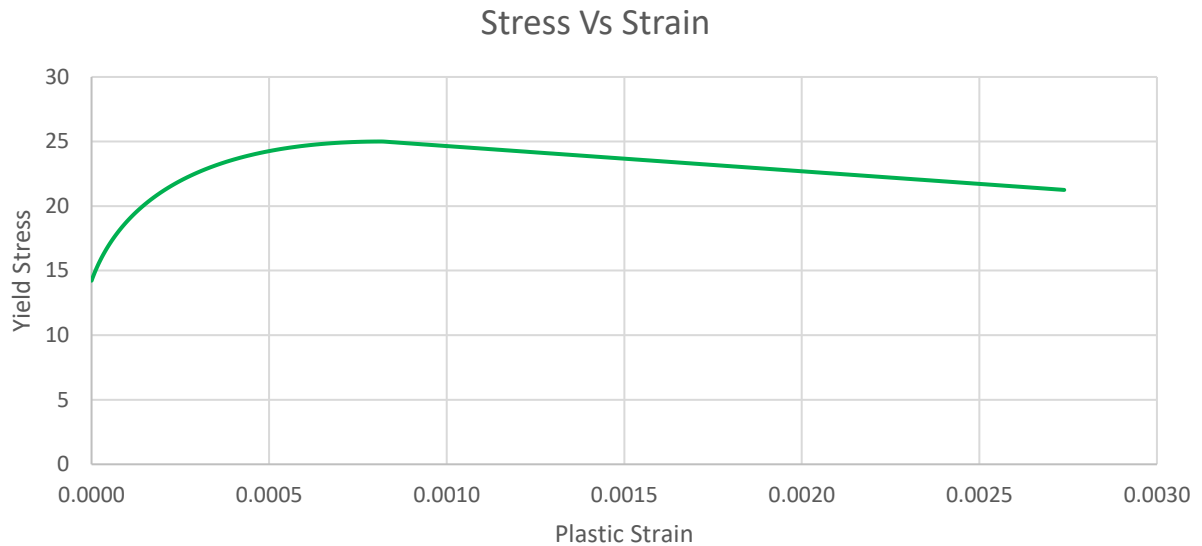
*Nota:* Fuente: El autor.

#### Figura 75

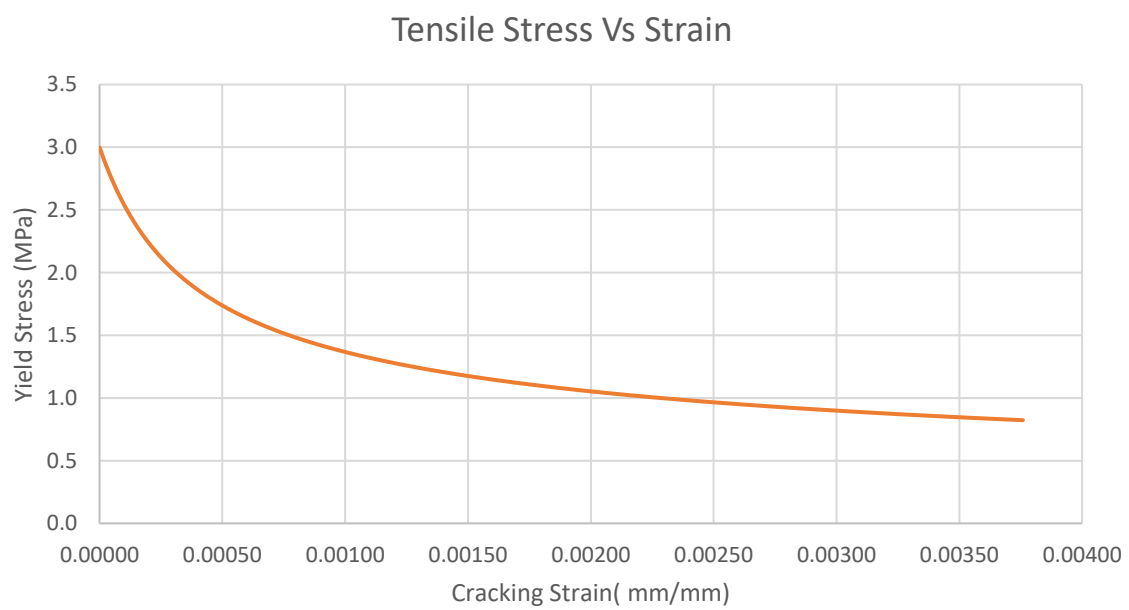
*Curva Esfuerzo – Deformación del concreto a tensión*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 76***Curva Esfuerzo – Deformación plástica*

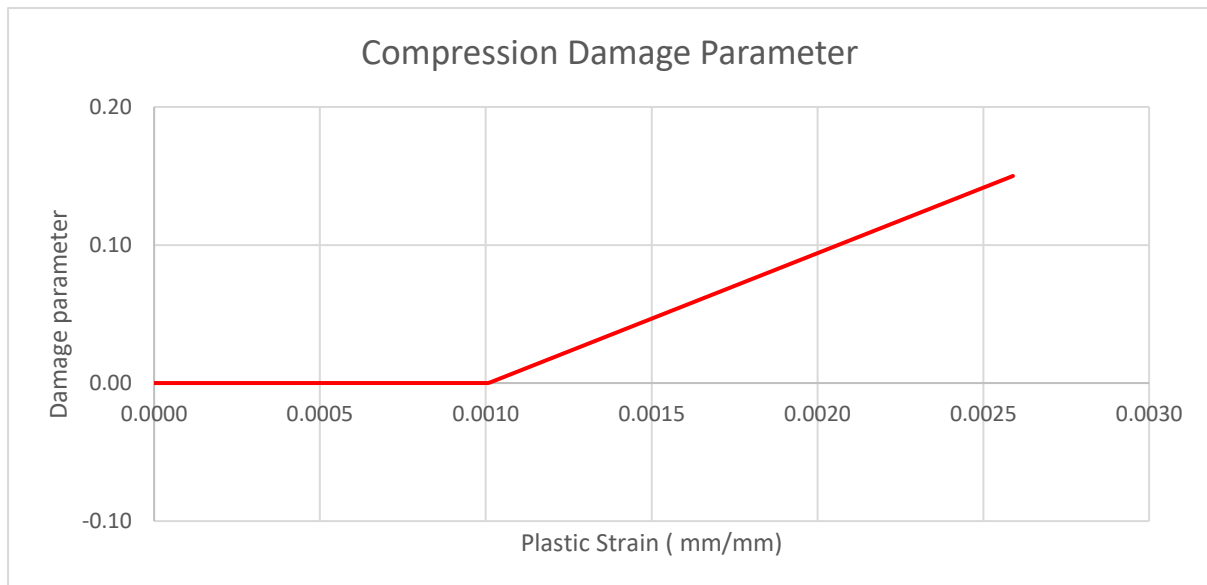
*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 77***Curva Esfuerzo a tracción del concreto – Deformación plástica*

*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 78**

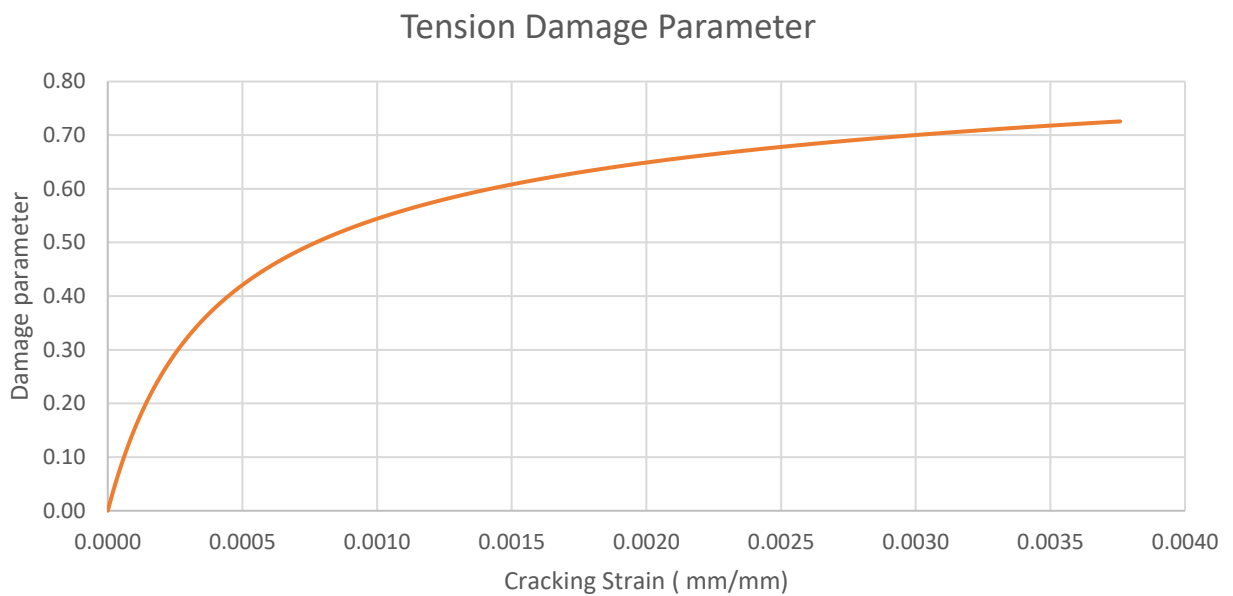
*Parámetro de daño a compresión*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 79**

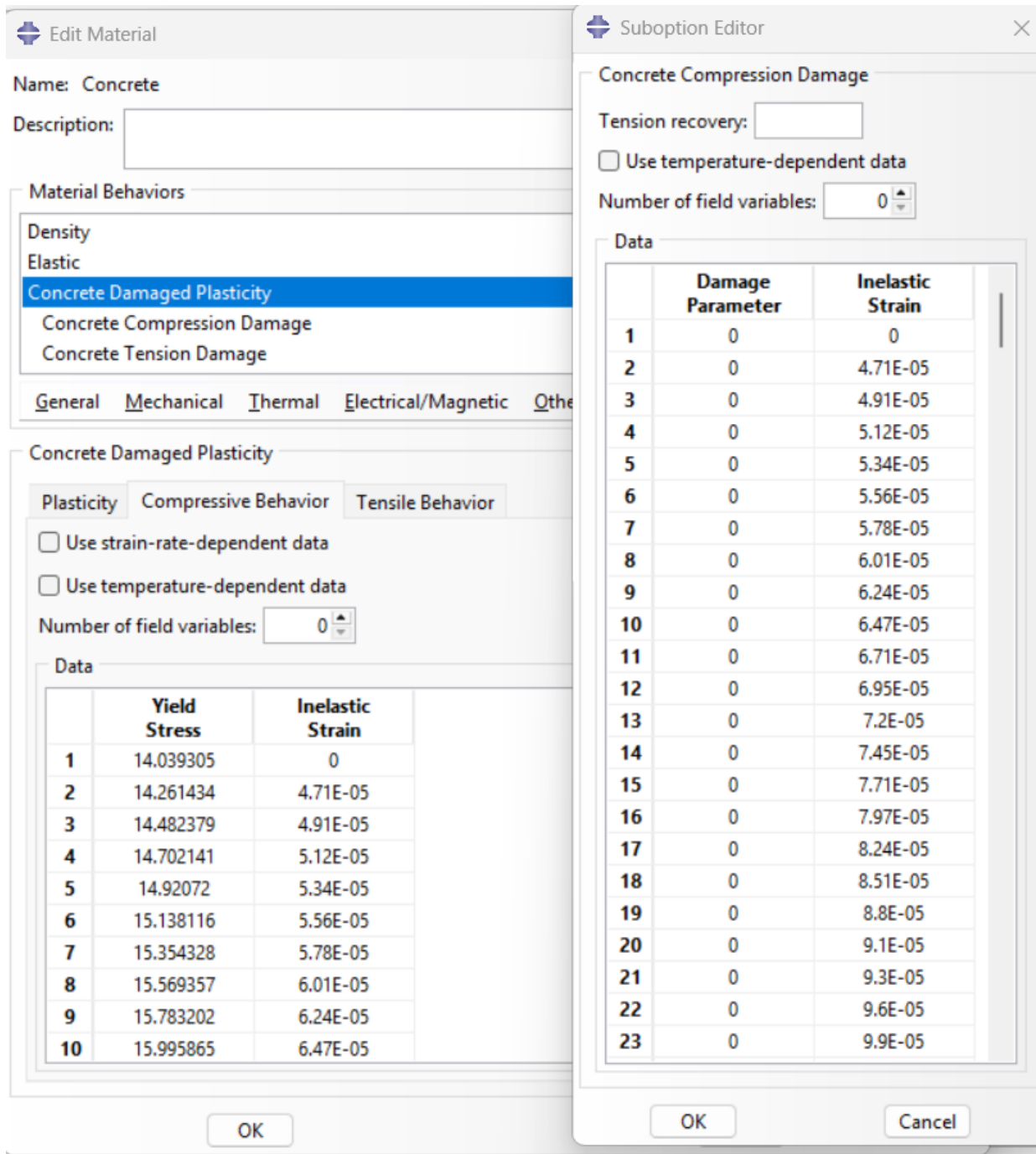
*Parámetro de daño a tensión*



*Nota:* Fuente: El autor.

Figura 80

Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto  $f'_c=35.00$  MPa (Comportamiento a compresión)



Nota: Fuente: El autor.

Figura 81

Módulo Property – Daño por plasticidad del concreto  $f'_c=35.00$  MPa (Comportamiento a tracción)

The image shows two overlapping software windows. The 'Edit Material' window on the left is titled 'Concrete' and shows 'Concrete Damaged Plasticity' selected under 'Material Behaviors'. The 'Suboption Editor' window on the right is titled 'Concrete Tension Damage' and shows the following settings:

- Type: Strain
- Compression recovery: 1
- Use temperature-dependent data:
- Number of field variables: 0

Both windows contain a data table with 22 rows. The 'Suboption Editor' table is as follows:

	Damage Parameter	Cracking Strain
1	0	0
2	0.036229265	1.7E-05
3	0.062462936	3E-05
4	0.086356106	4.3E-05
5	0.108245354	5.6E-05
6	0.128402558	6.9E-05
7	0.147050127	8.1E-05
8	0.164372063	9.3E-05
9	0.180522127	0.000105
10	0.195629977	0.000117
11	0.209805841	0.000129
12	0.223144128	0.000141
13	0.235726246	0.000152
14	0.247622828	0.000164
15	0.258895511	0.000175
16	0.269598365	0.000187
17	0.27977905	0.000198
18	0.289479771	0.000209
19	0.298738055	0.00022
20	0.307587407	0.000232
21	0.316057844	0.000243
22	0.324176355	0.000254

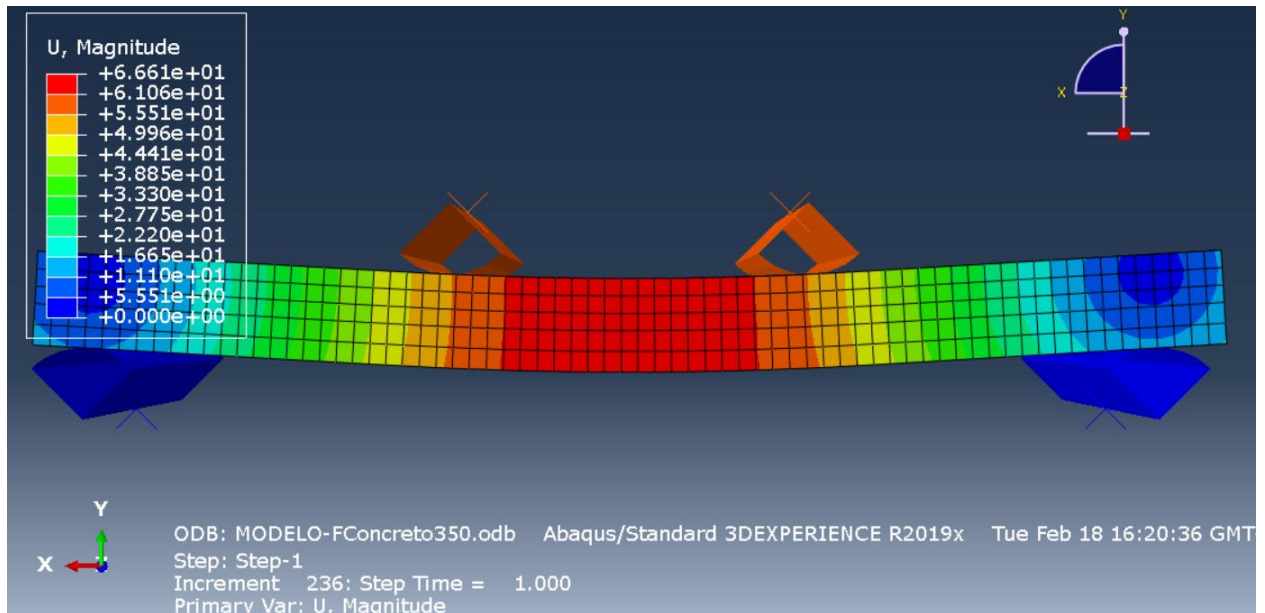
The 'Edit Material' window also contains a data table with 9 rows:

	Yield Stress	Cracking Strain
1	3.5	0
2	3.421046738	1.7E-05
3	3.32792644	3E-05
4	3.243114103	4.3E-05
5	3.16541498	5.6E-05
6	3.093864005	6.9E-05
7	3.0276717	8.1E-05
8	2.966184926	9.3E-05
9	2.908857885	0.000105

Nota: Fuente: El autor.

**Figura 82**

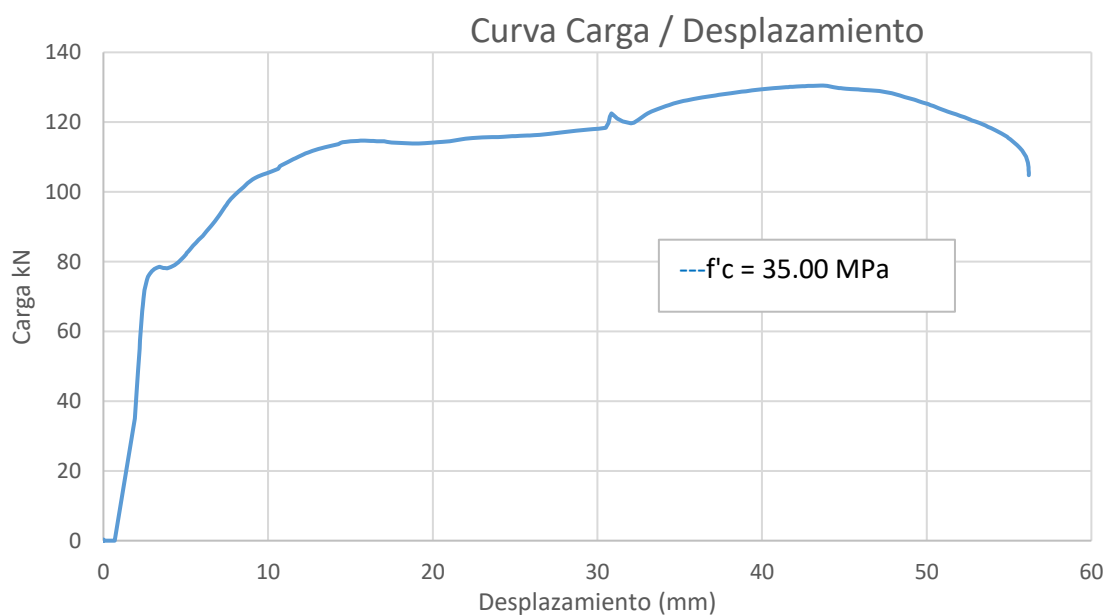
Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con  $f'c=35.00$  MPa.



Nota: Fuente: El autor.

**Figura 83**

Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento



Nota: Fuente: El autor.

### 5.1.3.2. Variaciones en el refuerzo de acero

Obtenido el modelo calibrado, procedemos a realizar variaciones en el refuerzo de acero, se tomará los siguientes diámetros, los cuales serán sometido a la simulación:  $\varnothing = 8$  mm,  $\varnothing = 9.525$  mm,  $\varnothing = 12$  mm.

Para la representación del refuerzo de acero se emplea el modelo bilineal propuesto por Park y Paulay (1980), el cual considera una densidad de  $7.85 \times 10^{-5}$  N/mm<sup>3</sup>, un módulo de elasticidad de 210000 MPa y una resistencia a la fluencia equivalente a 500 MPa.

**Tabla 9**

*Variaciones en el refuerzo de acero del modelo calibrado*

Muestra	f'c (Modelo experimental)	Dimensiones (Modelo experimental)	Carga	Diámetro del refuerzo de acero (Modelo Experimental)	Variación de los diámetros del refuerzo de acero
<b>Losa calibrada</b>	f'c = 25.00 MPa	1500 mm x 3300 mm	Tercios	$\varnothing = 6$ mm	$\varnothing = 8$ mm $\varnothing = 9.525$ mm $\varnothing = 12$ mm

*Nota:* Fuente: El autor.

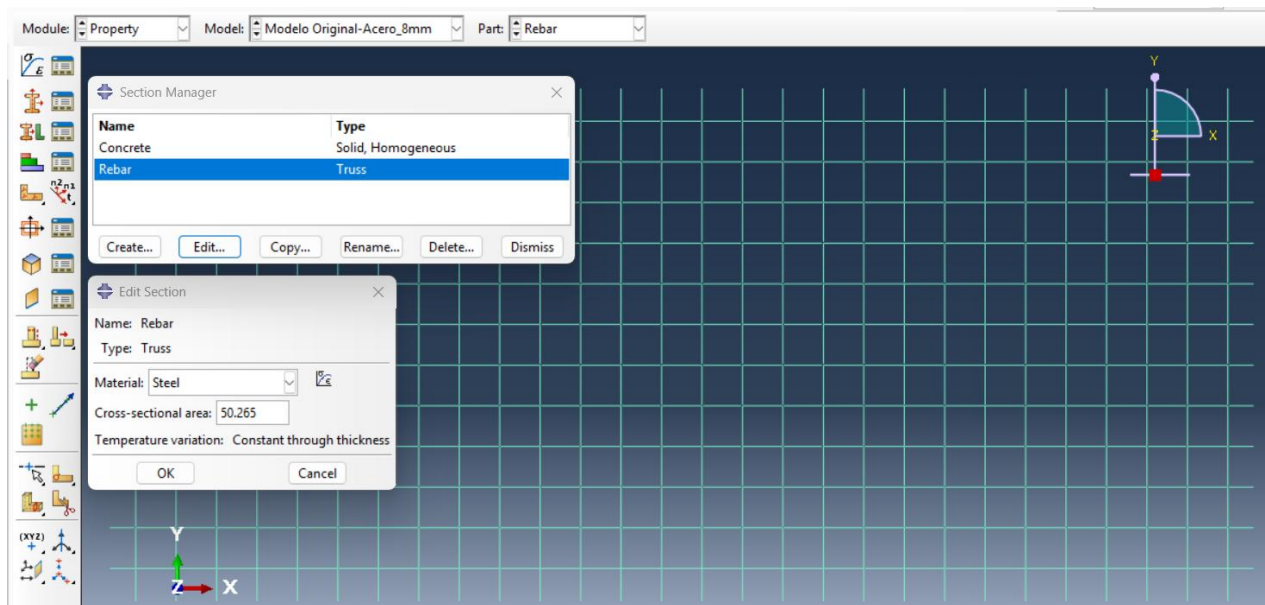
#### **Refuerzo de acero $\varnothing = 8$ mm**

El diámetro del acero será modificado en el Módulo Property, el Software Abaqus trabaja con el área de la sección en milímetros por lo tanto se hará uso de la siguiente fórmula y se detalla en la Figura 83, 84 y 85:

$$A = \pi r^2$$

**Figura 84**

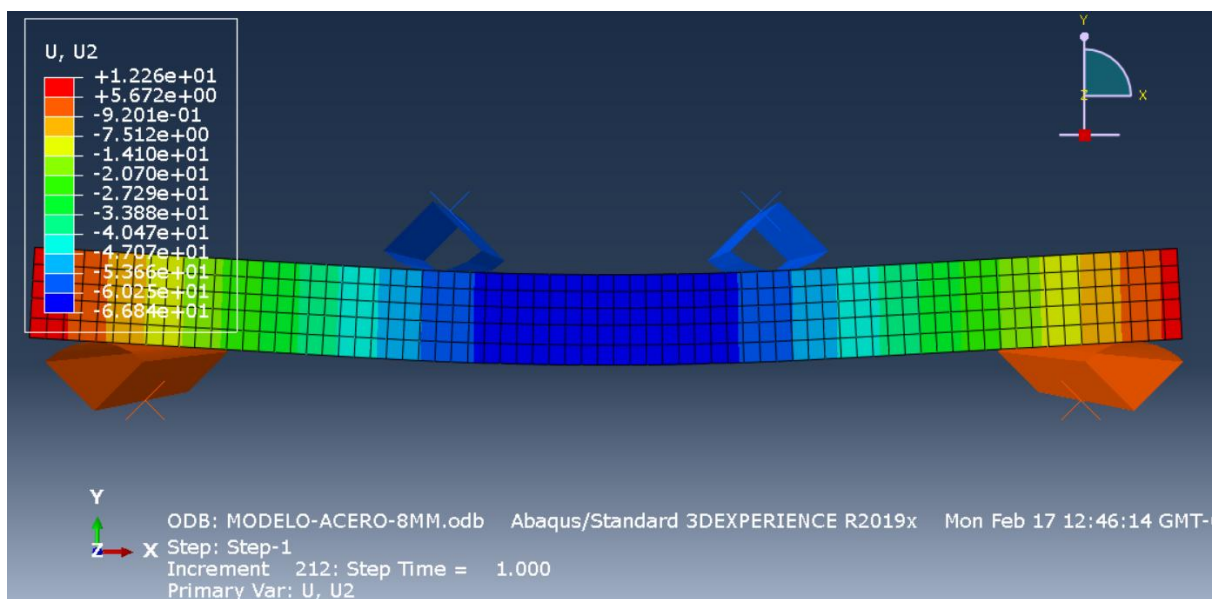
*Módulo Property – Definición del área de la sección correspondiente a  $\varnothing = 8 \text{ mm}$*



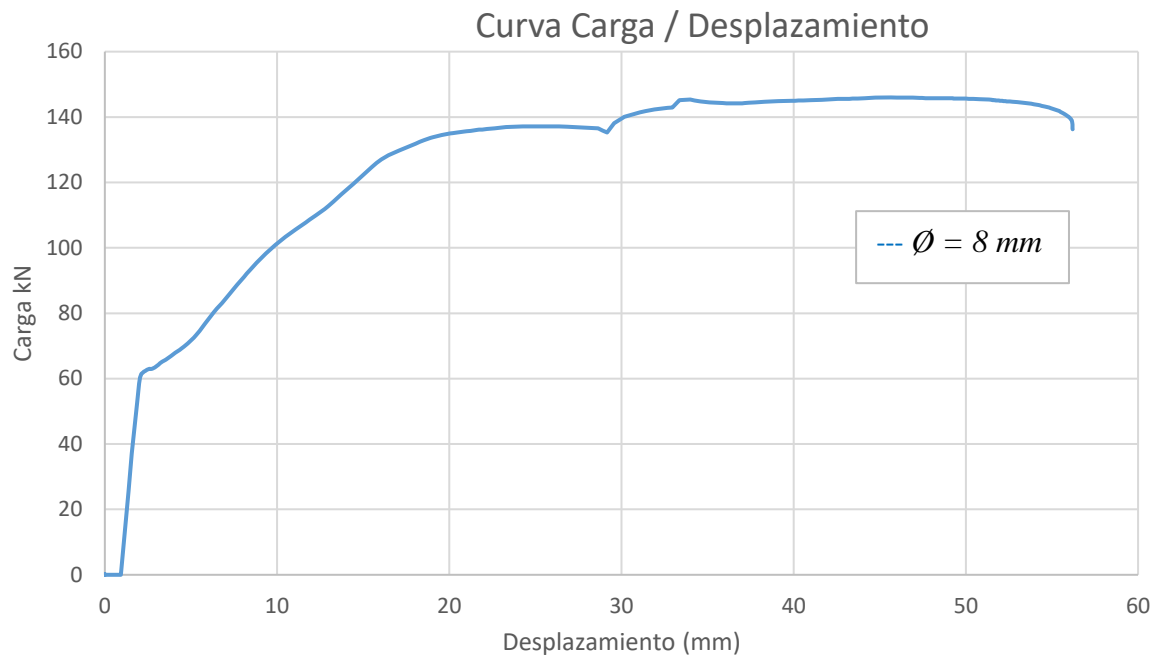
*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 85**

*Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con refuerzo de acero  $\varnothing = 8 \text{ mm}$*



*Nota:* Fuente: El autor.

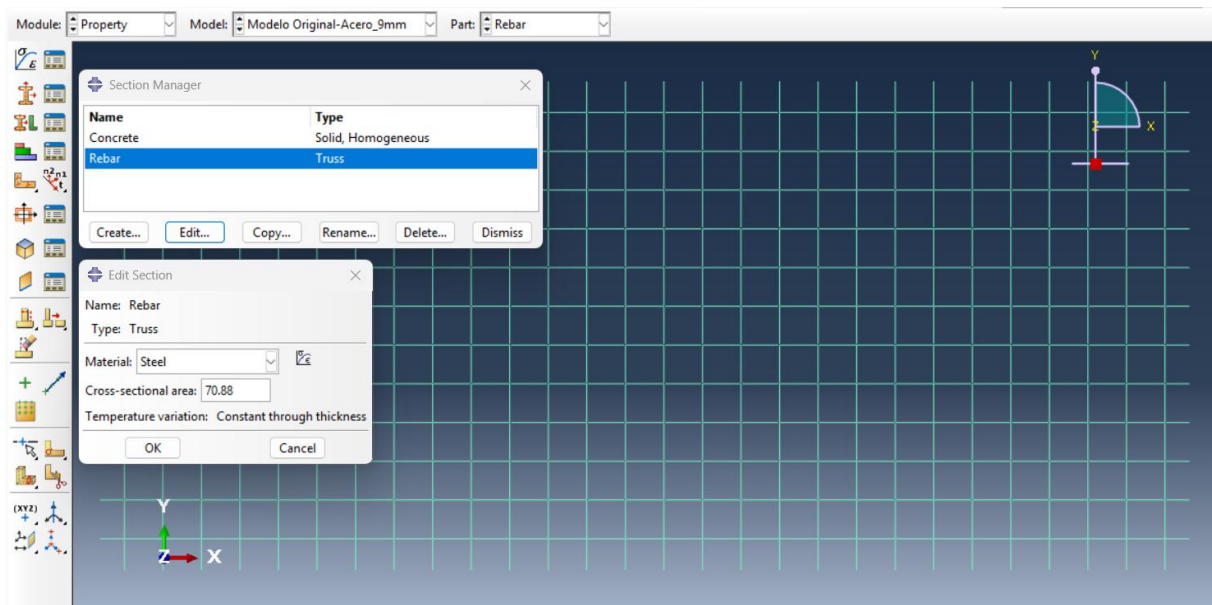
**Figura 86***Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento**Nota:* Fuente: El autor.**Refuerzo de acero Ø = 9.525 mm (Ø = 3/8 in)**

El diámetro del acero será modificado en el Módulo Property, el Software Abaqus trabaja con el área de la sección en milímetros por lo tanto se hará uso de la siguiente fórmula y se detalla en las Figuras 86, 87 y 88:

$$A = \pi r^2$$

**Figura 87**

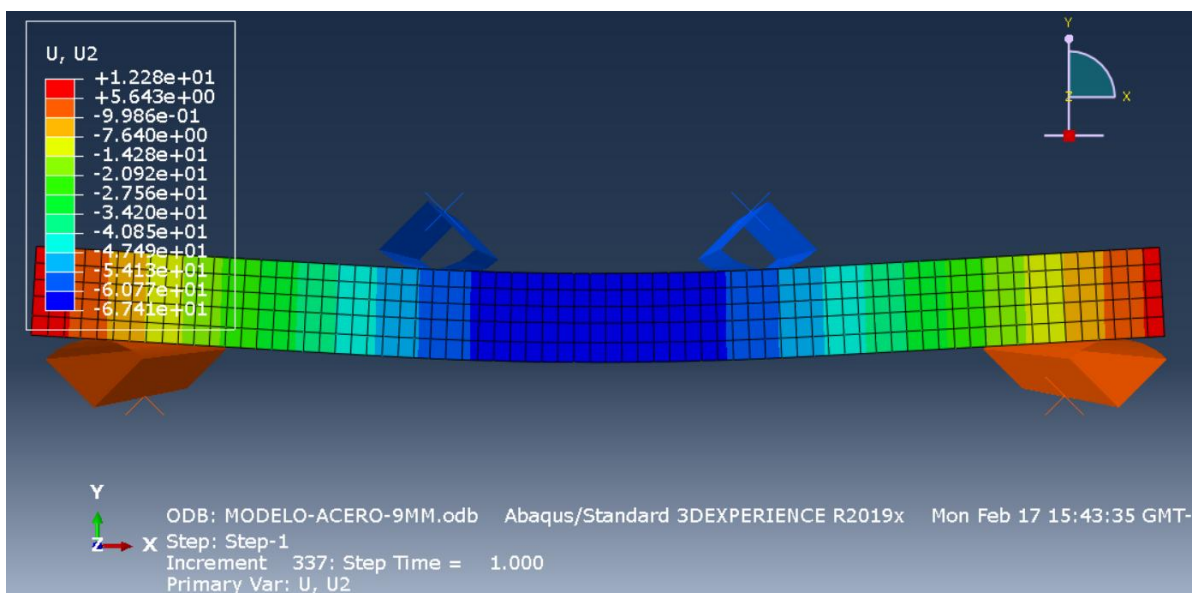
*Módulo Property – Definición del área de la sección correspondiente a  $\varnothing = 9.525 \text{ mm}$*



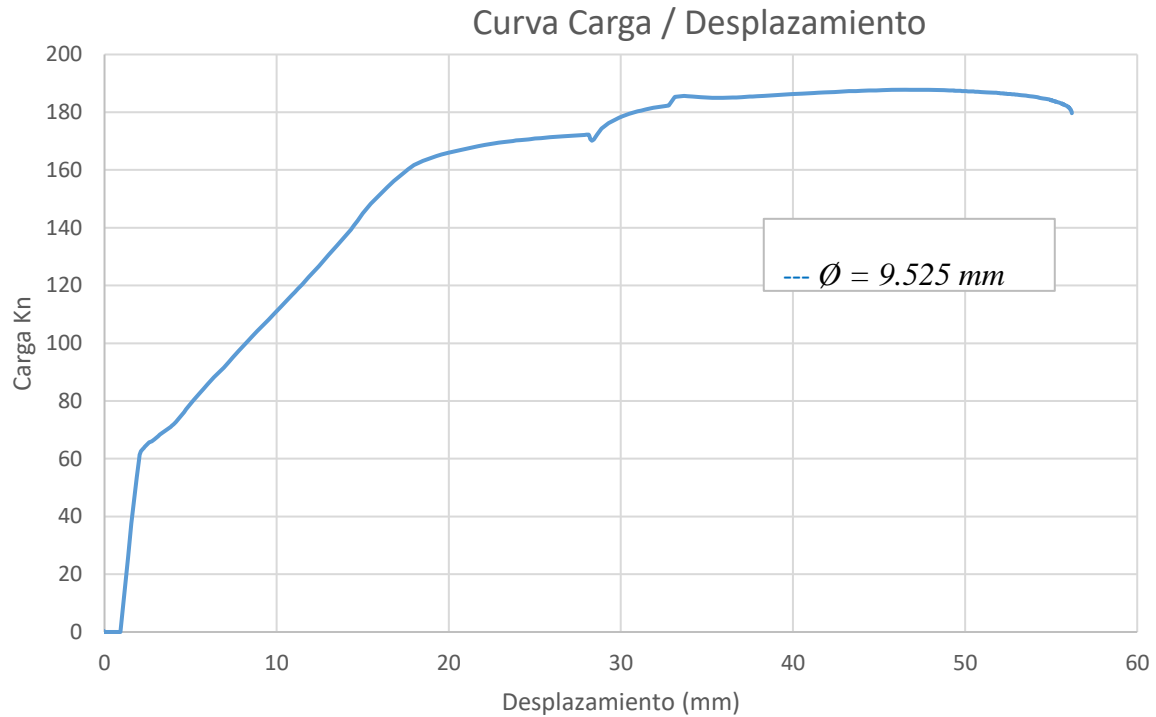
*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 88**

*Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con refuerzo de acero  $\varnothing = 9.525 \text{ mm}$*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 89***Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento*

*Nota:* Fuente: El autor.

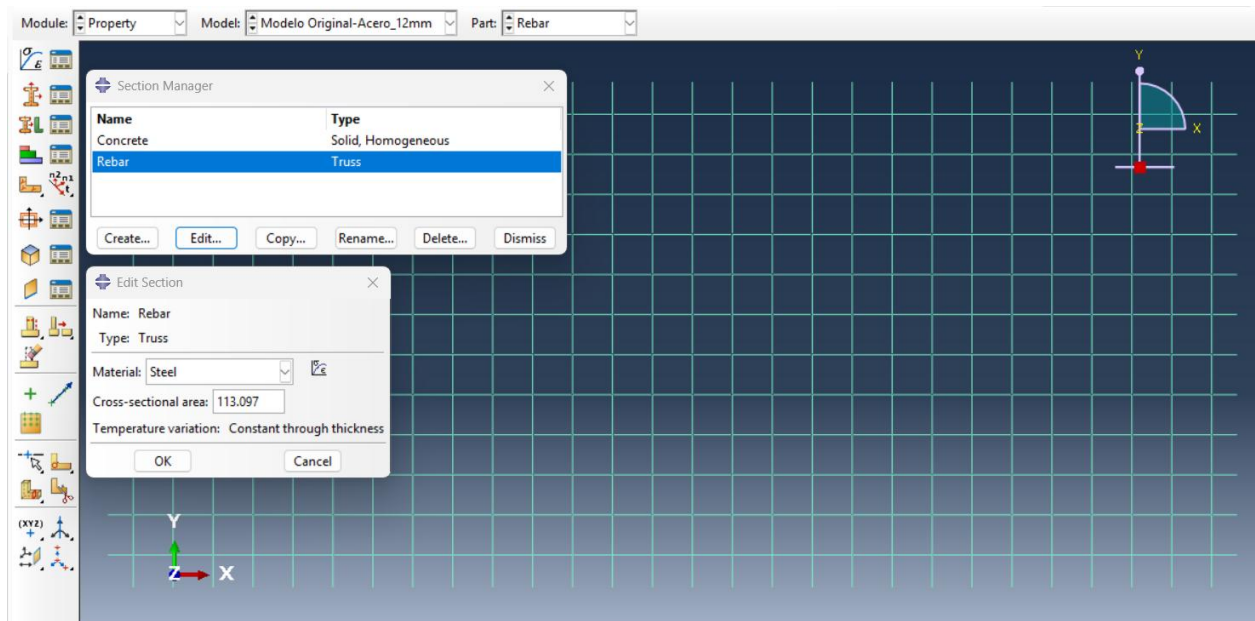
### **Refuerzo de acero Ø = 12 mm**

El diámetro del acero será modificado en el Módulo Property, el Software Abaqus trabaja con el área de la sección en milímetros por lo tanto se hará uso de la siguiente fórmula y se detalla en las Figuras 89, 90 y 91:

$$A = \pi r^2$$

**Figura 90**

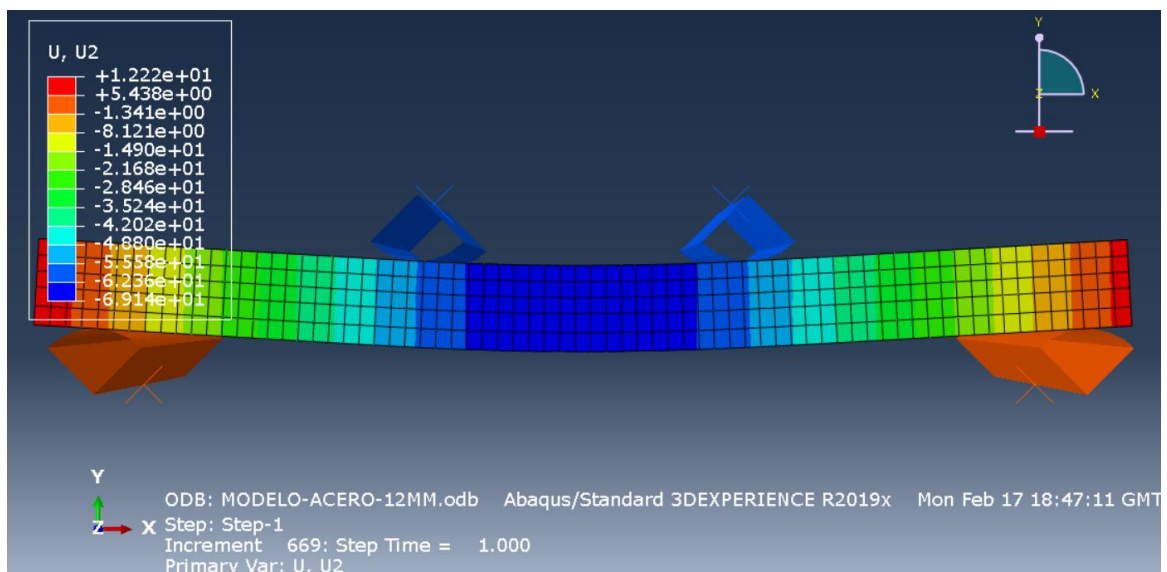
*Módulo Property – Definición del área de la sección correspondiente a  $\varnothing = 12 \text{ mm}$*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 91**

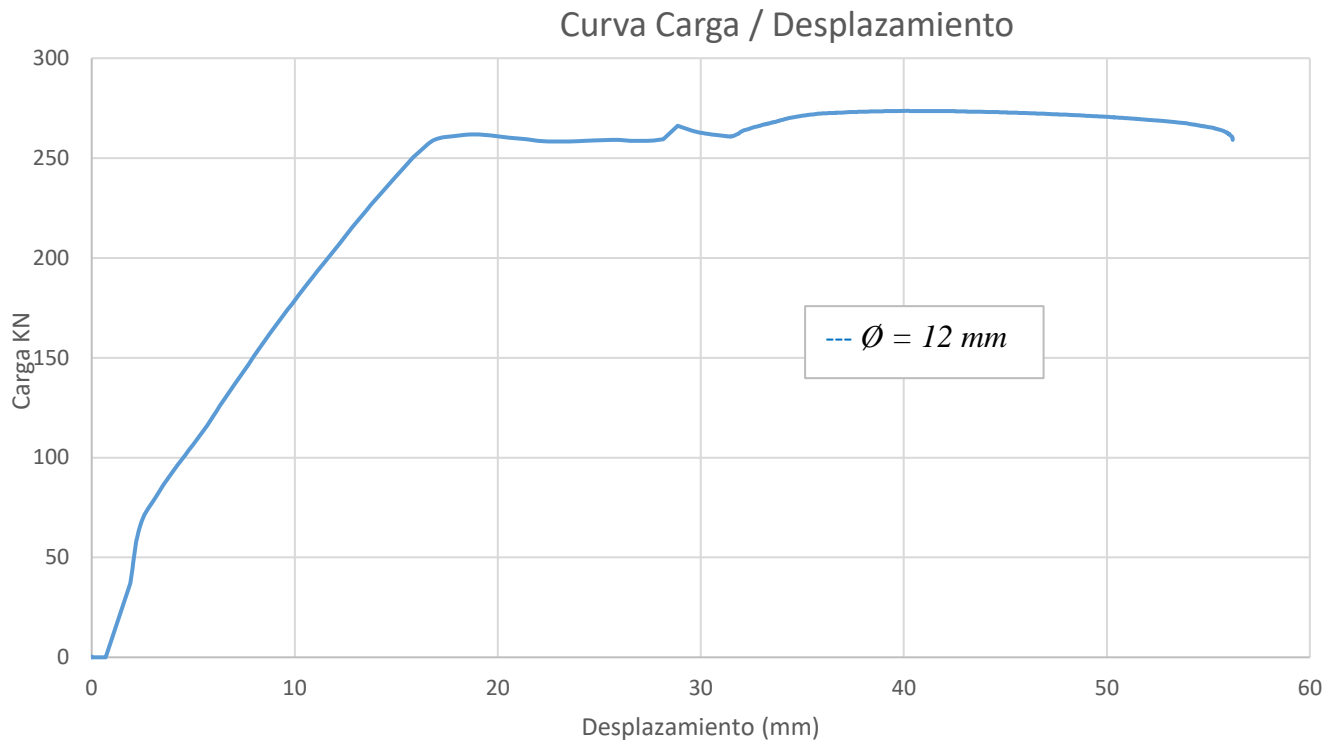
*Resultados obtenidos de la Convergencia del Modelo de losa Bubbledeck con refuerzo de acero  $\varnothing = 12 \text{ mm}$*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 92**

*Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento*

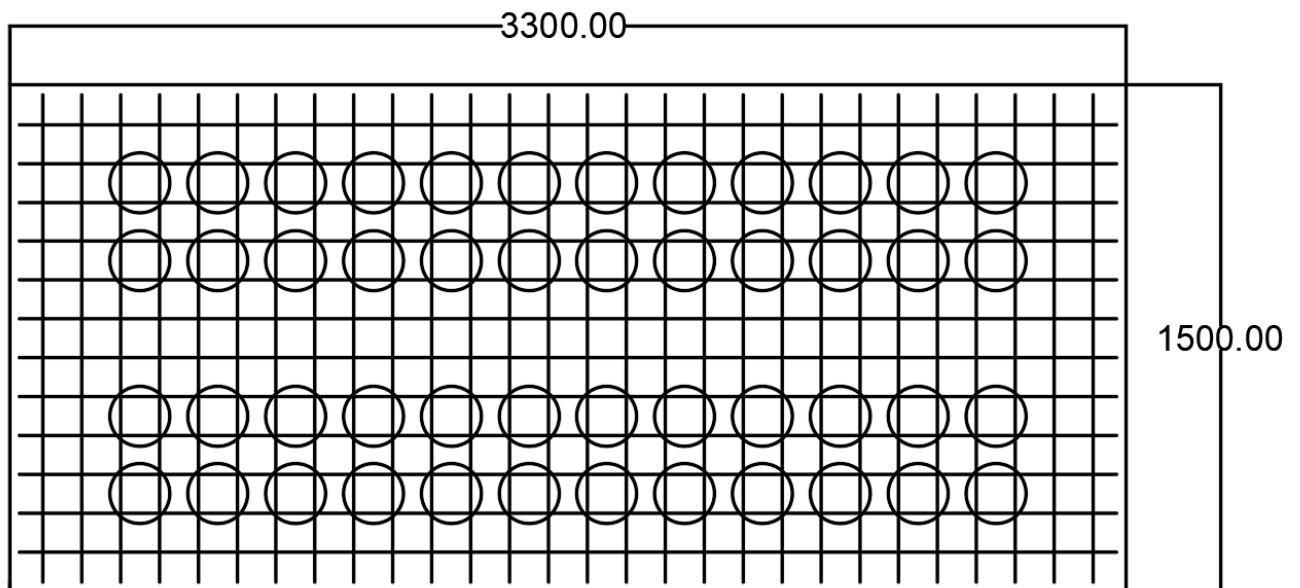


*Nota:* Fuente: El autor.

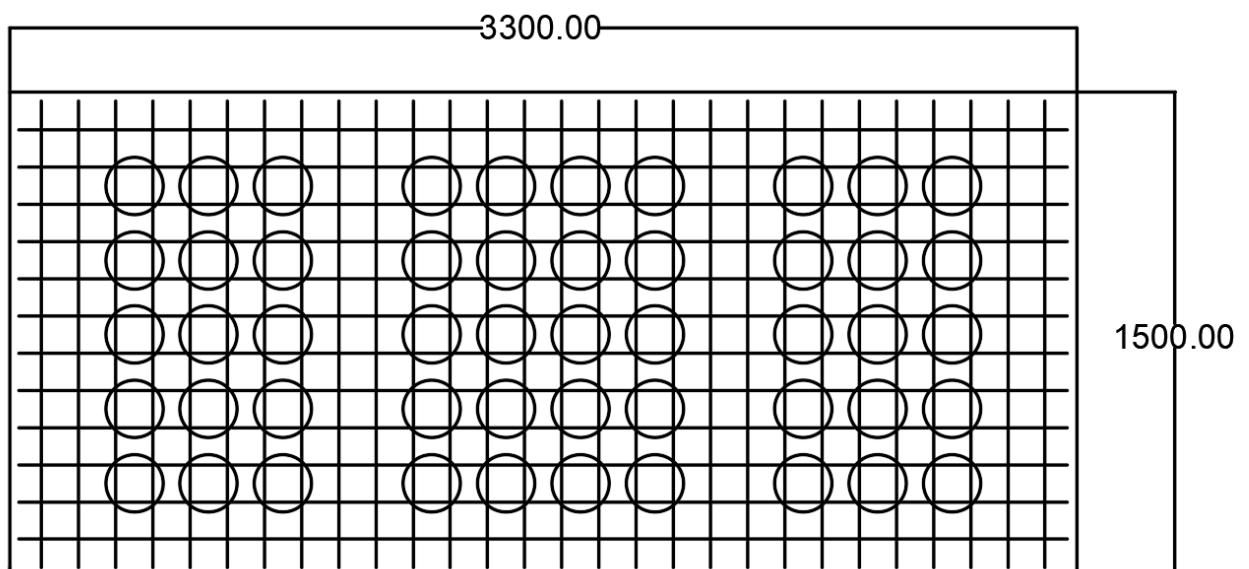
### 5.1.3.3. Variaciones en la configuración de esferas

Obtenido el modelo calibrado, procedemos a realizar variaciones en la configuración de esferas, realizando cambios en la geometría embebida de las esferas (vacíos esféricos) los cuales serán sometido a la simulación.

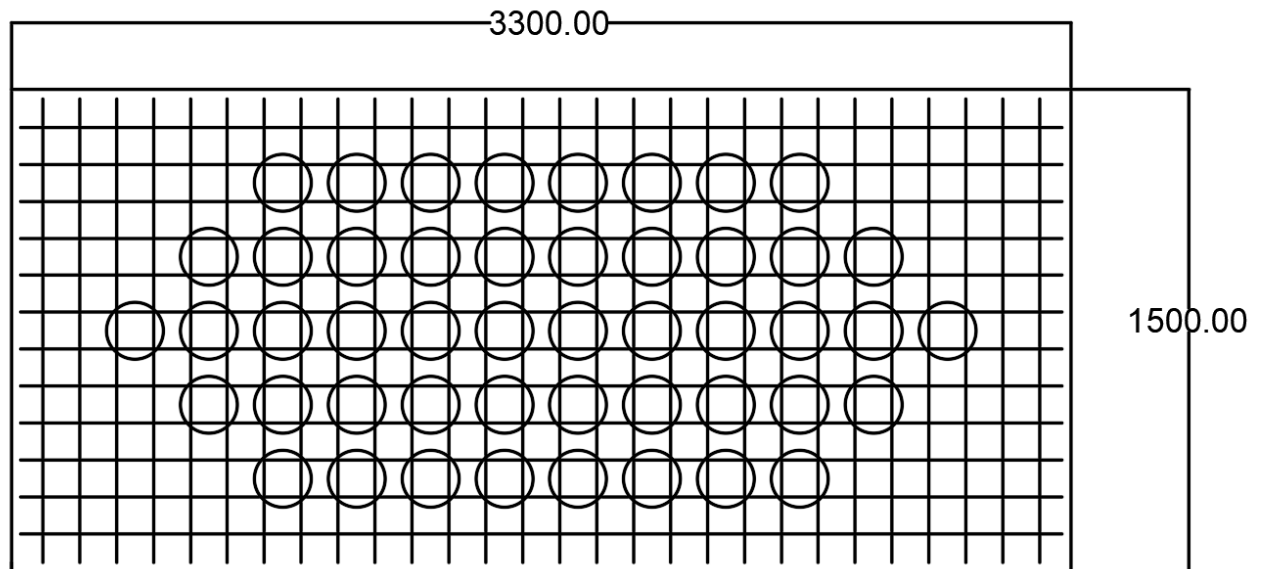
Para el modelado del refuerzo de acero se detalla el modelo bilineal de Park y Paulay (1980) con una densidad de  $7.85 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$  y con un Módulo de elasticidad de 210000 MPa, su resistencia a la fluencia es de 500 MPa. Se detalla en las Figuras 92, 93 y 94:

**Figura 93***Configuración 01*

*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 94***Configuración 02*

*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 95***Configuración 03*

*Nota:* Fuente: El autor.

**Tabla 10**

*Variaciones de la configuración de esferas del modelo calibrado*

<b>Muestra</b>	<b>f<sup>c</sup> (Modelo experimental)</b>	<b>Dimensiones (Modelo experimental)</b>	<b>Carga</b>	<b>Diámetro del refuerzo de acero (Modelo Experimental)</b>	<b>Variación de la configuración de esferas</b>
<b>Losa calibrada</b>	f <sup>c</sup> = 25.00 MPa	1500 mm x 3300 mm	Tercios	Ø = 6mm	Configuración 01
					Configuración 02
					Configuración 03

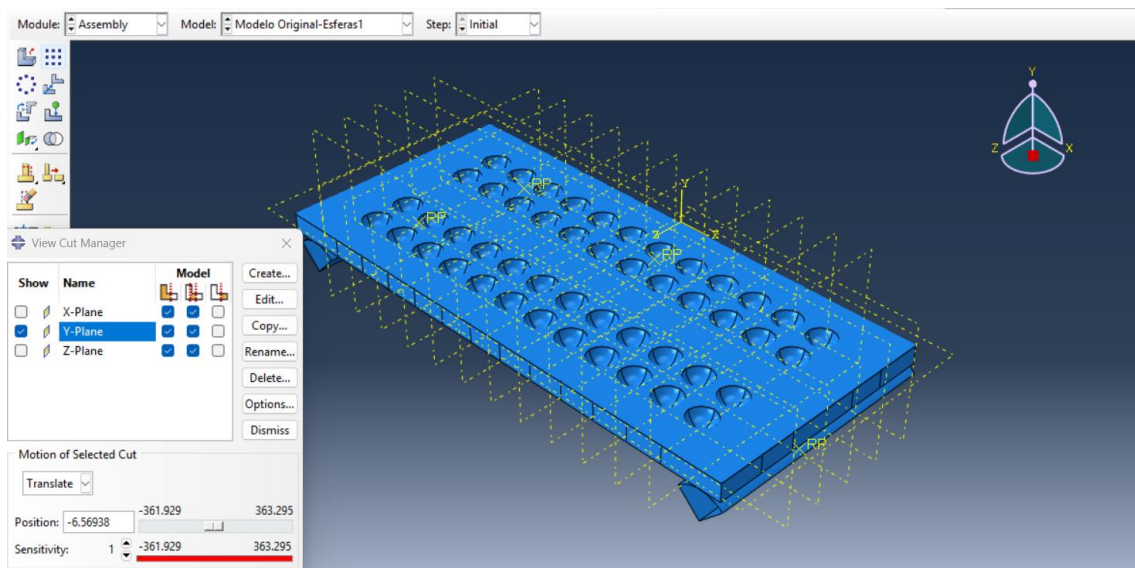
*Nota:* Fuente: El autor.

## Configuración 01

En el módulo Assembly se procede a cambiar la configuración de esferas. Se detalla en las Figuras 95, 96, 97 y 98:

### Figura 96

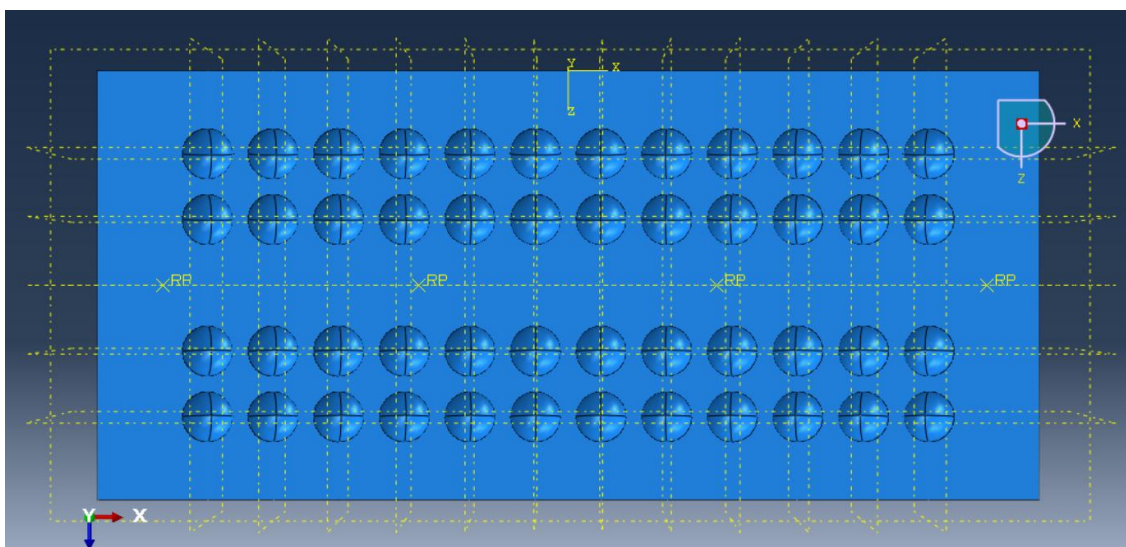
*Módulo Assembly - Configuración 01*



*Nota:* Fuente: El autor.

### Figura 97

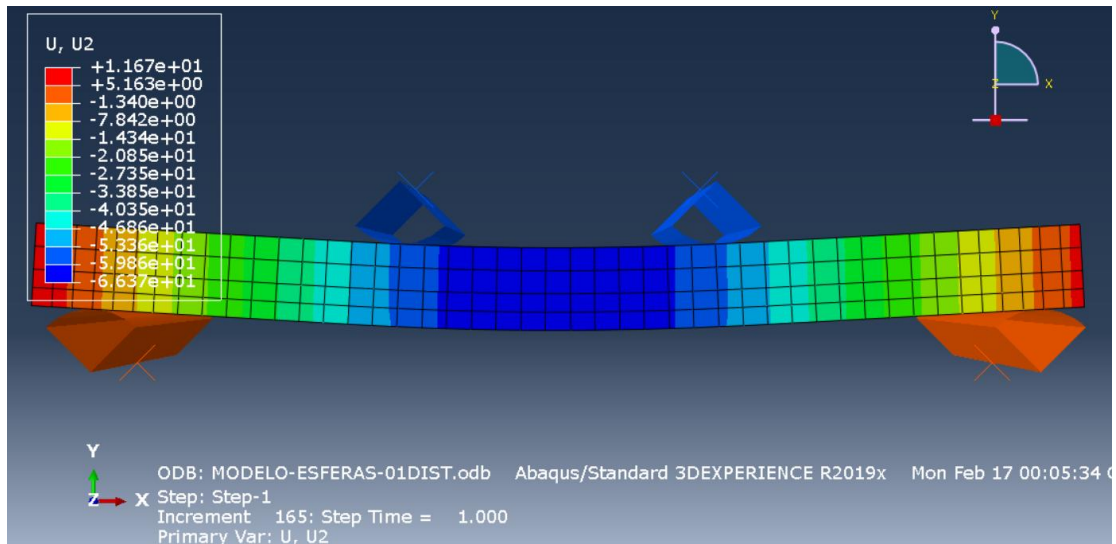
*Módulo Assembly - Configuración 01 vista en planta.*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 98**

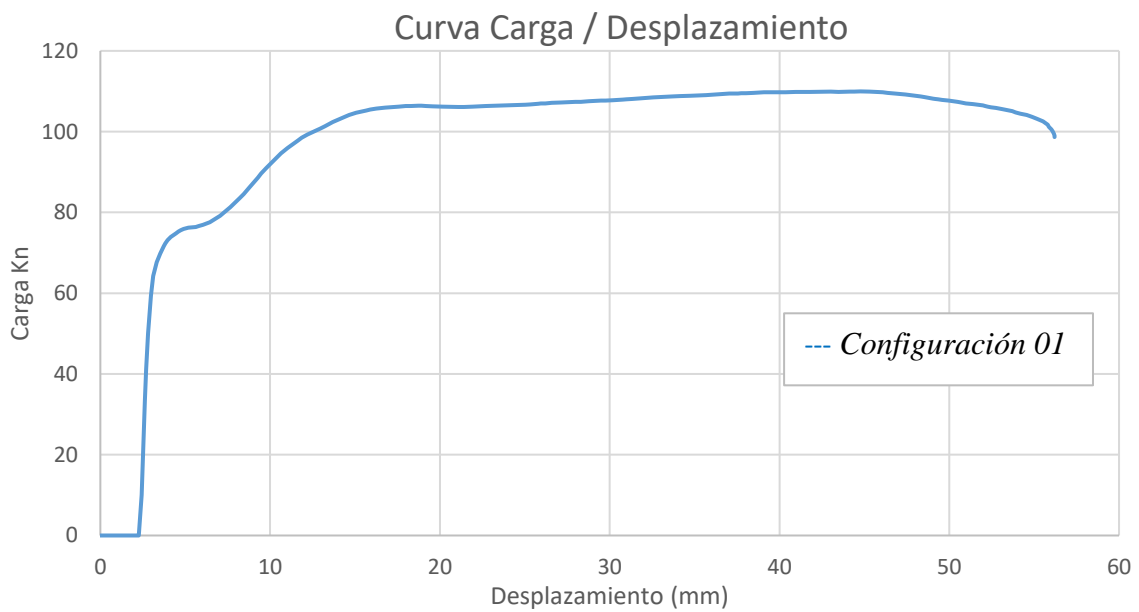
*Módulo Visualization - Resultados obtenidos de la Convergencia del modelo con la Configuración 01*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 99**

*Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento de la Configuración 01*



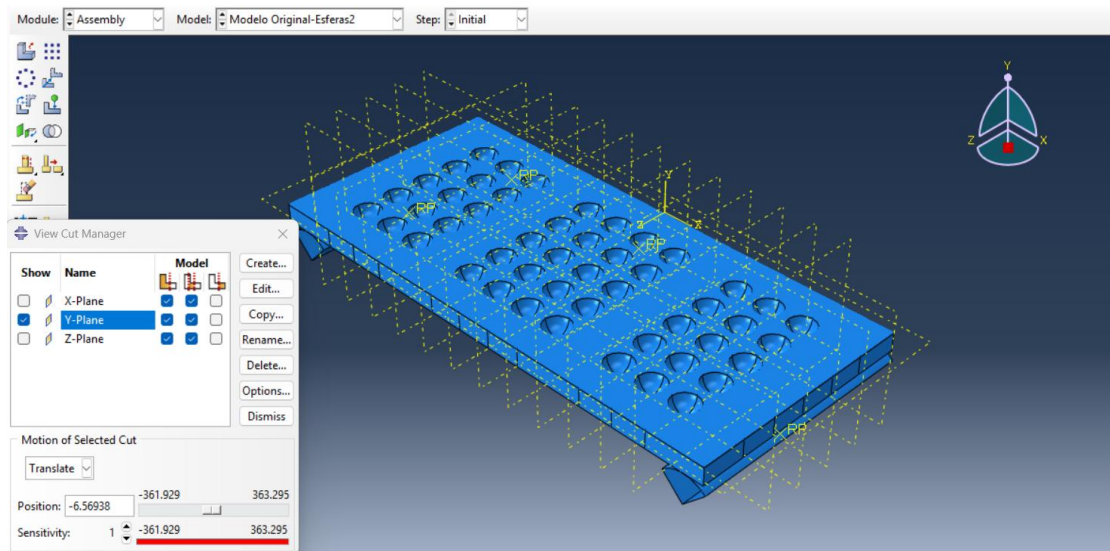
*Nota:* Fuente: El autor.

## Configuración 02

En el módulo Assembly se procede a cambiar la configuración de esferas. Se detalla en las Figuras 99, 100, 101 y 102:

### Figura 100

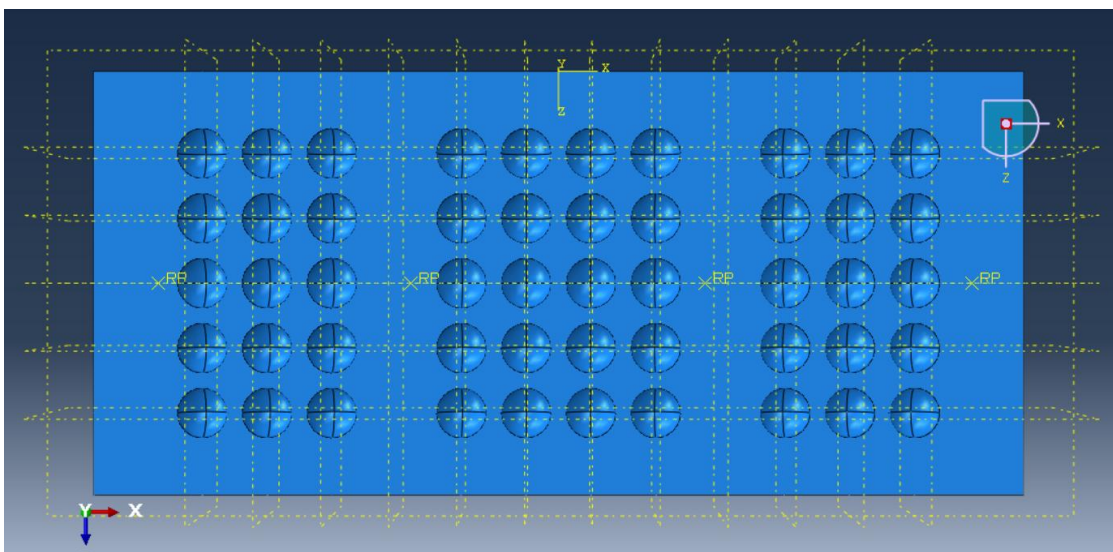
*Módulo Assembly - Configuración 02*



*Nota:* Fuente: El autor.

### Figura 101

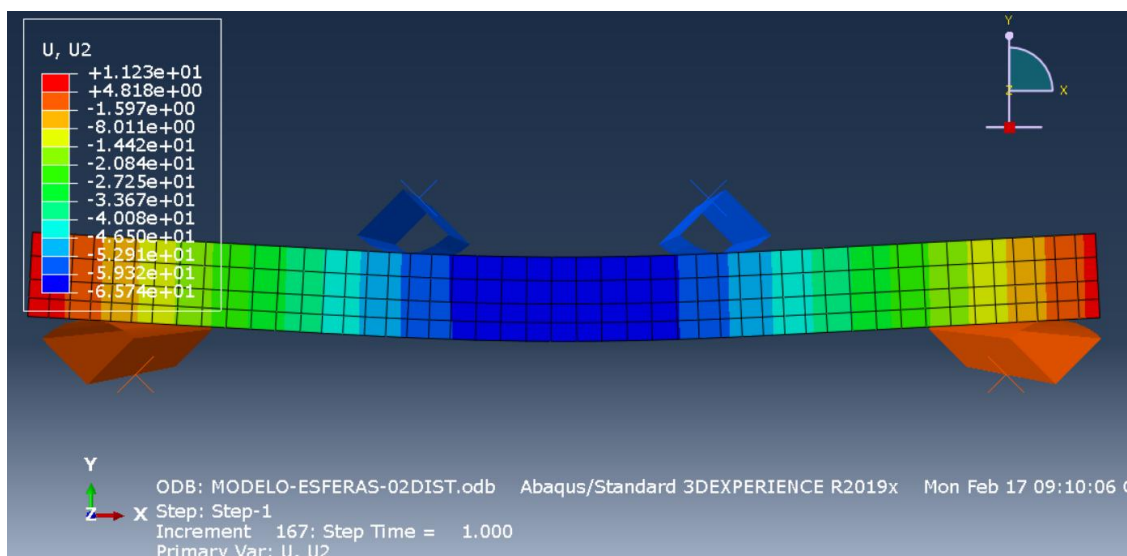
*Módulo Assembly - Configuración 02 vista en planta.*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 102**

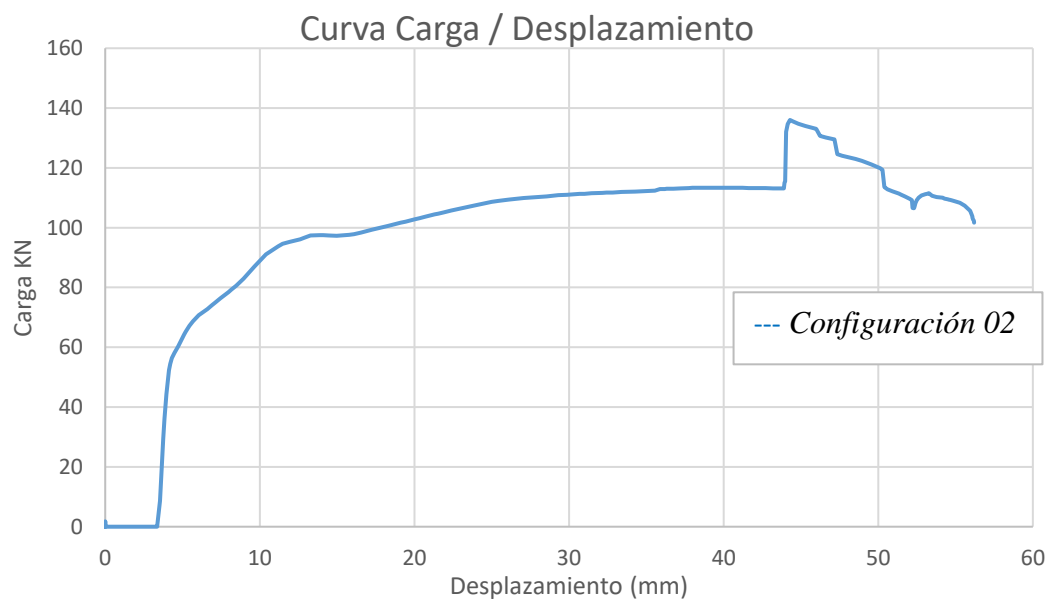
*Módulo Visualization - Resultados obtenidos de la Convergencia del modelo con la Configuración 02*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 103**

*Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento de la Configuración 02*



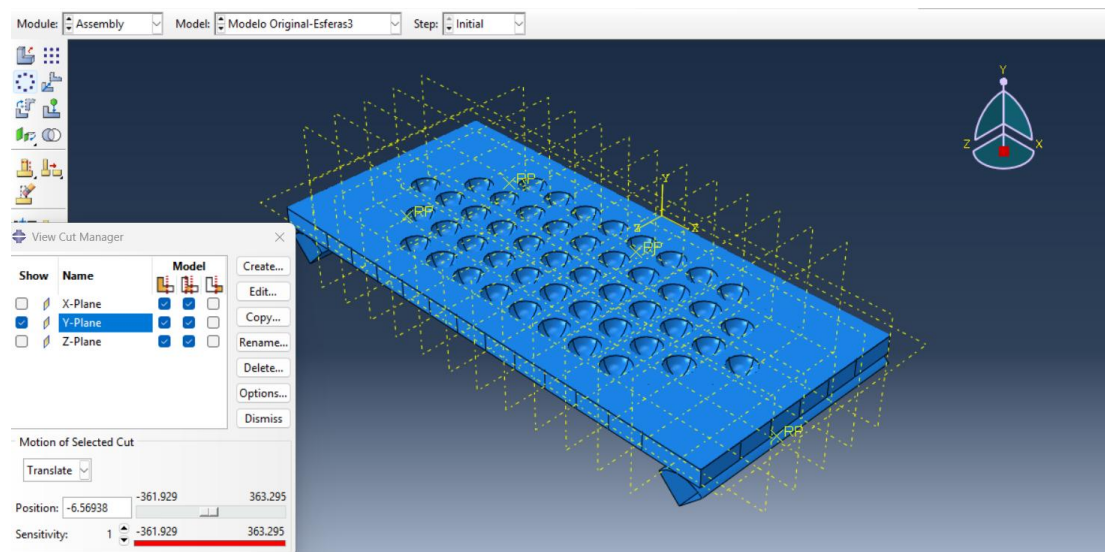
*Nota:* Fuente: El autor.

### Configuración 03

En el módulo Assembly se procede a cambiar la configuración de esferas. Se detalla en las Figuras 103, 104, 105 y 106:

#### Figura 104

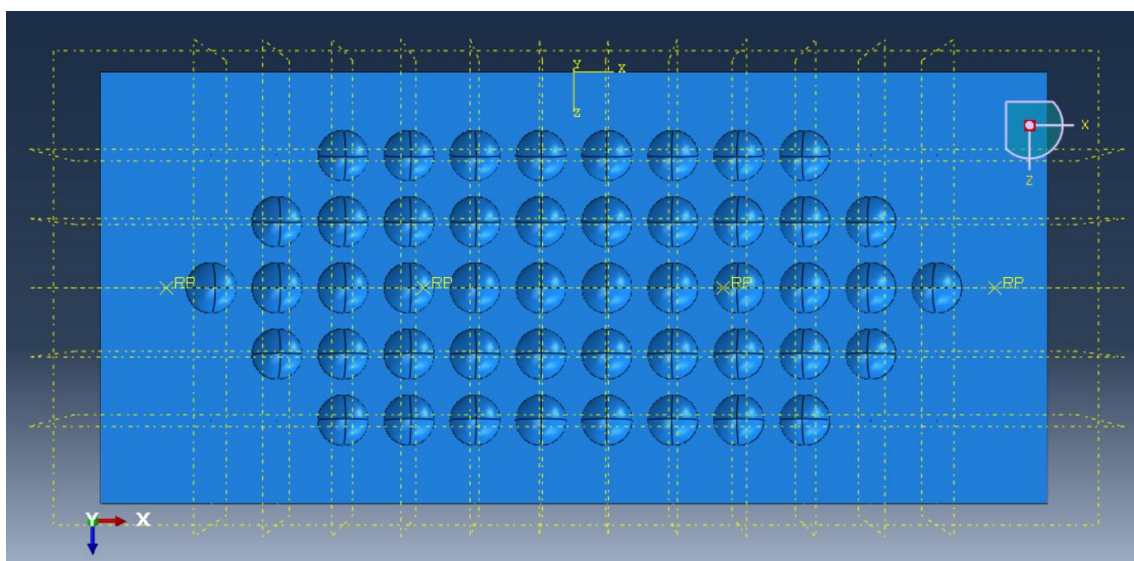
*Módulo Assembly - Configuración 03*



*Nota:* Fuente: El autor.

#### Figura 105

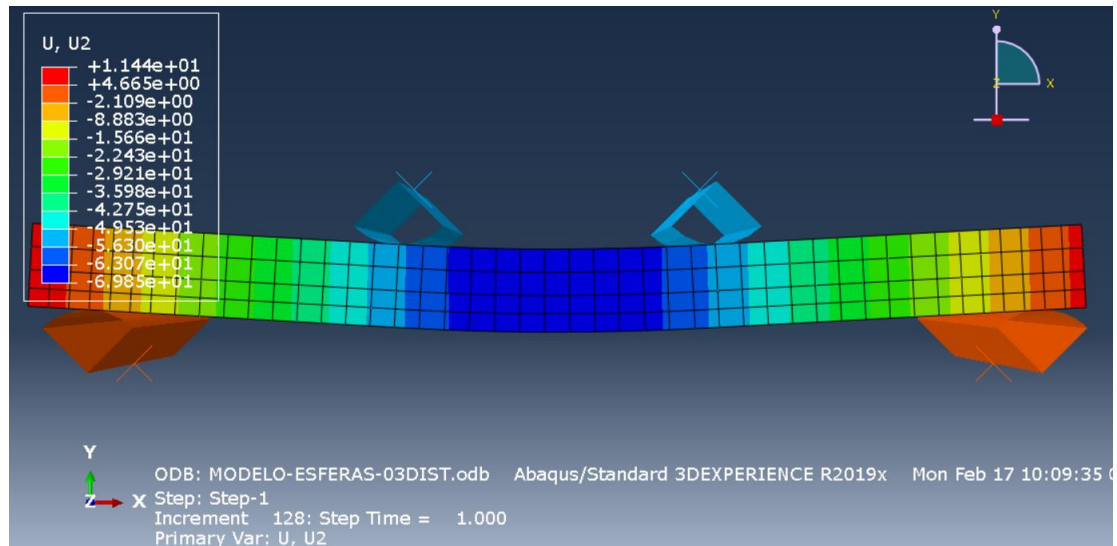
*Módulo Assembly - Configuración 03 vista en planta.*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 106**

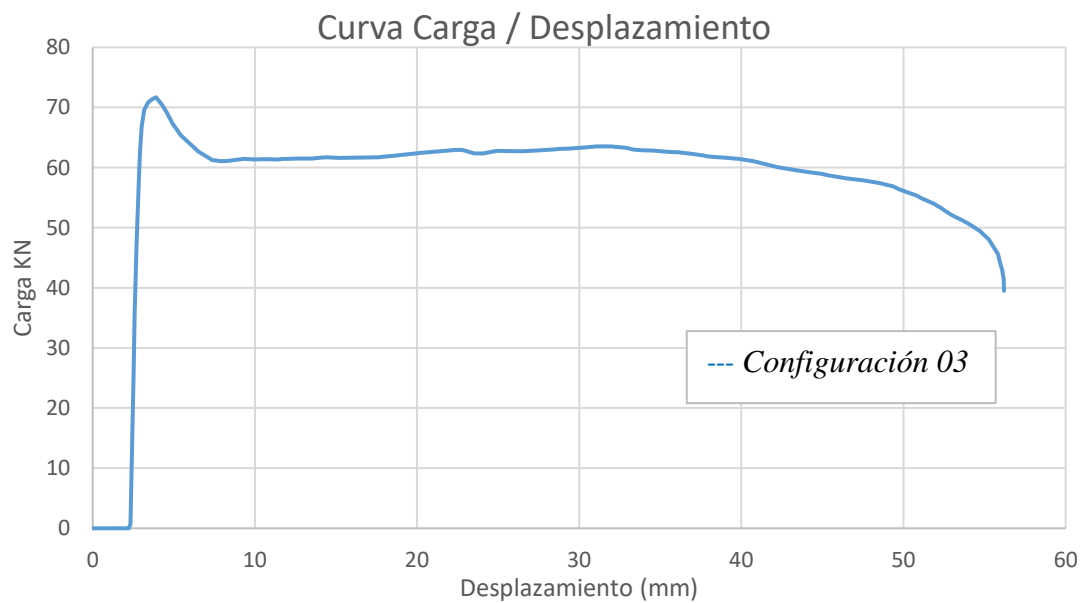
*Módulo Visualization - Resultados obtenidos de la Convergencia del modelo con la Configuración 03*



*Nota:* Fuente: El autor.

**Figura 107**

*Módulo Visualization Curva Carga – Desplazamiento de la Configuración 03*



*Nota:* Fuente: El autor.

**5.1.4. Influencia en la respuesta estructural de las variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero en losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos.**

**5.1.4.1. Curva Carga / Desplazamiento para variaciones en la resistencia a compresión**

Obtención de las curvas de Carga / Desplazamiento para las variaciones de acuerdo con el modelo calibrado. La Tabla 9 resume las variaciones, se realizó las simulaciones numéricas para las  $f^c$  planteadas. Se detalla en la Figura 107:

**Tabla 11**

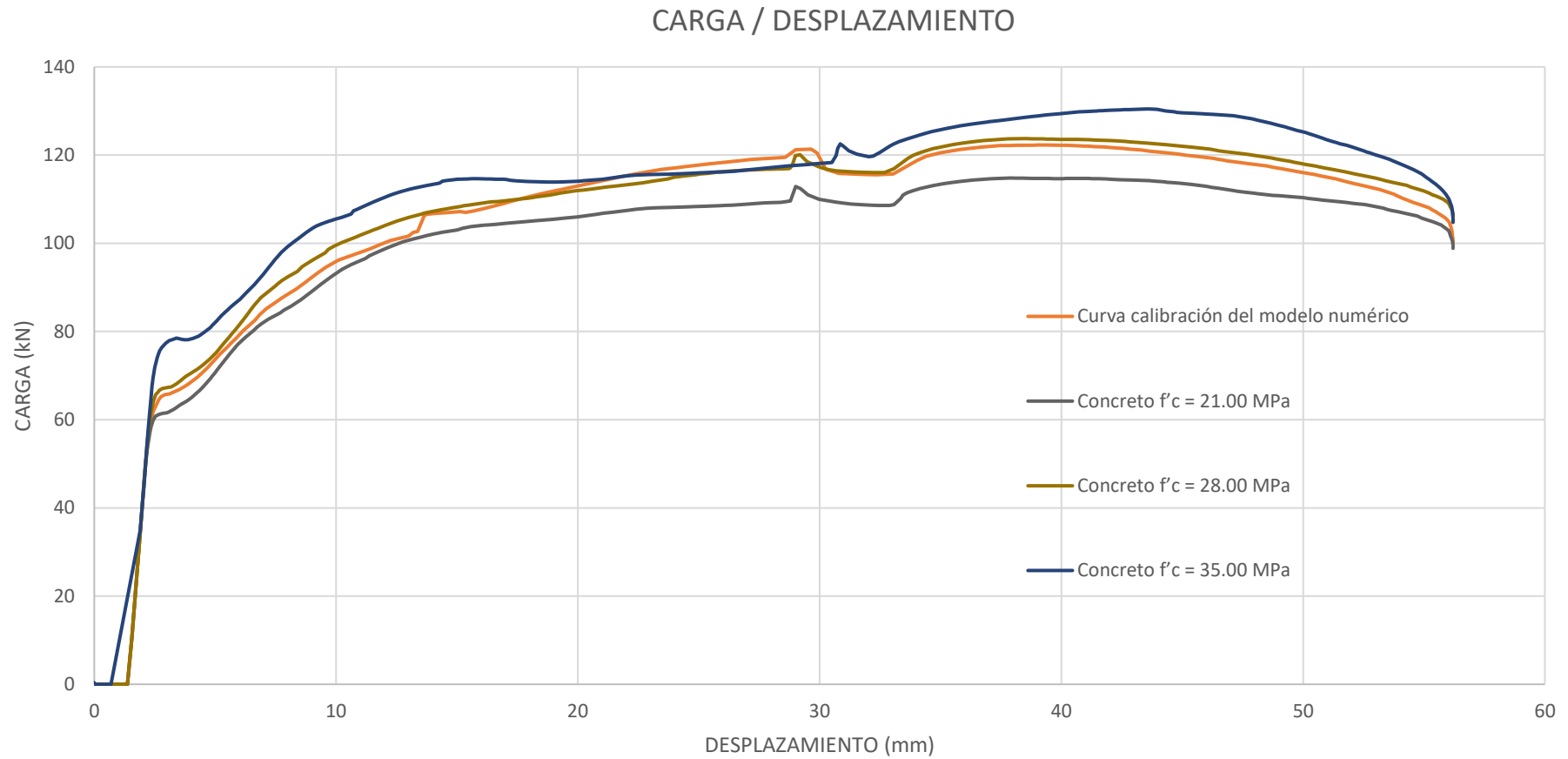
*Definición de curvas Carga / Desplazamiento en las variaciones de resistencia a compresión.*

<b>Muestra</b>	<b><math>f^c</math>-Modelo experimental</b>	<b>Dimensiones Modelo experimental</b>	<b>Carga</b>	<b>Diámetro del refuerzo de acero</b>	<b>Variación de resistencias a la compresión</b>	<b>Curva carga / Desplazamiento</b>
<b>Losa calibrada</b>	$f^c = 25.00$ MPa	1500 mm x 3300 mm	Tercios	$\emptyset = 6\text{mm}$	$f^c = 21.00$ MPa	Figura 57
					$f^c = 28.00$ MPa	Figura 67
					$f^c = 35.00$ MPa	Figura 77

*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 108**

*Curva de Variaciones en la resistencia a compresión*



*Nota:* Fuente: El autor.

### 5.1.4.2. Curva Carga / Desplazamiento para variaciones en el refuerzo de acero

Obtención de las curvas de Carga / Desplazamiento para las variaciones de acuerdo con el modelo calibrado. La Tabla 10 resume las variaciones, se realizó las simulaciones numéricas para los diámetros planteados. Se detalla en la Figura 108:

**Tabla 12**

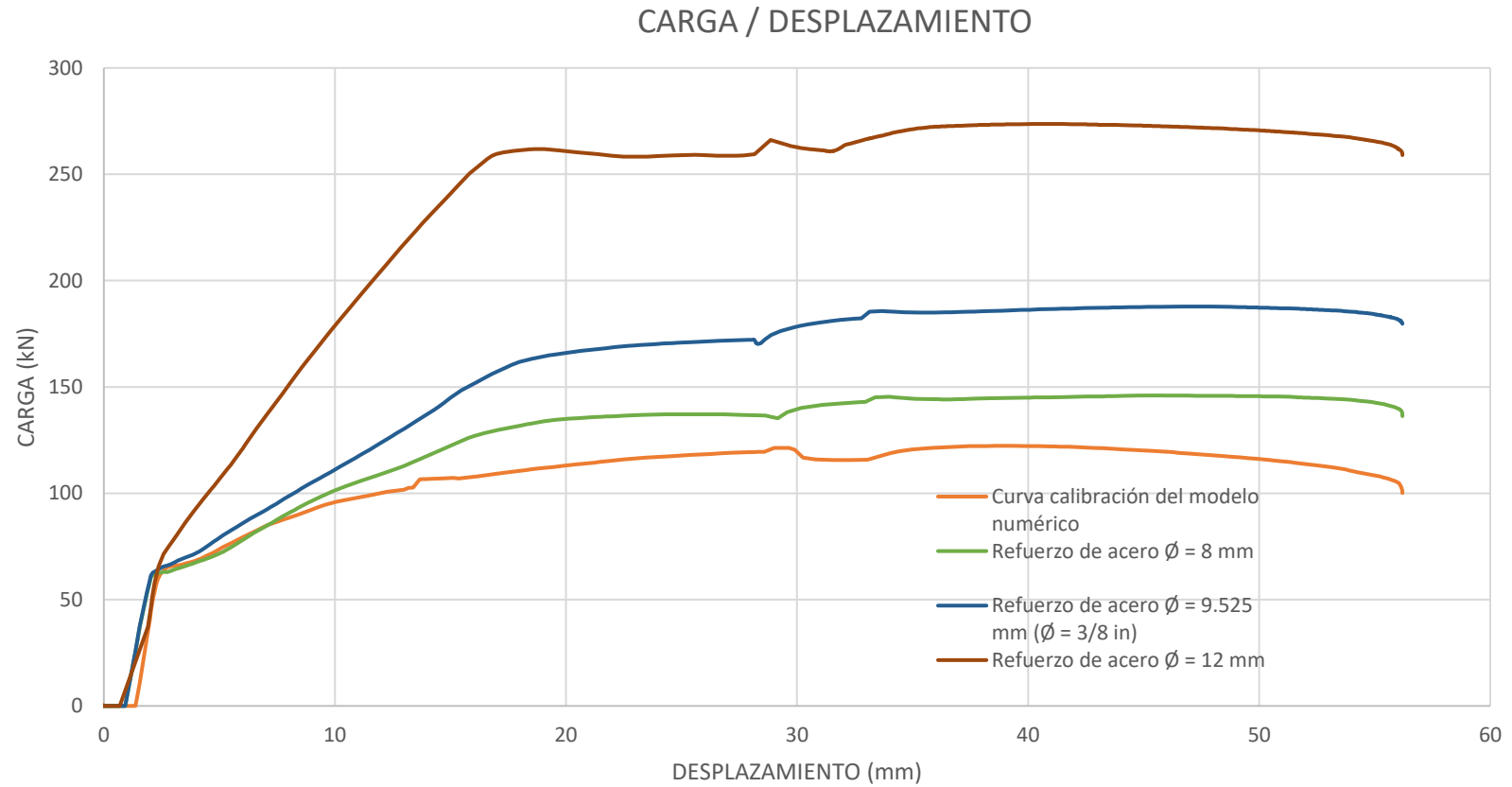
*Definición de curvas Carga / Desplazamiento en las variaciones en el diámetro del refuerzo de acero*

<b>Muestra</b>	<b>f<sup>c</sup>-Modelo experimental</b>	<b>Dimensiones Modelo experimental</b>	<b>Carga</b>	<b>Diámetro del refuerzo de acero</b>	<b>Variación de diámetros de refuerzo de acero</b>	<b>Curva carga / Desplazamiento</b>
<b>Losa calibrada</b>	f <sup>c</sup> = 25.00 MPa	1500 mm x 3300 mm	Tercios	Ø = 6mm	Ø = 8 mm	Figura 80
					Ø = 9.525 mm	Figura 83
					Ø = 12 mm	Figura 86

*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 109**

*Curva de Variaciones en el refuerzo de acero*



*Nota:* Fuente: El autor.

### 5.1.4.3. Curva Carga / Desplazamiento para variaciones en la configuración de esferas

Obtención de las curvas de Carga / Desplazamiento para las variaciones de acuerdo con el modelo calibrado. La Tabla 11 resume las variaciones, se realizó las simulaciones numéricas para las configuraciones planteadas. Se detalla en la Figura 109:

**Tabla 13**

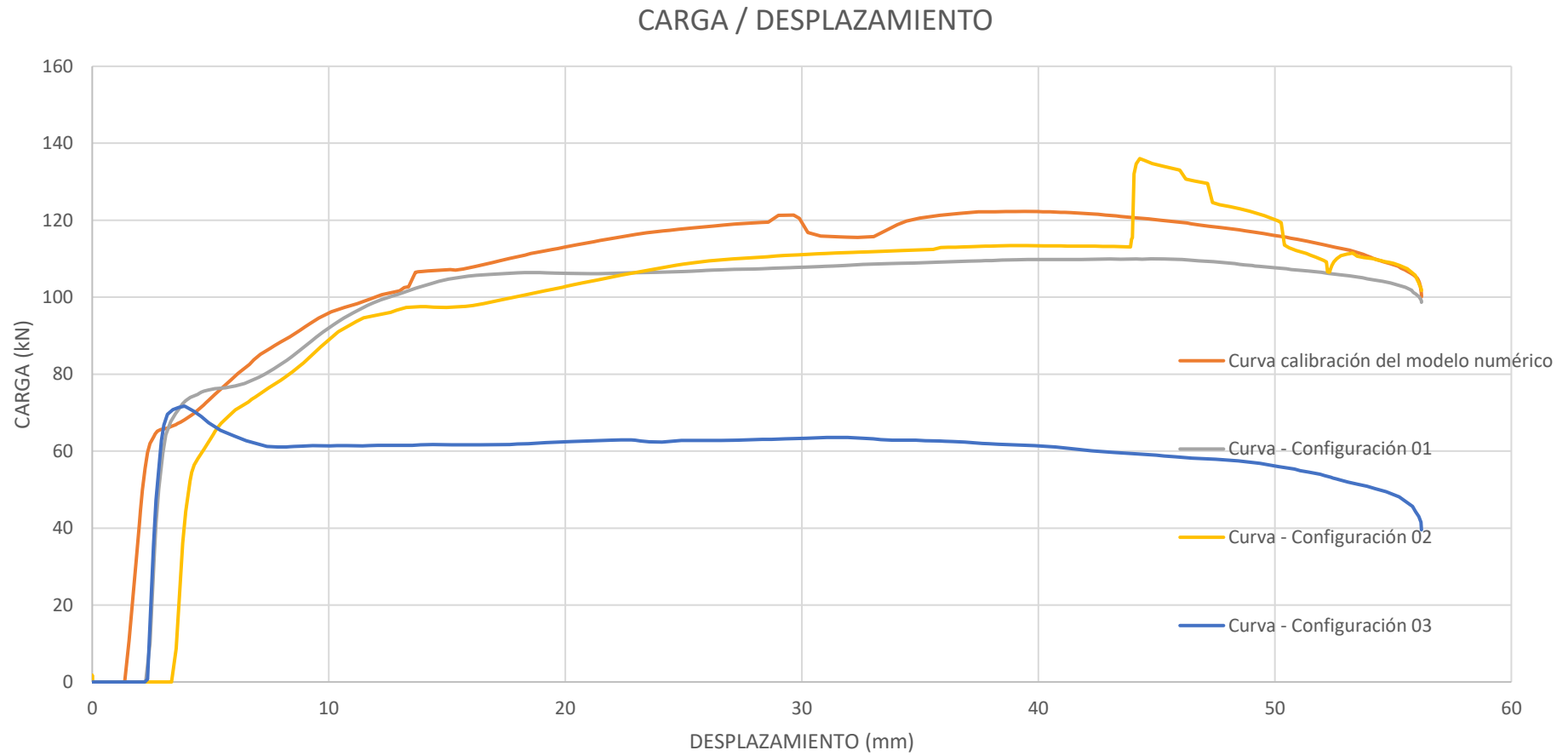
*Definición de curvas Carga / Desplazamiento en las variaciones en la configuración de esferas*

<b>Muestra</b>	<b>f<sup>c</sup>- Modelo experim ental</b>	<b>Dimensiones Modelo experimental</b>	<b>Carga</b>	<b>Diámetro del refuerzo de acero</b>	<b>Variación en la configuración de esferas</b>	<b>Curva carga / Desplazamiento</b>
<b>Losa calibrada</b>	f <sup>c</sup> = 25.00 MPa	1500 mm x 3300 mm	Tercios	Ø = 6mm	Configuración 01	Figura 93
					Configuración 02	Figura 97
					Configuración 03	Figura 101

*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 110**

*Curva de Variaciones en la configuración de esferas*



*Nota:* Fuente: El autor.

### ***5.1.5. Análisis de sensibilidad en la respuesta estructural de losas Bubbledeck ante variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero, mediante el método de elementos finitos***

Saltelli (2004) este método se emplea para analizar cómo las modificaciones en los parámetros de entrada de un modelo inciden en sus resultados. Dicha técnica permite reconocer los factores más relevantes que influyen en el comportamiento del modelo, así como evaluar la estabilidad de los resultados frente a variaciones en las condiciones iniciales.

Para desarrollar el análisis de sensibilidad de la respuesta estructural, se considerarán tres criterios principales: el punto de rotura del concreto, el punto de fluencia del refuerzo de acero y la carga última, todos ellos en relación con un desplazamiento base de referencia.

#### **Punto de rotura del concreto**

ACI (2019), establece que el punto de rotura del concreto corresponde a la carga máxima que un elemento de concreto puede resistir antes de fracturarse o romperse, momento en el cual pierde su capacidad portante. Este parámetro resulta esencial en los ensayos de compresión, pues determina la resistencia última del material bajo condiciones controladas. La correcta identificación de dicho punto es vital en el diseño estructural, ya que garantiza que el concreto empleado posea la capacidad necesaria para soportar las cargas previstas sin fallar.

#### **Punto de fluencia del refuerzo de acero**

El ACI (2019) señala que el punto de fluencia del acero de refuerzo corresponde al nivel de esfuerzo en el que el acero comienza a experimentar deformación plástica, es decir, cuando deja de regresar a su forma original tras la descarga. En este punto, el material alcanza una deformación permanente, y aunque se siga aplicando carga, la deformación aumenta de manera más significativa sin que se registre un incremento proporcional en la

tensión. Este comportamiento es fundamental para los elementos de concreto armado, ya que determina la capacidad del refuerzo para absorber cargas.

### **Carga última**

ACI (2019), define que la carga última se refiere a la carga máxima que una estructura o elemento de construcción puede soportar antes de fallar o colapsar. Es el valor crítico de carga en el cual el comportamiento del material o la estructura cambia de manera irreversible, pasando de un estado seguro a uno de inestabilidad, lo que podría resultar en la fractura o el colapso total. La carga última es fundamental para el diseño de estructuras, ya que garantiza que los elementos no excedan su capacidad de carga y se mantengan dentro de los límites seguros durante su vida útil.

#### **5.1.5.1 Respuesta estructural de las simulaciones**

Identificamos en la curva de carga / desplazamiento los puntos de punto de rotura del concreto, punto de fluencia del refuerzo de acero y la carga última.

**Variaciones en la resistencia a compresión:** Obtenido de las figuras 110, 111 y 112.

**Tabla 14**

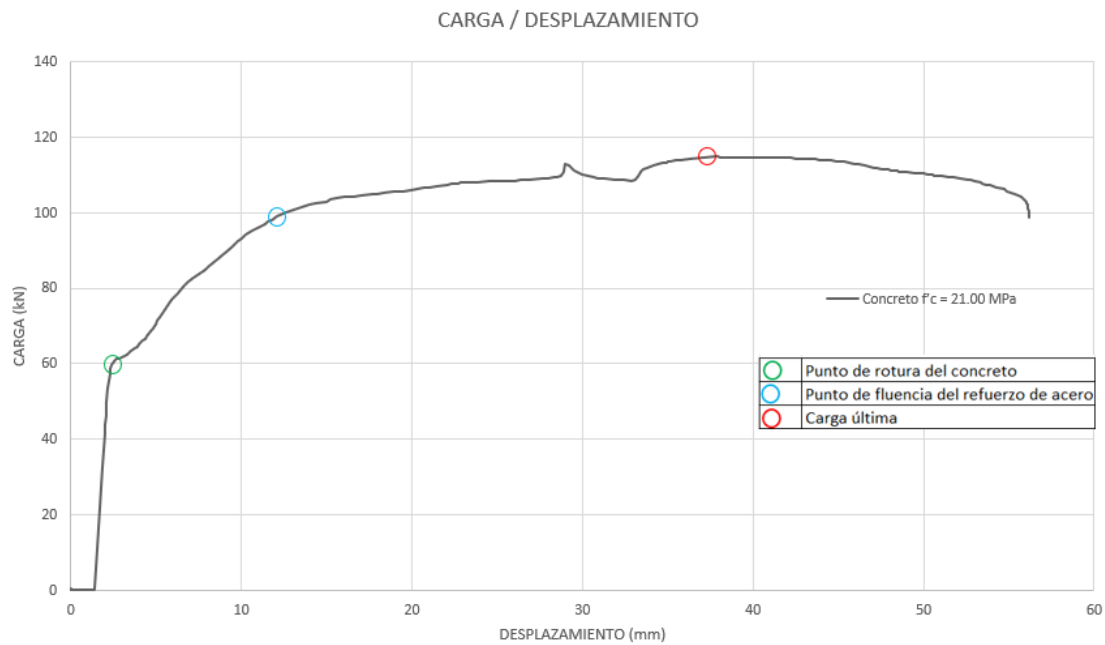
*Respuesta estructural de variaciones en la resistencia a compresión*

Respuesta estructural	F'C	Desplazamiento (mm)	Carga (kN)
Punto de rotura del concreto	21.00 Mpa	2.41398	59.7166
	28.00 Mpa	3.38429	68.0955
	35.00 Mpa	4.0948	78.4329
Punto de fluencia del refuerzo de acero	21.00 Mpa	12.099	98.9098
	28.00 Mpa	11.0449	101.926
	35.00 Mpa	10.6231	106.634
Carga última	21.00 Mpa	37.9034	114.808
	28.00 Mpa	38.5374	123.745
	35.00 Mpa	43.5433	130.471

*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 111**

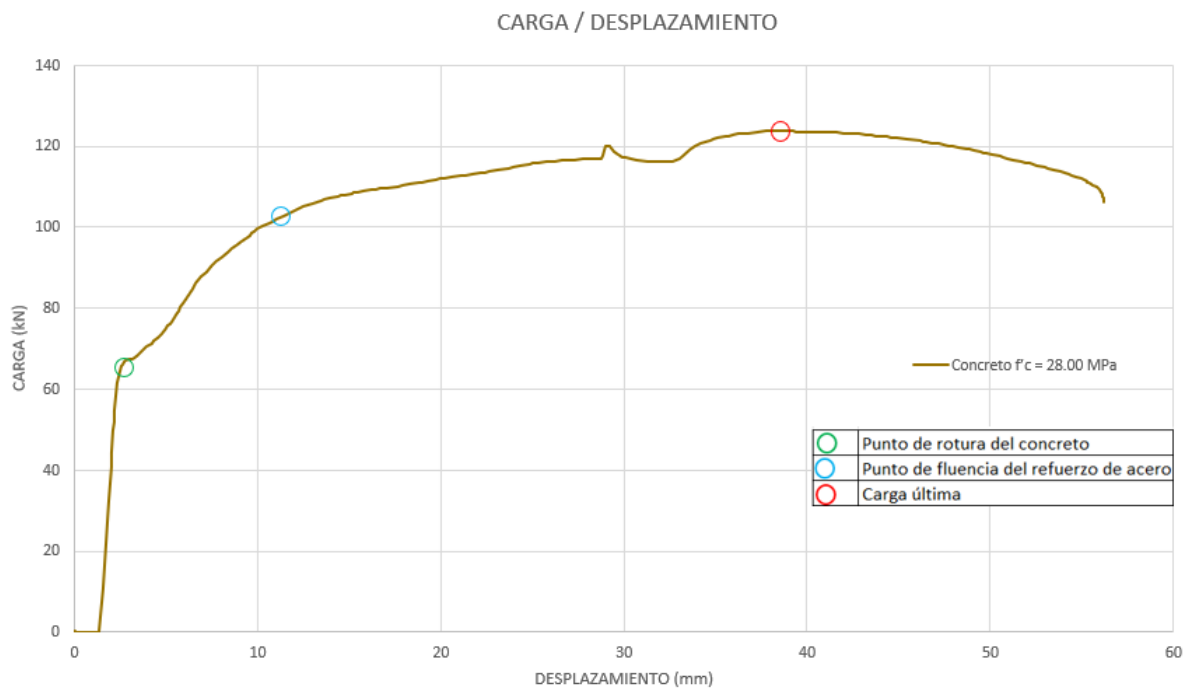
*Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento  $f'c=21.00\text{MPa}$*



*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 112**

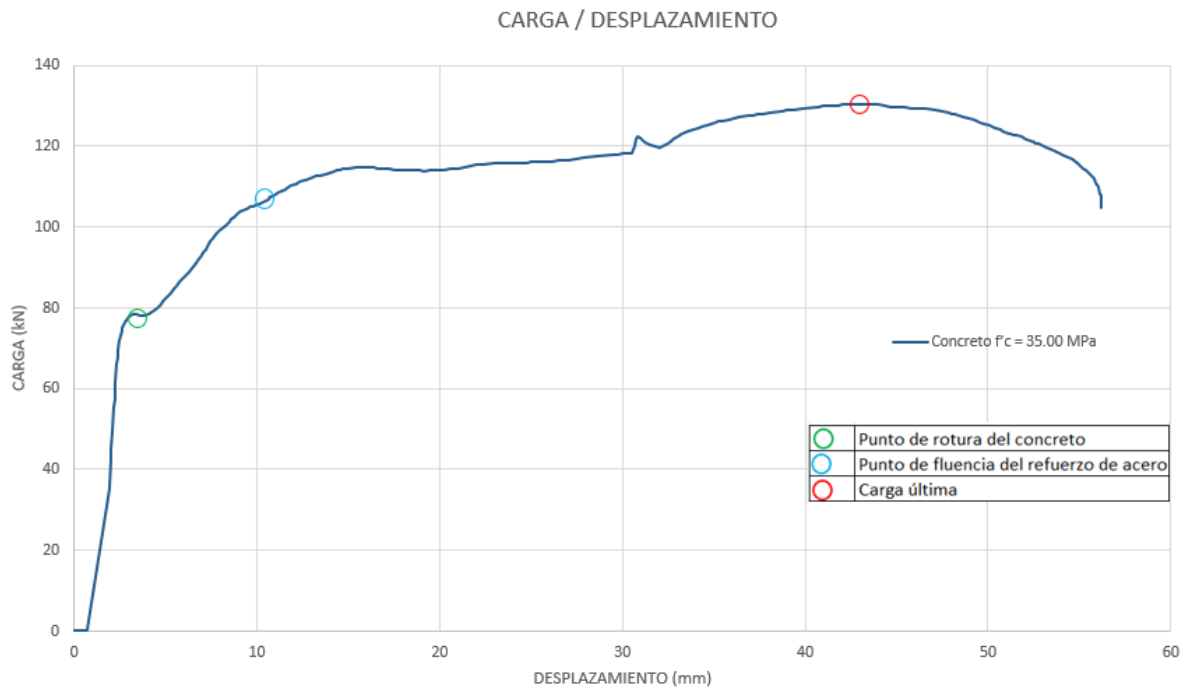
*Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento  $f'c=28.00\text{MPa}$*



*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 113**

*Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento  $f'_c=35.00\text{MPa}$*



*Nota.* Fuente: El autor.

**Variaciones en el refuerzo de acero:** Obtenido de las figuras 113, 114 y 115.

**Tabla 15**

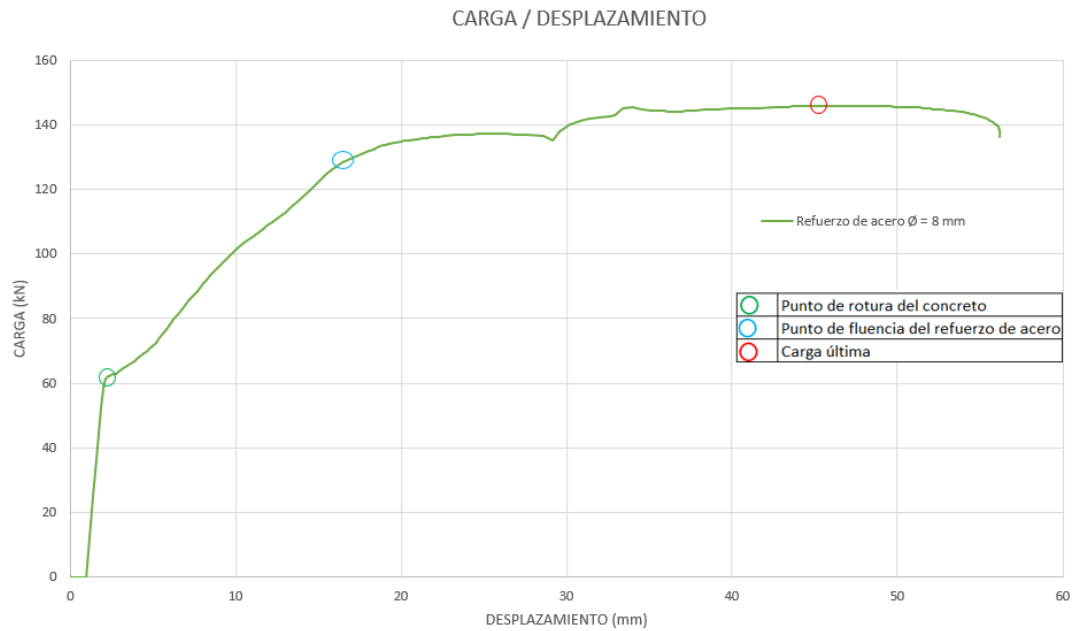
*Respuesta estructural de variaciones en el refuerzo de acero.*

Respuesta estructural	$\emptyset$	Desplazamiento (mm)	Carga (kN)
Punto de rotura del concreto	$\emptyset = 8\text{ mm}$	2.34269	62.3246
	$\emptyset = 9.525\text{ mm}$	2.66266	65.8262
	$\emptyset = 12\text{ mm}$	2.78419	74.6424
Punto de fluencia del refuerzo de acero	$\emptyset = 8\text{ mm}$	16.4694	128.348
	$\emptyset = 9.525\text{ mm}$	17.9825	161.737
	$\emptyset = 12\text{ mm}$	16.7966	258.74
Carga última	$\emptyset = 8\text{ mm}$	45.6503	145.989
	$\emptyset = 9.525\text{ mm}$	46.5395	187.784
	$\emptyset = 12\text{ mm}$	40.0707	273.621

*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 114**

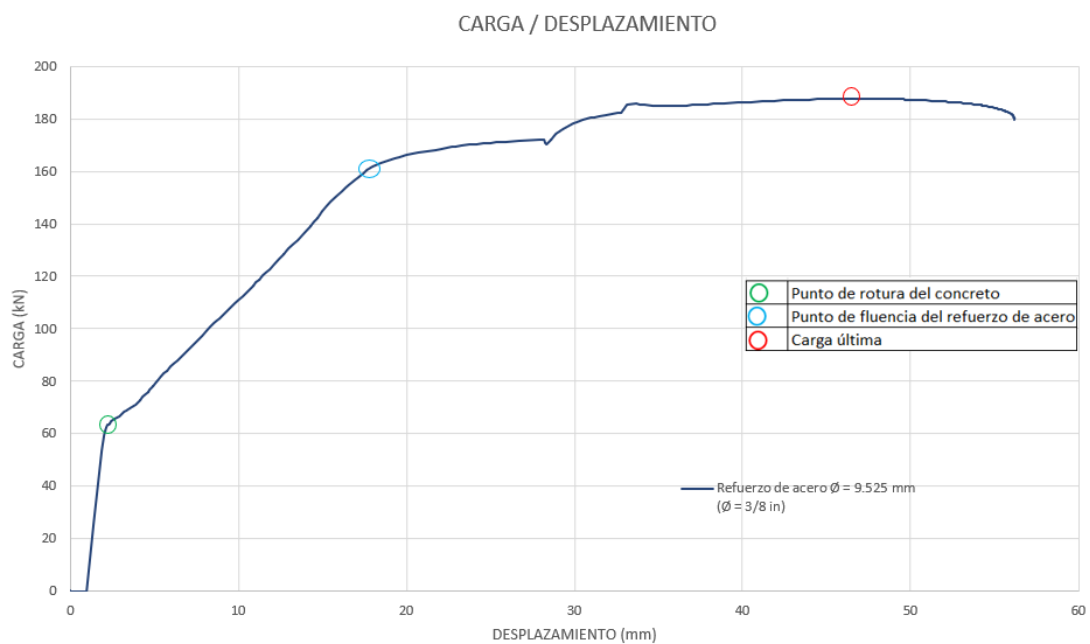
*Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento  $\varnothing = 8 \text{ mm}$*



*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 115**

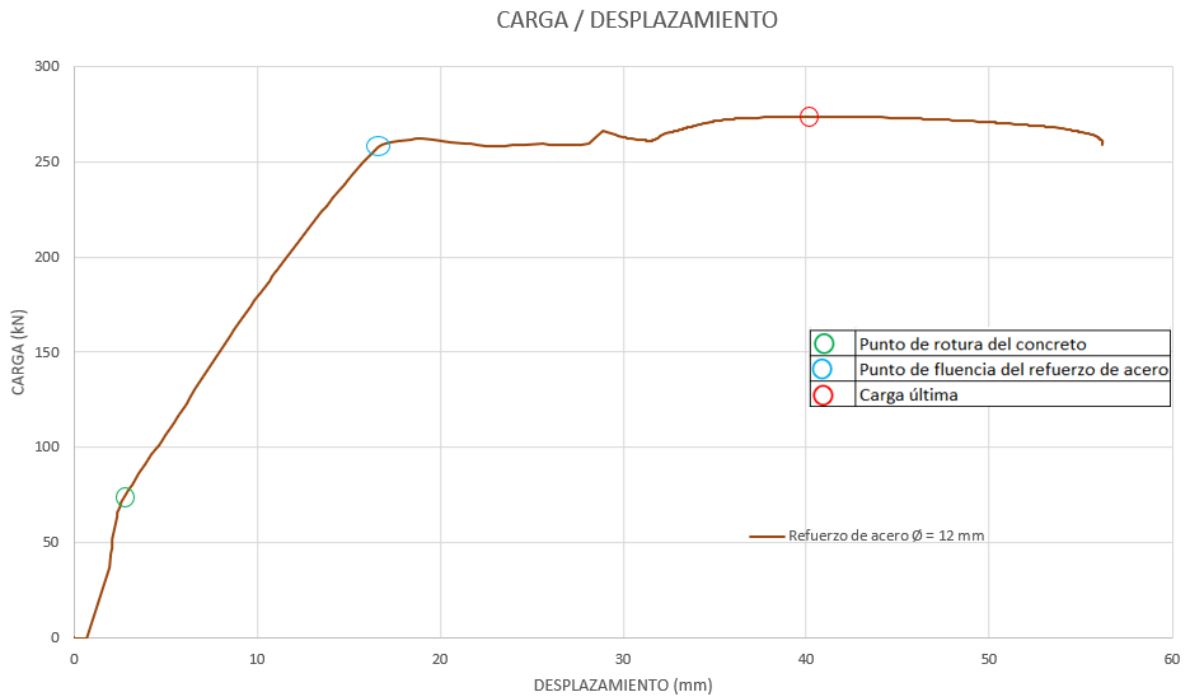
*Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento  $\varnothing = 9.525 \text{ mm}$*



*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 116**

*Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento  $\varnothing = 12$  mm*



*Nota.* Fuente: El autor.

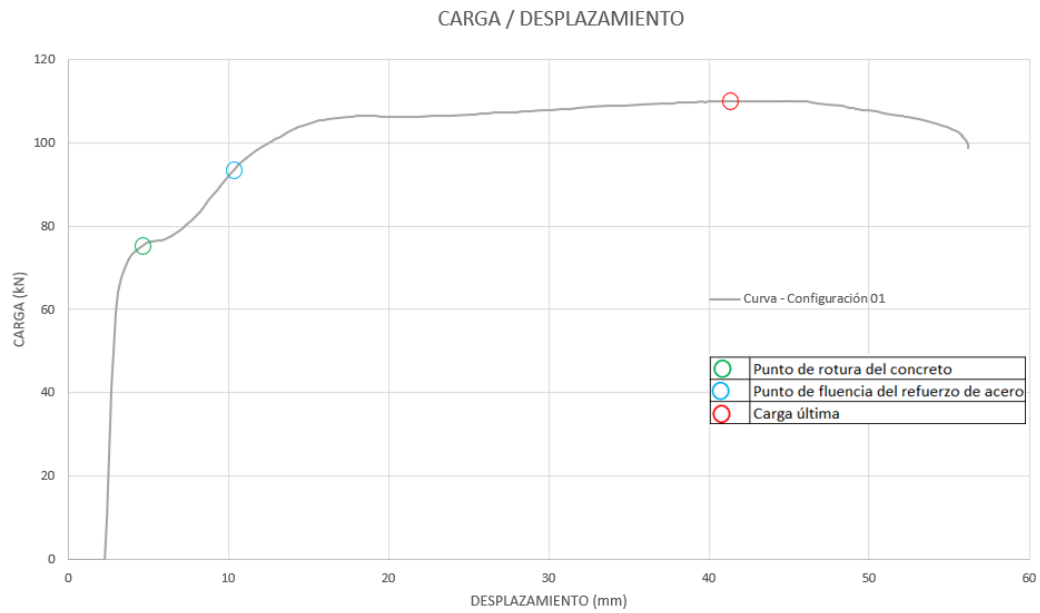
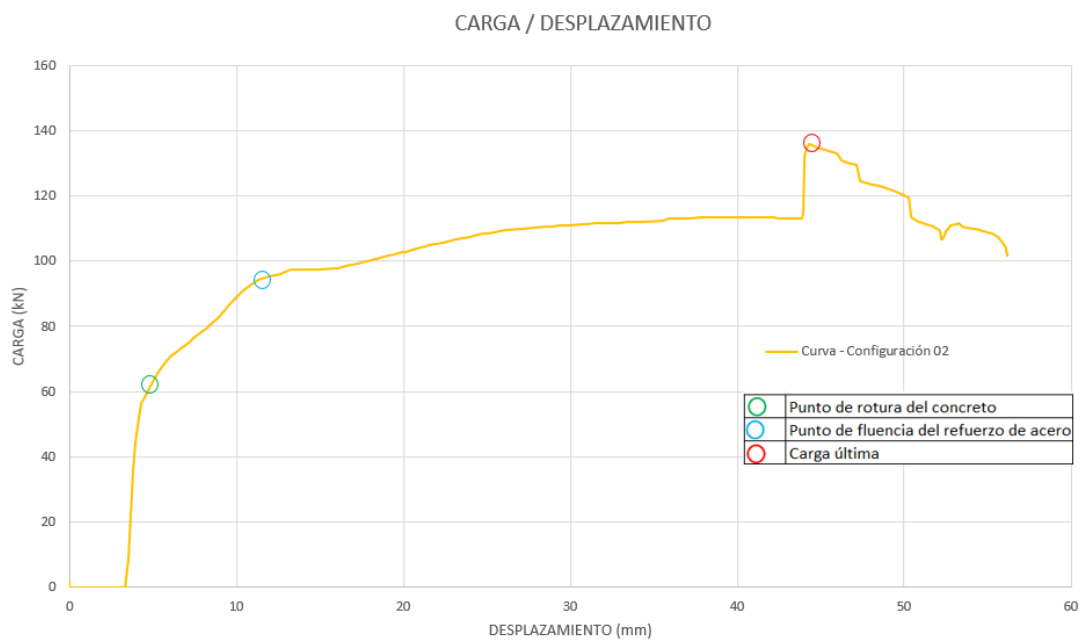
**Variaciones en la configuración de esferas:** Obtenido de las figuras 116, 117 y 118.

**Tabla 16**

*Respuesta estructural de variaciones en la configuración de esferas.*

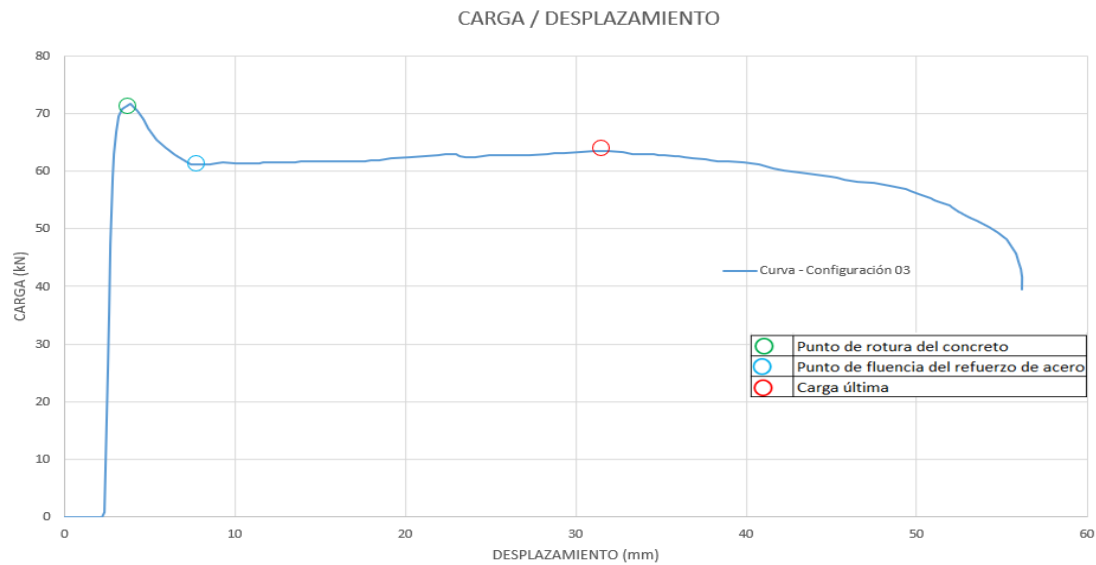
<b>Respuesta estructural</b>	<b>Configuración de esferas</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (kN)</b>
Punto de rotura del concreto	Configuración 01	4.72798	75.5788
	Configuración 02	4.71678	60.3543
	Configuración 03	3.90192	71.6914
Punto de fluencia del refuerzo de acero	Configuración 01	10.211	92.8601
	Configuración 02	11.4734	94.6066
	Configuración 03	3.90192	71.6914
Carga última	Configuración 01	44.7605	109.967
	Configuración 02	44.2878	136.02
	Configuración 03	31.9388	63.5456

*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 117***Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento Configuración 01**Nota.* Fuente: El autor.**Figura 118***Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento Configuración 02**Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 119**

*Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento Configuración 03*



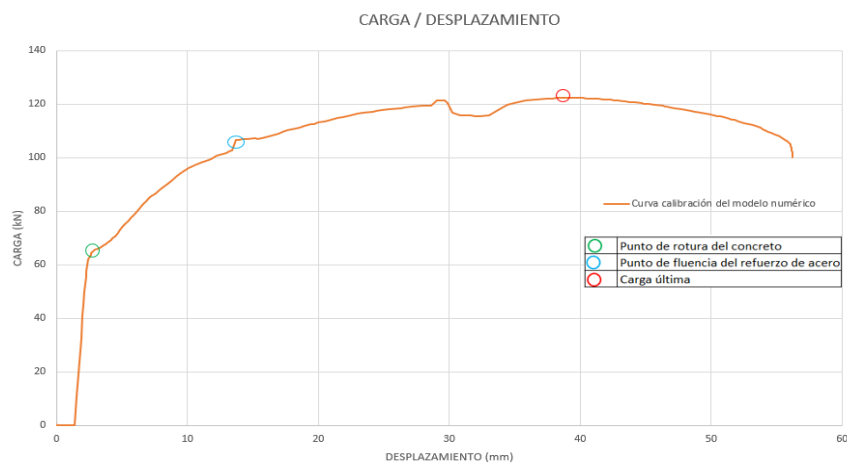
*Nota.* Fuente: El autor.

### 5.1.5.2 Análisis de sensibilidad de la respuesta estructural de las simulaciones

Se tomará la curva de carga / desplazamiento del modelo calibrado como curva base para realizar el análisis de sensibilidad en la respuesta estructural. Se detalla en la figura 119 y en la tabla 15:

**Figura 120**

*Respuesta estructural-Curva Carga/desplazamiento del modelo calibrado*



*Nota.* Fuente: El autor.

**Tabla 17***Respuesta estructural del modelo calibrado.*

<b>Respuesta estructural</b>	<b>Modelo</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (kN)</b>
Punto de rotura del concreto	Modelo calibrado	2.89689	65.6095
Punto de fluencia del refuerzo de acero	Modelo calibrado	13.7798	106.59
Carga última	Modelo calibrado	39.4207	122.287

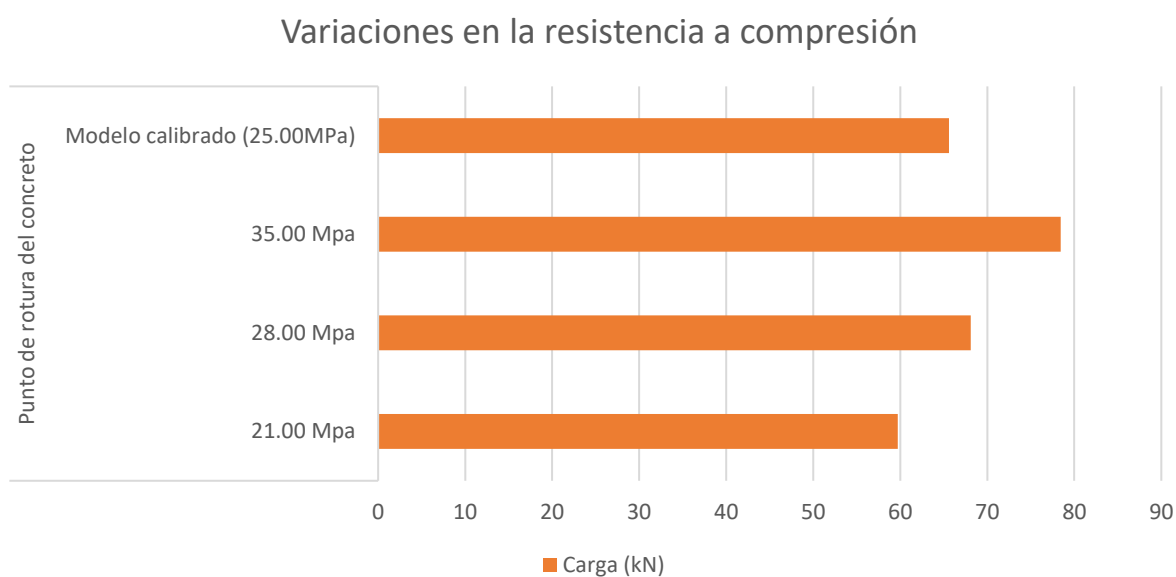
*Nota.* Fuente: El autor.

### **Análisis de sensibilidad en la respuesta estructural en el punto de rotura del concreto.**

- **Variación de resistencias a compresión:** Se detalla en la figura 120 y 121.

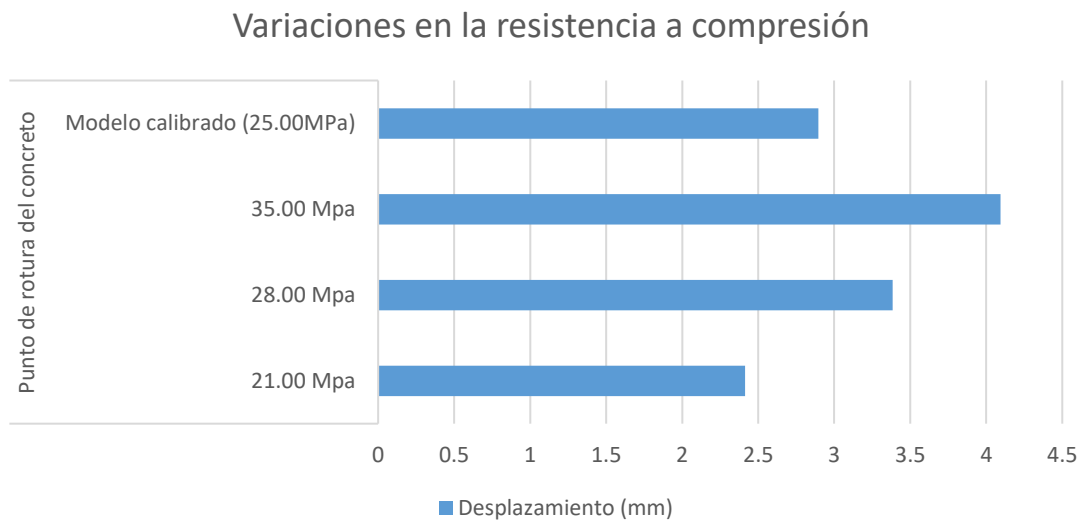
**Figura 121**

*Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en la resistencia a compresión por carga*

*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 122**

*Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en la resistencia a compresión por desplazamiento.*

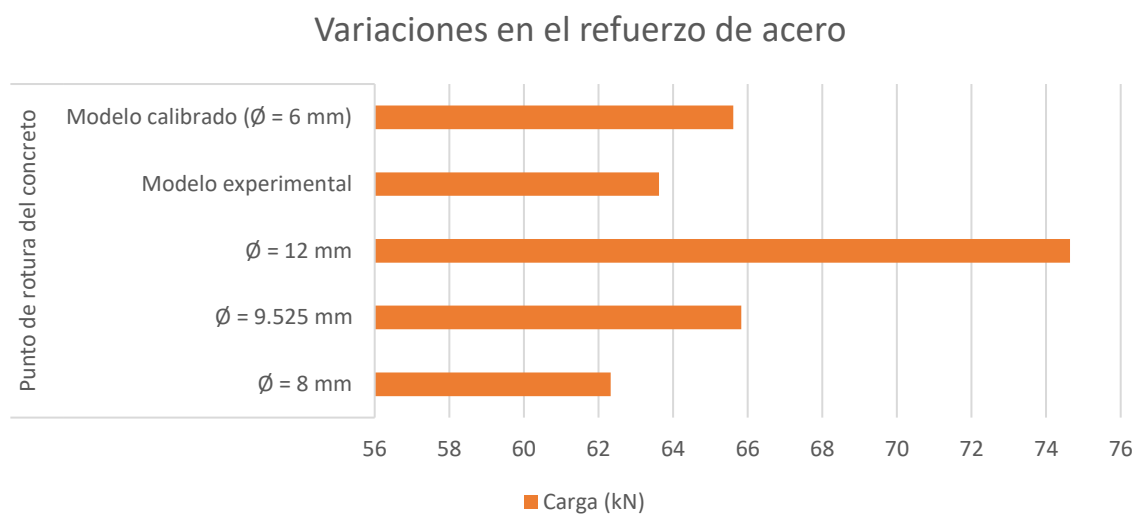


*Nota.* Fuente: El autor.

- **Variación en el refuerzo de acero:** Se detalla en la figura 122 y 123.

**Figura 123**

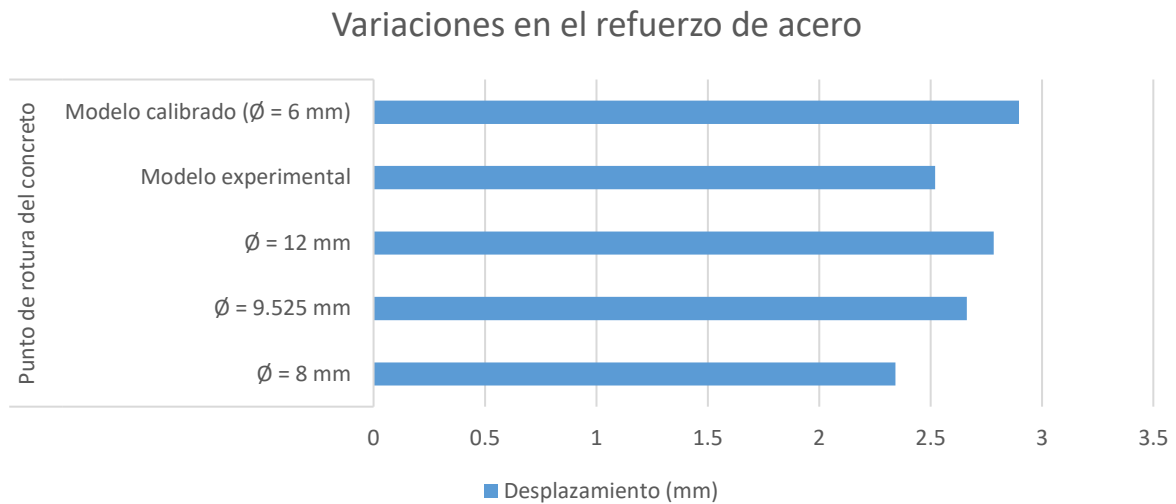
*Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en el refuerzo de acero por carga.*



*Nota.* Fuente: El autor.

### Figura 124

Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en el refuerzo de acero por desplazamiento.

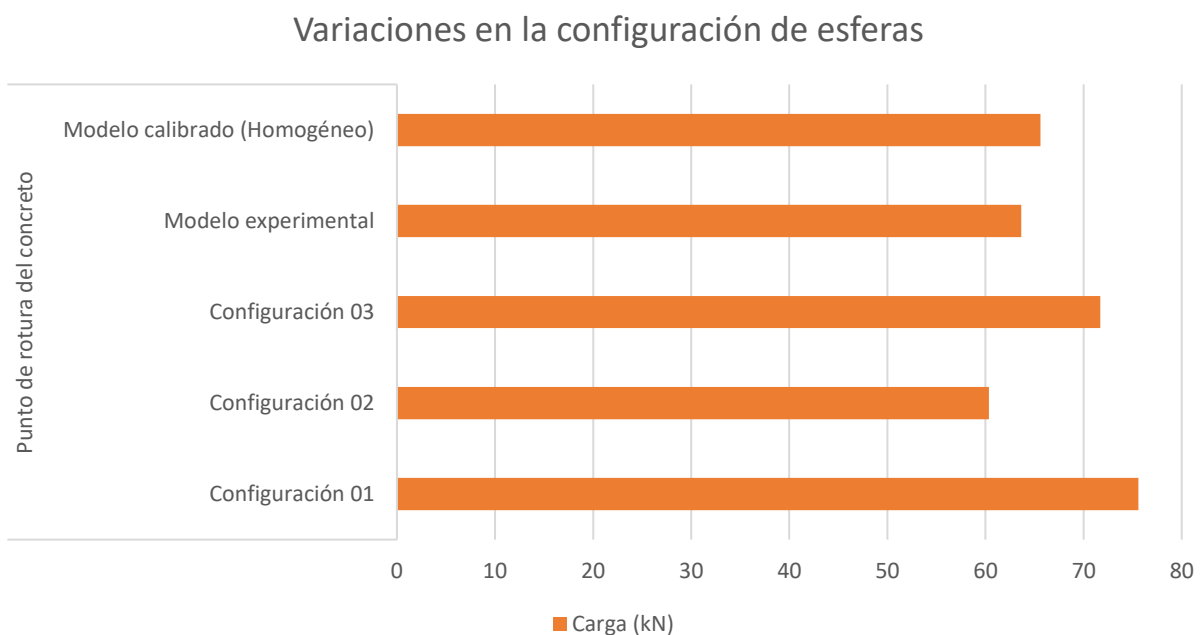


Nota. Fuente: El autor.

- **Variación en la configuración de esferas:** Se detalla en las figuras 124 y 125.

### Figura 125

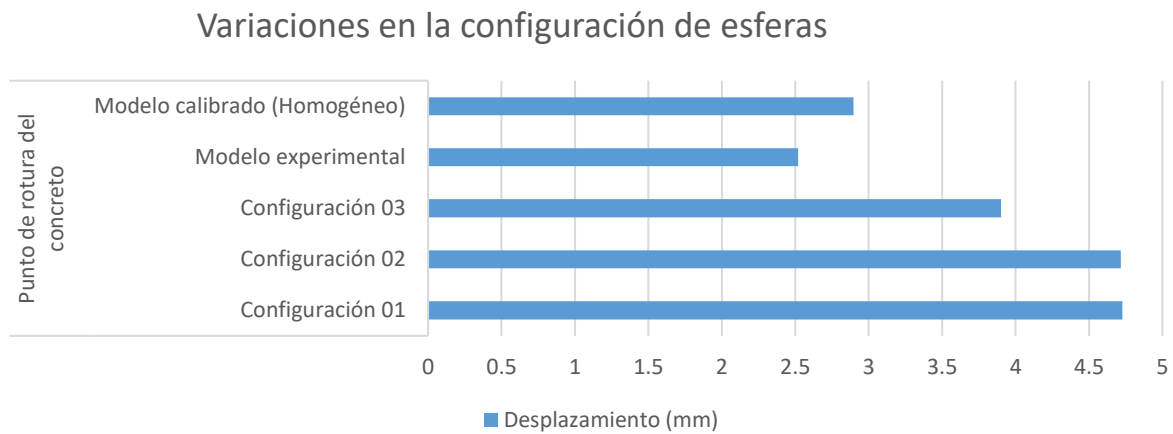
Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en la configuración de esferas por carga.



Nota. Fuente: El autor.

### Figura 126

*Resultados en el punto de rotura del concreto de las variaciones en la configuración de esferas por desplazamiento.*



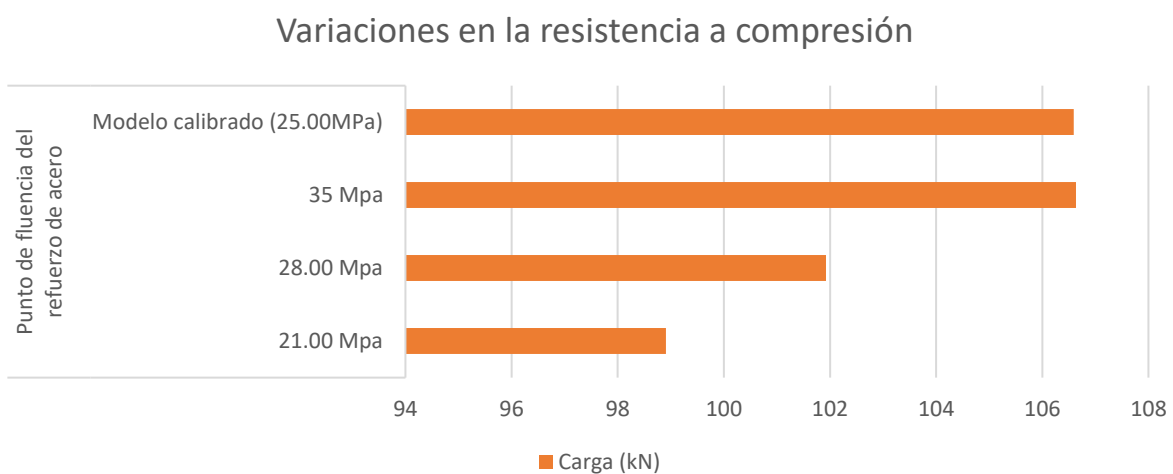
*Nota.* Fuente: El autor.

### **Análisis de sensibilidad en la respuesta estructural en el punto de fluencia del refuerzo de acero**

- **Variación en la resistencia a compresión:** Se detalla en las figuras 126 y 127.

### Figura 127

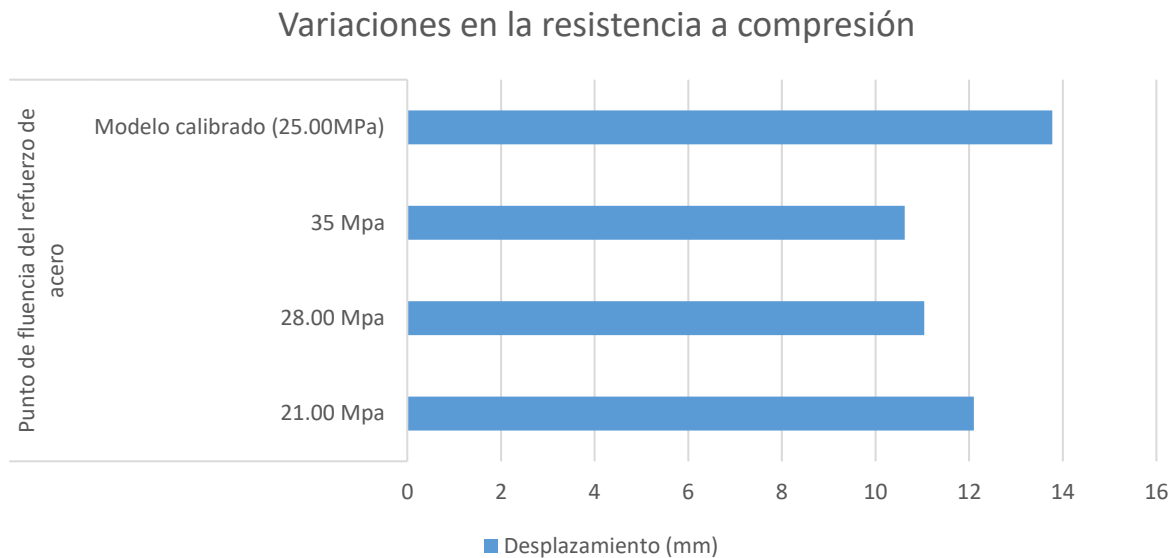
*Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero de las variaciones en la resistencia a compresión por carga.*



*Nota.* Fuente: El autor.

### Figura 128

Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero de las variaciones en la resistencia a compresión por desplazamiento.

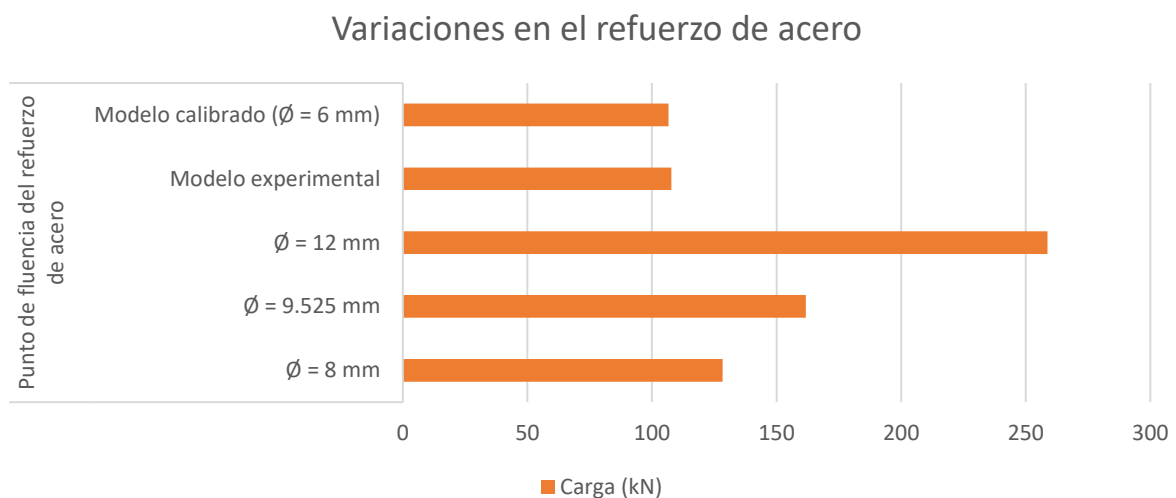


Nota. Fuente: El autor.

- **Variación en el refuerzo de acero:** Se detalla en las figuras 128 y 129.

### Figura 129

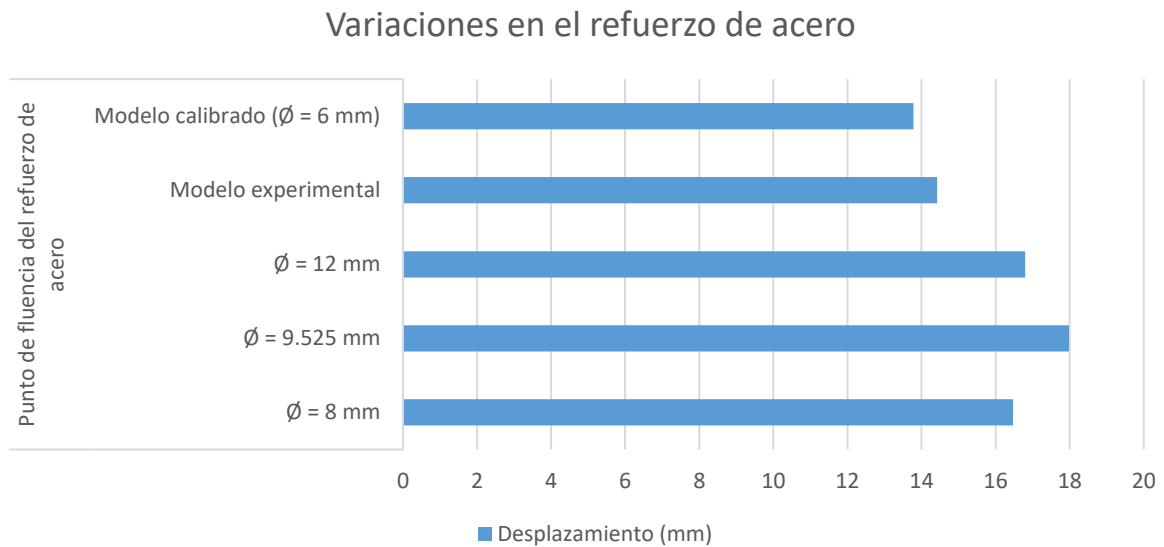
Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero de las variaciones en el refuerzo de acero por carga.



Nota. Fuente: El autor.

### Figura 130

Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero de las variaciones en el refuerzo de acero por desplazamiento.

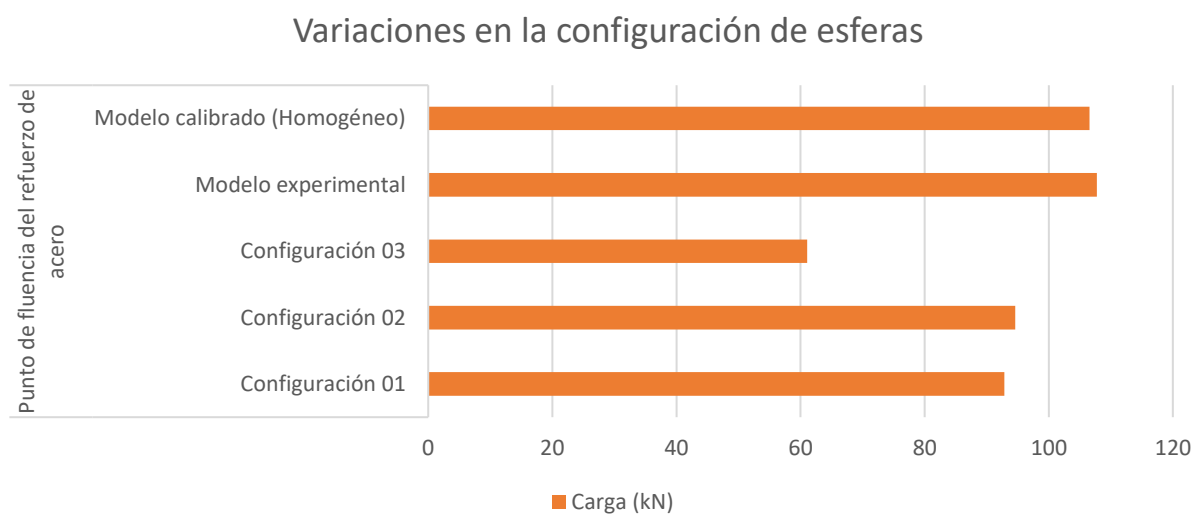


Nota. Fuente: El autor.

- **Variación en la configuración de esferas:** Se detalla en las figuras 130 y 131.

### Figura 131

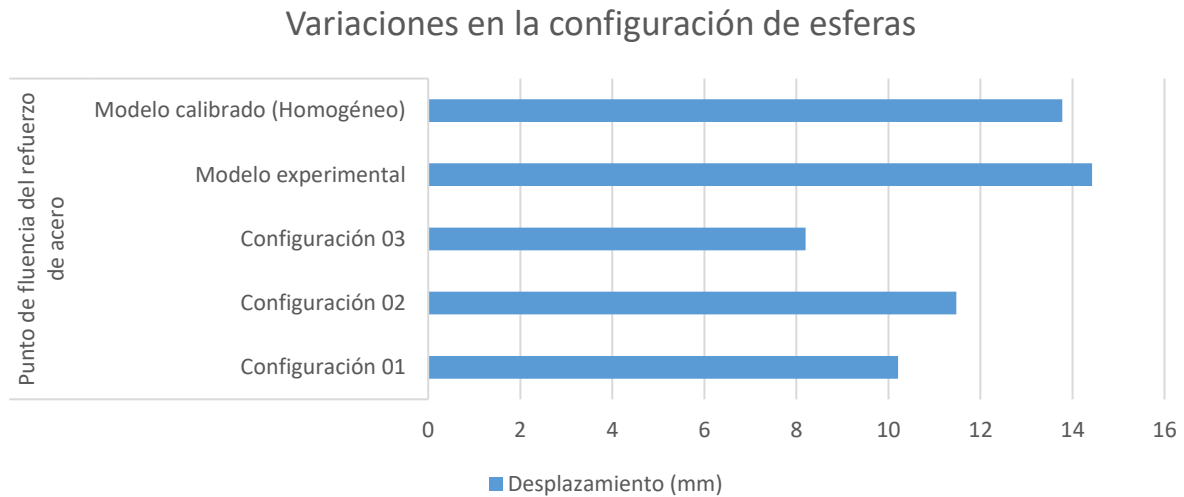
Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero en las variaciones de configuración de esferas por carga.



Nota. Fuente: El autor.

**Figura 132**

*Resultados en el punto de fluencia del refuerzo de acero en las variaciones de configuración de esferas por desplazamiento.*



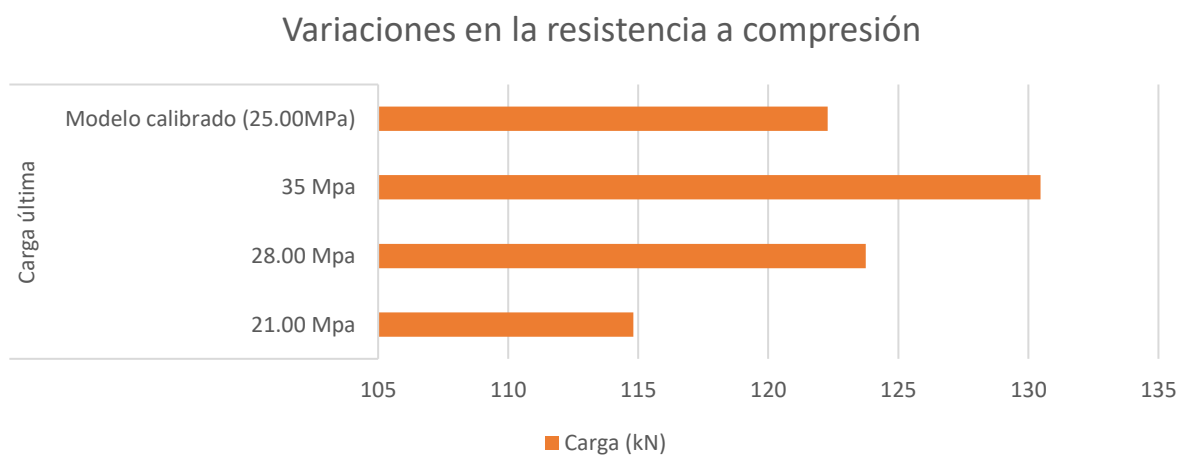
*Nota.* Fuente: El autor.

**Análisis de sensibilidad en la respuesta estructural en el punto de Carga última**

- **Variación en la resistencia a compresión:** Se detalla en las figuras 132 y 133.

**Figura 133**

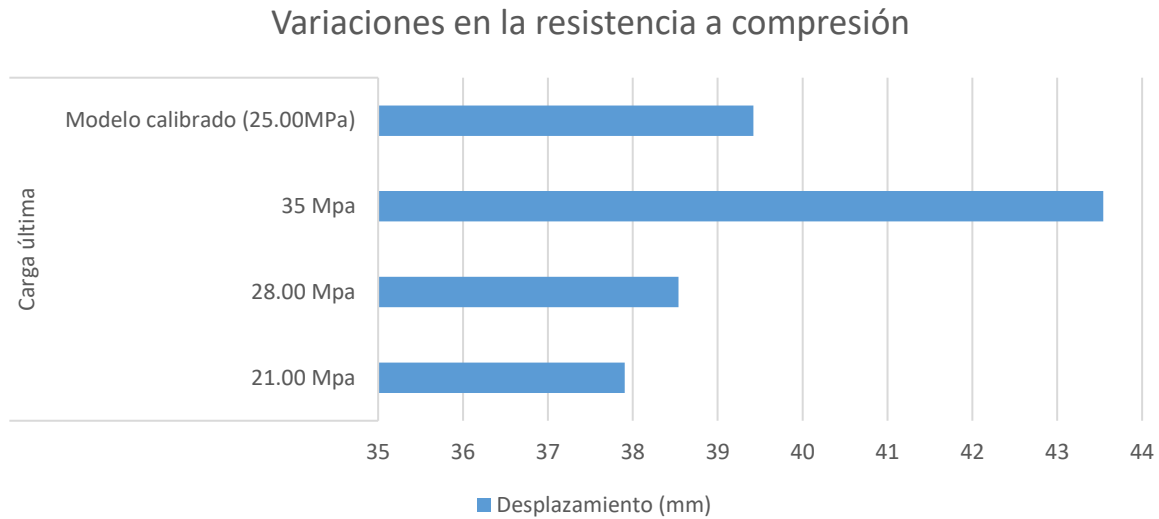
*Resultados en el punto de carga última de las variaciones en la resistencia a compresión por carga.*



*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 134**

*Resultados en el punto de carga última de las variaciones en la resistencia a compresión por desplazamiento.*

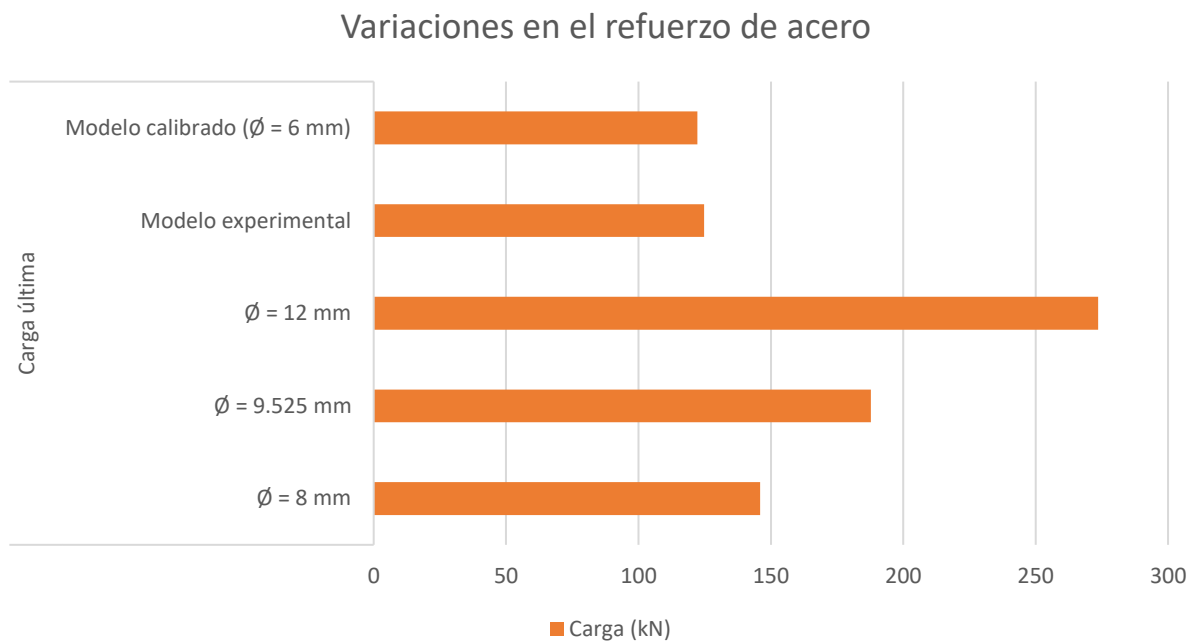


*Nota.* Fuente: El autor.

- **Variación en el refuerzo de acero:** Se detalla en las figuras 134 y 135.

**Figura 135**

*Resultados en el punto de carga última de las variaciones en el refuerzo de acero por carga.*



*Nota.* Fuente: El autor.

### Figura 136

Resultados en el punto de carga última de las variaciones en el refuerzo de acero por desplazamiento.

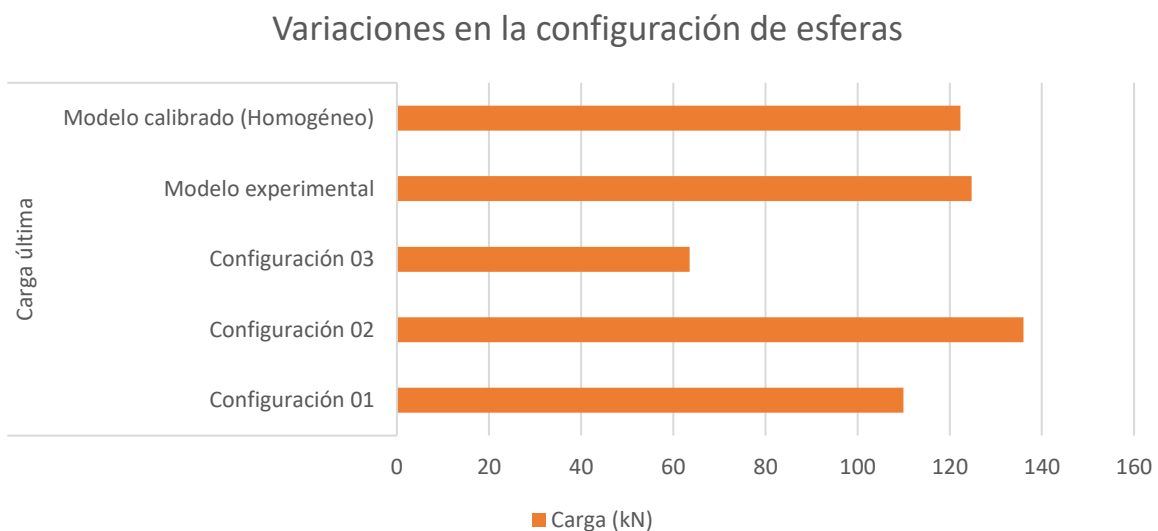


Nota. Fuente: El autor.

- **Variación en la configuración de esferas:** Se detalla en las figuras 136 y 137.

### Figura 137

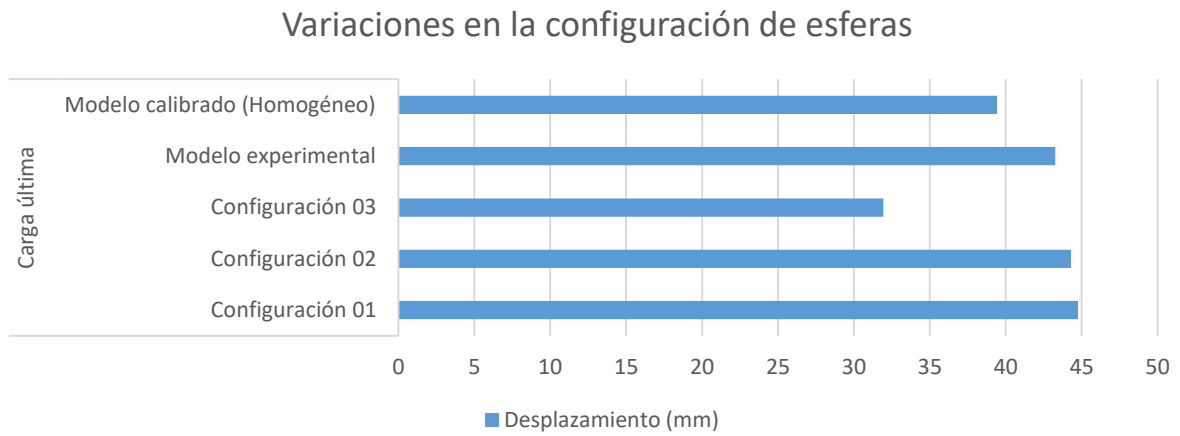
Resultados en el punto de carga última de las variaciones en la configuración de esferas por carga.



Nota. Fuente: El autor.

**Figura 138**

*Resultados en el punto de carga última de las variaciones en la configuración de esferas por desplazamiento.*



*Nota.* Fuente: El autor.

## 5.2. Discusión de resultados

La discusión de los resultados se llevó a cabo con la recolección de los datos obtenidos de las diferentes curvas de carga / desplazamiento, realizando un análisis de sensibilidad que nos permite obtener su respuesta estructural ante los parámetros de Punto de rotura del concreto, Punto de fluencia del refuerzo de acero y Carga última, estos resultados fueron contrastados con la investigación experimental realizada, la cual es base de ésta investigación.

En lo que se refiere a la **discusión de los resultados del objetivo general**, el cual consiste en analizar la sensibilidad de la respuesta estructural de losas Bubbledeck ante variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero, mediante el método de elementos finitos.

La validez del modelo se sustenta en su capacidad para replicar con precisión los mecanismos de falla típicos del concreto, como el agrietamiento por tracción y el aplastamiento por compresión, elementos fundamentales en el análisis de estructuras de concreto armado.

Este hallazgo coincide con lo señalado por Mazzotti et al. (2020), quienes afirman que el modelo de plasticidad con daño de ABAQUS proporciona una representación robusta del comportamiento no lineal del concreto, especialmente bajo condiciones de carga cíclica o monotónica, permitiendo capturar tanto la pérdida de rigidez como la degradación progresiva del material.

Además, el enfoque de análisis de sensibilidad empleado en este estudio resulta clave para identificar cómo variaciones geométricas o de refuerzo influyen en la respuesta estructural. Esto permite no solo validar modelos numéricos, sino también orientar decisiones de diseño con base en evidencias cuantitativas. En este sentido, se fortalece el criterio

ingenieril al incorporar herramientas computacionales avanzadas, que optimizan el desempeño estructural sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad.

Por último, el uso de curvas carga–desplazamiento como instrumento de evaluación resalta la importancia de criterios comparativos en la ingeniería estructural, pues estas curvas no solo ofrecen una visión detallada del comportamiento del elemento, sino que también sirven como vínculo entre el modelo numérico y la realidad física.

Se observó que existen diferentes respuestas estructurales para las diferentes variaciones planteadas y que un análisis de sensibilidad mediante el método de elementos finitos nos permite obtener valores aproximados de estas respuestas estructurales, los cuales se detallan en las siguientes tablas 18, 19 y 20.

**Tabla 18***Resultados obtenidos- Variaciones en la resistencia a compresión*

	<b>Respuesta estructural</b>	<b>F'C</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (kN)</b>
<b>Variaciones en la resistencia a compresión</b>	<b>Punto de rotura del concreto</b>	21.00 Mpa	2.41398	59.7166
		28.00 Mpa	3.38429	68.0955
		35.00 Mpa	4.0948	78.4329
		Modelo calibrado (25.00MPa)	2.89689	65.6095
		Modelo experimental	2.52	63.6254
		<b>Punto de fluencia del refuerzo de acero</b>	21.00 Mpa	12.099
	28.00 Mpa	11.0449	101.926	
	35 Mpa	10.6231	106.634	
	Modelo calibrado (25.00MPa)	13.7798	106.59	
	Modelo experimental	14.42453614	107.7391304	
	<b>Carga última</b>	21.00 Mpa	37.9034	114.808
		28.00 Mpa	38.5374	123.745
		35 Mpa	43.5433	130.471
		Modelo calibrado (25.00MPa)	39.4207	122.287
		Modelo experimental	43.256	124.7826087

*Nota.* Fuente: El autor.

**Tabla 19**

Resultados obtenidos- Variaciones en el refuerzo de acero

	<b>Respuesta estructural</b>	<b>Ø</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (kN)</b>
<b>Variaciones en el refuerzo de acero</b>	<b>Punto de rotura del concreto</b>	Ø = 8 mm	2.34269	62.3246
		Ø = 9.525 mm	2.66266	65.8262
		Ø = 12 mm	2.78419	74.6424
		Modelo experimental	2.52	63.6254
		Modelo calibrado (Ø = 6 mm)	2.89689	65.6095
		<b>Punto de fluencia del refuerzo de acero</b>	Ø = 8 mm	16.4694
	Ø = 9.525 mm	17.9825	161.737	
	Ø = 12 mm	16.7966	258.74	
	Modelo experimental	14.42453614	107.7391304	
	Modelo calibrado (Ø = 6 mm)	13.7798	106.59	
	<b>Carga última</b>	Ø = 8 mm	45.6503	145.989
		Ø = 9.525 mm	46.5395	187.784
		Ø = 12 mm	40.0707	273.621
		Modelo experimental	43.256	124.7826087
		Modelo calibrado (Ø = 6 mm)	39.4207	122.287

*Nota.* Fuente: El autor.

Tabla 20

Resultados obtenidos- Variaciones en la configuración de esferas

	<b>Respuesta estructural</b>	<b>Configuración de esferas</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (kN)</b>
<b>Variaciones en la configuración de esferas</b>	<b>Punto de rotura del concreto</b>	Configuración 01	4.72798	75.5788
		Configuración 02	4.71678	60.3543
		Configuración 03	3.90192	71.6914
		Modelo experimental	2.52	63.6254
		Modelo calibrado (Homogéneo)	2.89689	65.6095
		<b>Punto de fluencia del refuerzo de acero</b>	Configuración 01	10.211
	Configuración 02	11.4734	94.6066	
	Configuración 03	3.90192	71.6914	
	Modelo experimental	14.42453614	107.7391304	
	Modelo calibrado (Homogéneo)	13.7798	106.59	
	<b>Carga última</b>	Configuración 01	44.7605	109.967
		Configuración 02	44.2878	136.02
		Configuración 03	31.9388	63.5456
		Modelo experimental	43.256	124.7826087
		Modelo calibrado (Homogéneo)	39.4207	122.287

Nota. Fuente: El autor.

Según Burga (2022), la aplicación del método de elementos finitos en simulaciones numéricas genera resultados altamente coherentes con los obtenidos experimentalmente. En su investigación, calibró un modelo de elementos finitos para un muro de contención de piedra, logrando un margen de error de apenas 0.11% en comparación con las fuerzas, desplazamientos y modos de falla reales del muro, lo que permitió alcanzar resultados muy precisos. El autor atribuye esta exactitud a la selección adecuada de la malla empleada y a la definición precisa de las propiedades mecánicas de los materiales del muro.

En cuanto a la **discusión de los resultados del objetivo específico 01**, que es validar un modelo numérico a partir de un ensayo experimental que represente la respuesta estructural de losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos, particularmente cuando se busca replicar con precisión el comportamiento de elementos innovadores como las losas tipo Bubbledeck. Los resultados obtenidos en este estudio, que muestran discrepancias menores entre el modelo numérico y el experimental (con diferencias menores al 15 % en desplazamiento y al 5 % en carga), confirman la capacidad predictiva del método de elementos finitos cuando se encuentra adecuadamente calibrado.

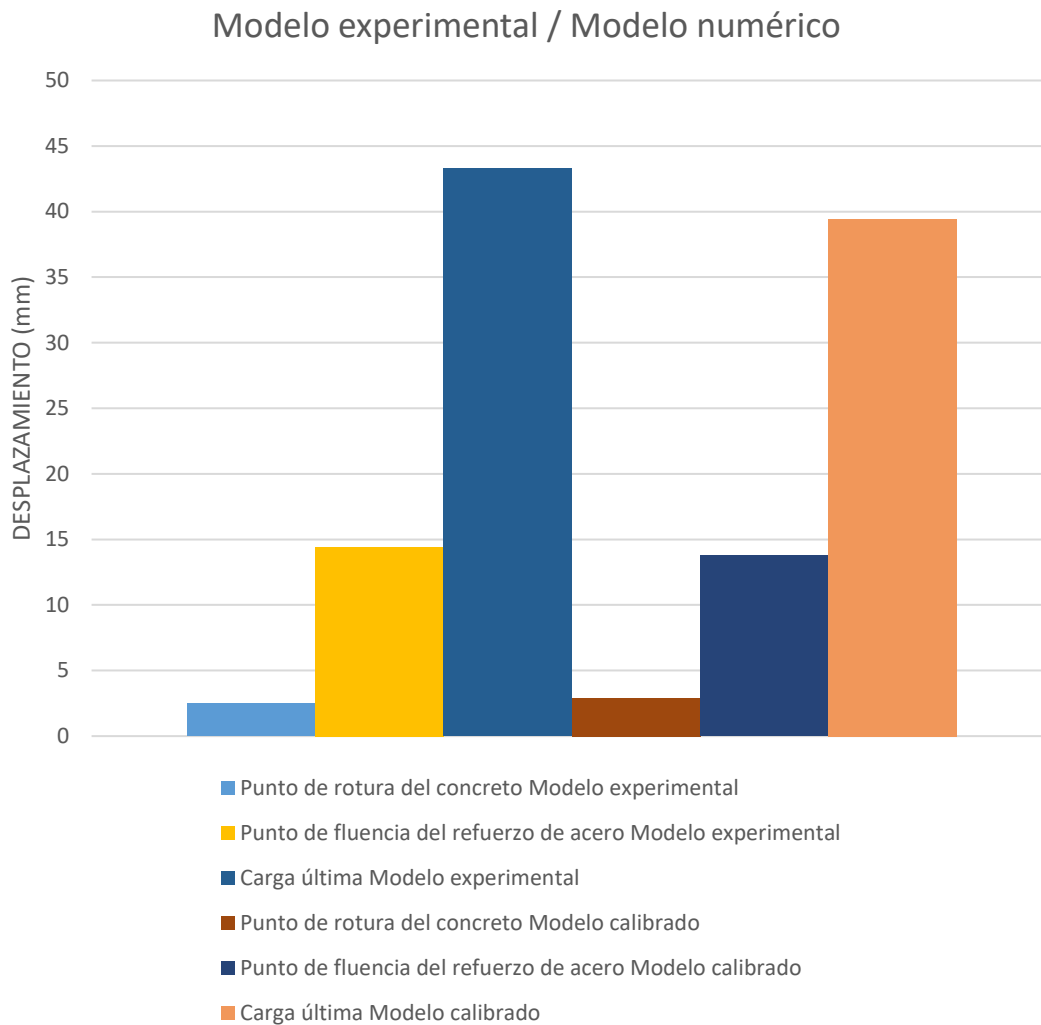
Esto coincide con lo planteado por Wu, Huang y Chen (2018), quienes señalan que la fidelidad de un modelo numérico en elementos de concreto reforzado depende tanto de la correcta definición de propiedades materiales como de la implementación precisa de condiciones de carga y contacto. Según estos autores, las variaciones dentro de un margen del 10 % en desplazamiento o carga pueden considerarse aceptables para estudios estructurales complejos, especialmente en configuraciones tridimensionales.

Asimismo, el hecho de que el modelo haya mostrado una leve sobreestimación en el inicio de fisuración y una ligera subestimación en la ductilidad final no solo es esperable, sino que también evidencia una alta coherencia en la simulación del comportamiento no lineal del concreto y del acero. Esta capacidad de replicar con precisión puntos críticos como la

fluencia del refuerzo o la carga última brinda confianza para utilizar el modelo en análisis paramétricos, optimización estructural o estudios de sensibilidad.

En definitiva, esta validación fortalece el argumento de que la simulación computacional puede sustituir ensayos físicos repetitivos en fases avanzadas de diseño estructural, siempre que se utilice una metodología rigurosa y un modelo previamente contrastado con la realidad experimental.

La calibración del modelo se realizó con las comparativas de resultados de carga / desplazamiento obtenido de las curvas representativas que genera el software ABAQUS, el uso del método de elementos finitos permite poder simular y acercarse a los resultados de ensayos experimentales de manera aproximada; se detallan en las siguientes figuras 138 y 139:

**Figura 139***Modelo experimental / Modelo numérico desplazamiento.*

*Nota.* Fuente: El autor.

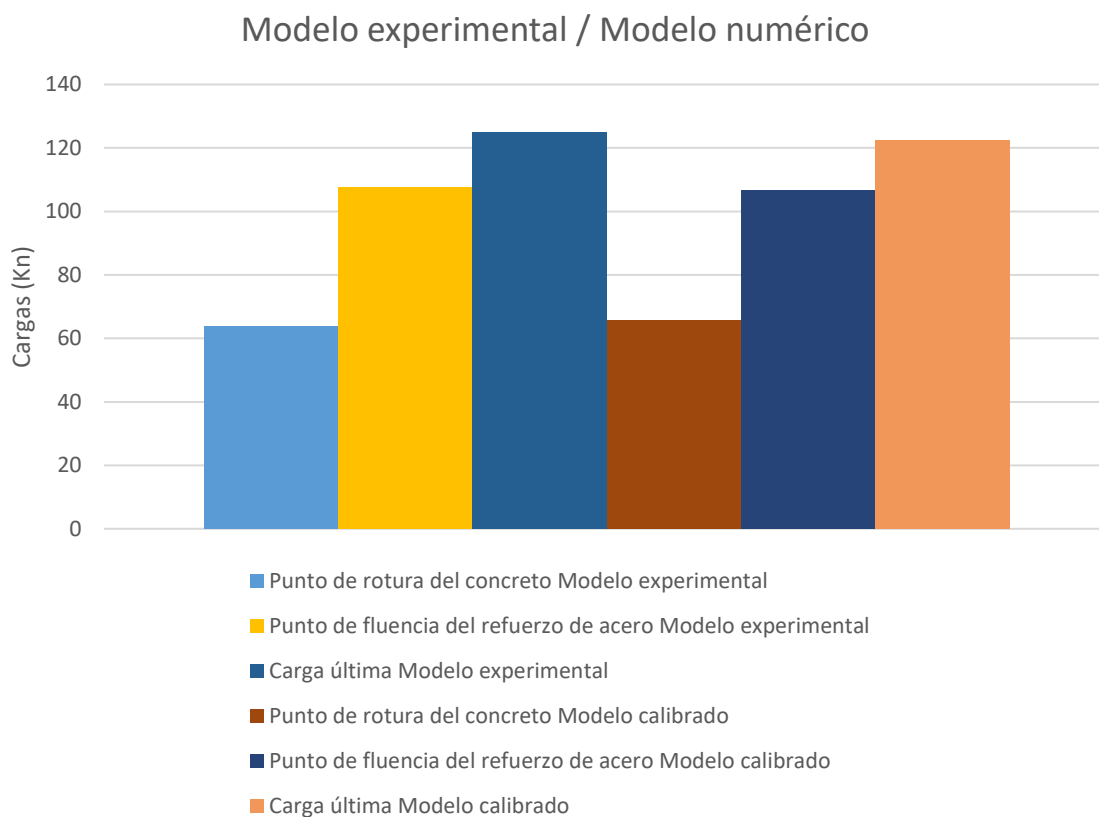
El modelo numérico sobreestima el punto de rotura del concreto en un 5.0%, lo cual puede deberse a una representación más resistente del material en la simulación.

El punto de fluencia del acero está bastante bien representado, con solo un 6.9% de diferencia, lo que indica una buena calibración del comportamiento plástico del refuerzo.

La carga última está subestimada en 9.3%, lo cual es aceptable en modelos estructurales calibrados.

**Figura 140**

*Modelo experimental / Modelo numérico carga.*



*Nota.* Fuente: El autor.

El punto de rotura del concreto muestra una ligera sobreestimación del modelo numérico (+2.36%), lo cual podría deberse a una representación más rígida o idealizada del material en el modelo. Sin embargo, la diferencia es mínima y aceptable.

El punto de fluencia del refuerzo de acero presenta una diferencia de tan solo  $-0.93\%$ , lo cual indica una excelente calibración del comportamiento plástico del acero dentro del modelo numérico. Esta coincidencia demuestra que las propiedades del acero y los criterios de fluencia han sido bien definidos.

La carga última obtenida por el modelo numérico es solo un 2.4% inferior al valor experimental, lo cual representa una muy buena aproximación de la capacidad máxima de la estructura.

**Discusión de los resultados del objetivo 2:** Realizar simulaciones numéricas para evaluar la respuesta estructural de losas Bubbledeck ante diferentes configuraciones de esferas y refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos, ha demostrado ser una herramienta eficaz para anticipar el comportamiento estructural de estos sistemas constructivos. Este tipo de análisis, realizado mediante el método de elementos finitos (FEM) en el entorno del software ABAQUS, permite no solo prever el desempeño frente a cargas, sino también optimizar el diseño reduciendo materiales innecesarios, como el concreto macizo, sin afectar negativamente la resistencia o seguridad de la losa.

En este contexto, la precisión del modelo numérico cobra un papel fundamental, ya que permite al ingeniero evaluar variaciones geométricas y estructurales sin necesidad de recurrir a múltiples ensayos físicos costosos. Según Hegger et al. (2006), el comportamiento estructural de losas aligeradas como las Bubbledeck puede modelarse con alta fidelidad utilizando métodos numéricos avanzados, siempre que se definan adecuadamente las propiedades del material, las condiciones de frontera y la interacción entre concreto y refuerzo. Los autores subrayan que el FEM permite analizar de forma eficiente la influencia de elementos de aligeramiento, como las esferas de plástico, en la rigidez global, la distribución de esfuerzos y la deformación de la losa.

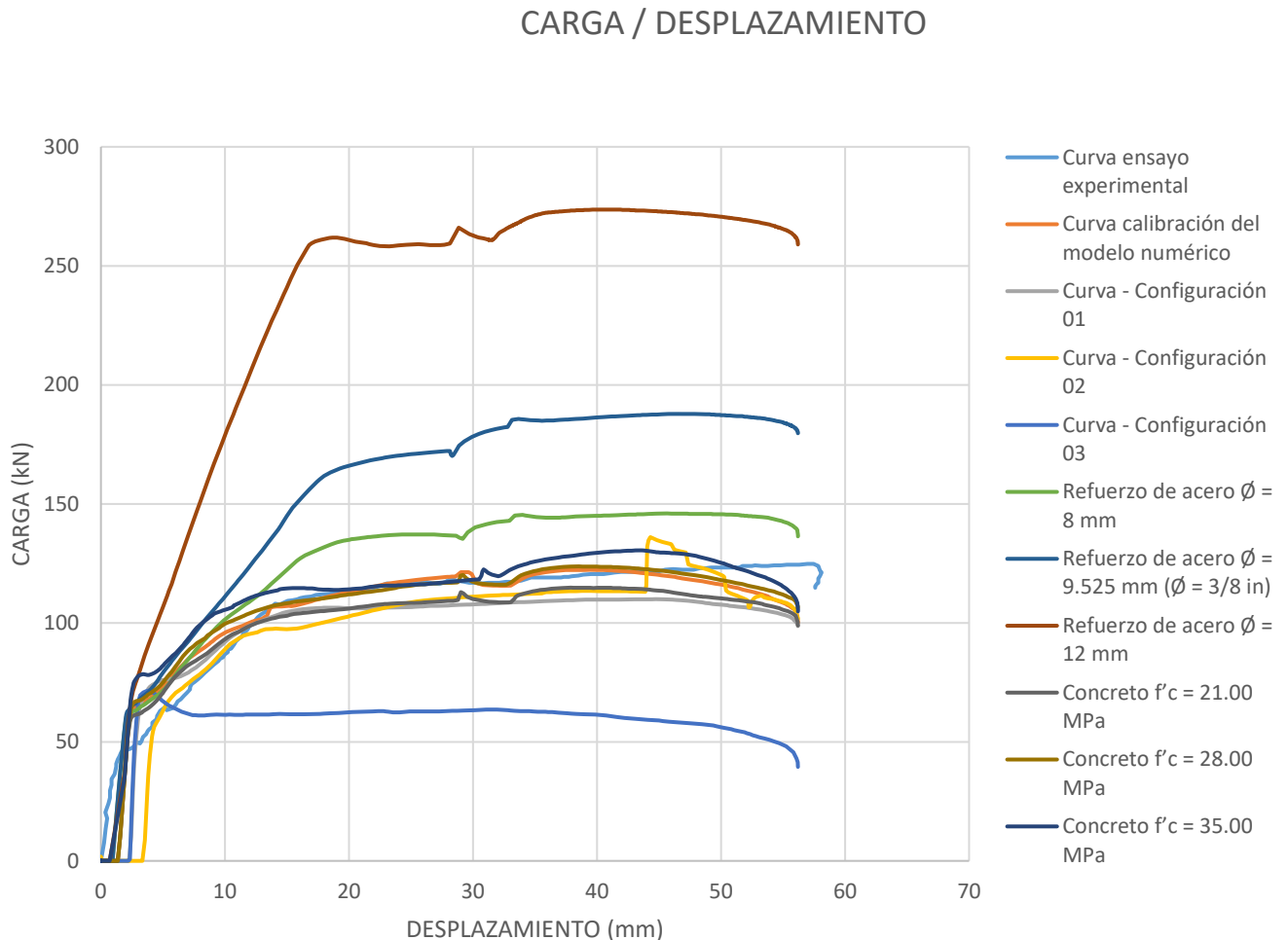
La capacidad de ABAQUS para simular este tipo de estructuras con precisión confirma su utilidad en el diseño moderno, donde se busca eficiencia sin comprometer la seguridad estructural. Además, este tipo de modelos calibrados permite realizar análisis paramétricos que ofrecen al diseñador una base cuantitativa sólida para tomar decisiones estructurales informadas.

Como se observó durante el desarrollo de los resultados se obtuvieron las curvas de carga / desplazamiento en base al modelo numérico calibrado; el cual nos permitió realizar las variaciones planteadas, las cuales nos dieron los resultados de la respuesta estructural que

sirvieron para obtener valores ante los parámetros de Punto de rotura del concreto, Punto de fluencia del refuerzo de acero y Carga última; tal como se muestra en la siguiente figura 140:

**Figura 141**

*Curvas de carga desplazamiento obtenidas de las simulaciones*



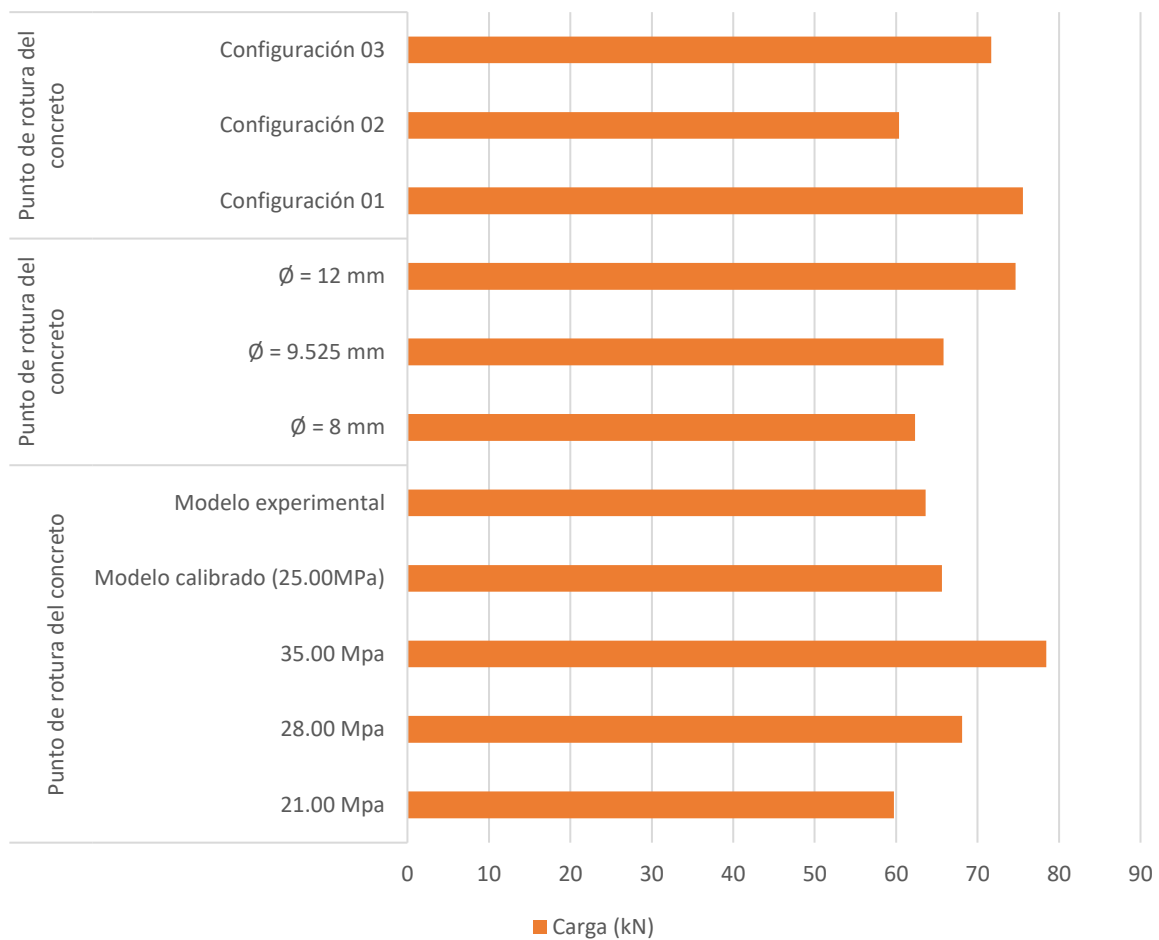
*Nota.* Fuente: El autor.

**Discusión de resultados del objetivo 3:** Determinar la influencia en la respuesta estructural de las variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero en losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos, nos permitió realizar un análisis de sensibilidad en la respuesta estructural y obtener los resultados de las variaciones simuladas en el software ABAQUS para los parámetros de Punto de rotura del concreto, Punto de

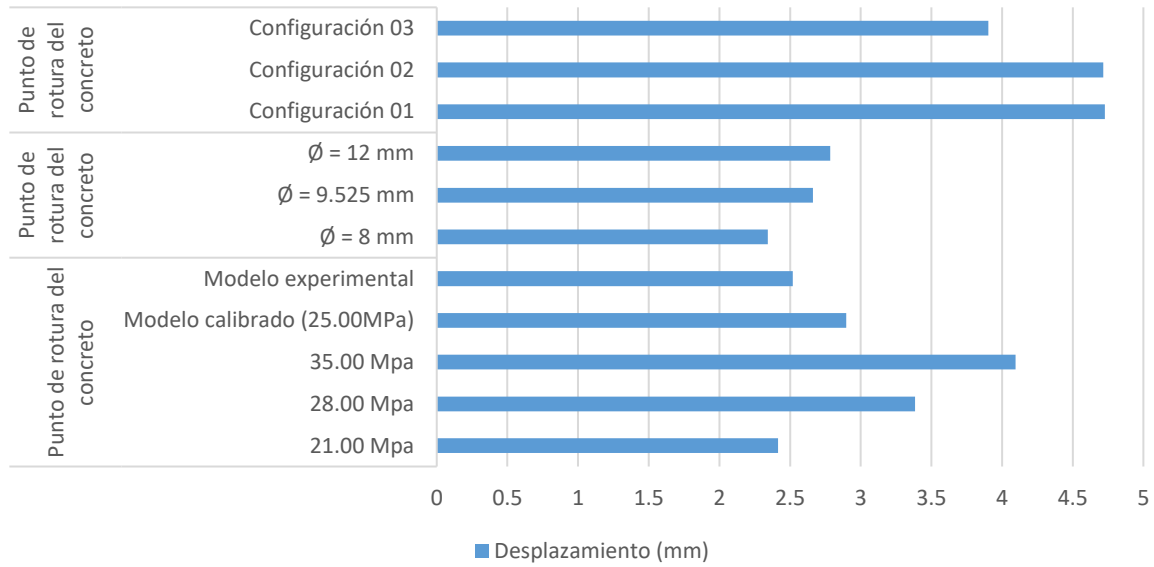
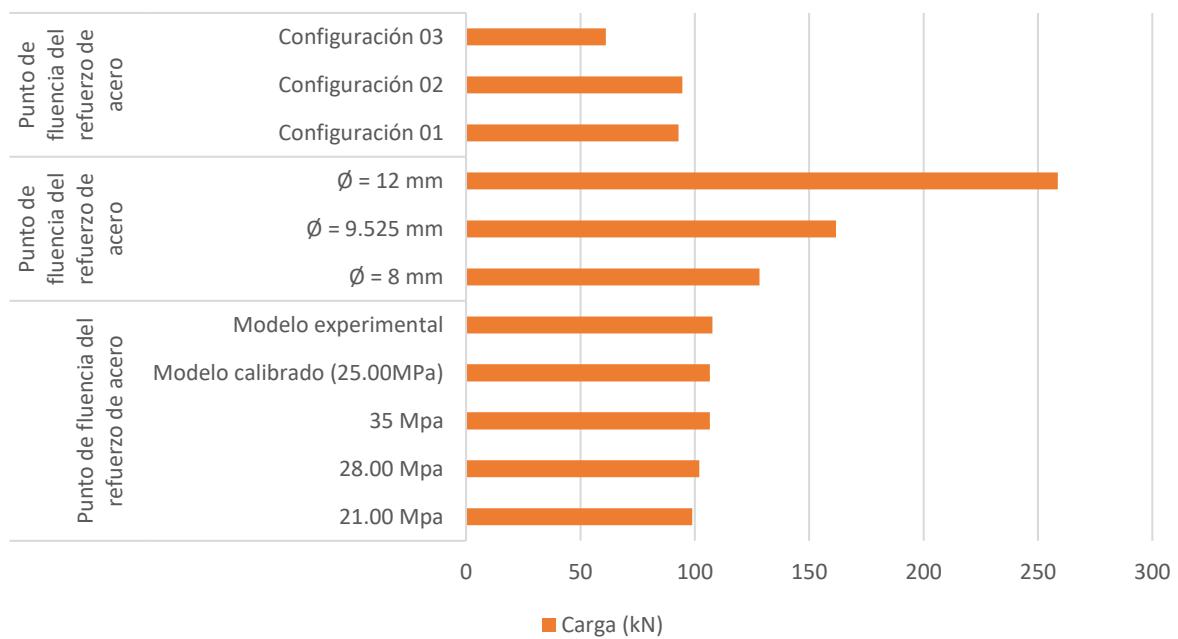
fluencia del refuerzo de acero y Carga última; tal como se muestran en las figuras 141, 142, 143, 144, 145 y 146.

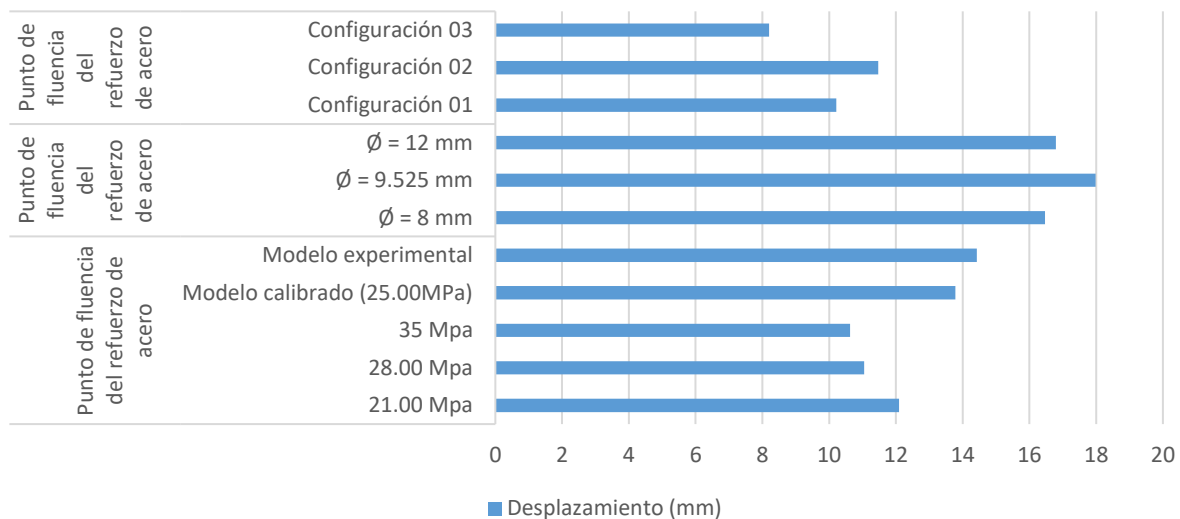
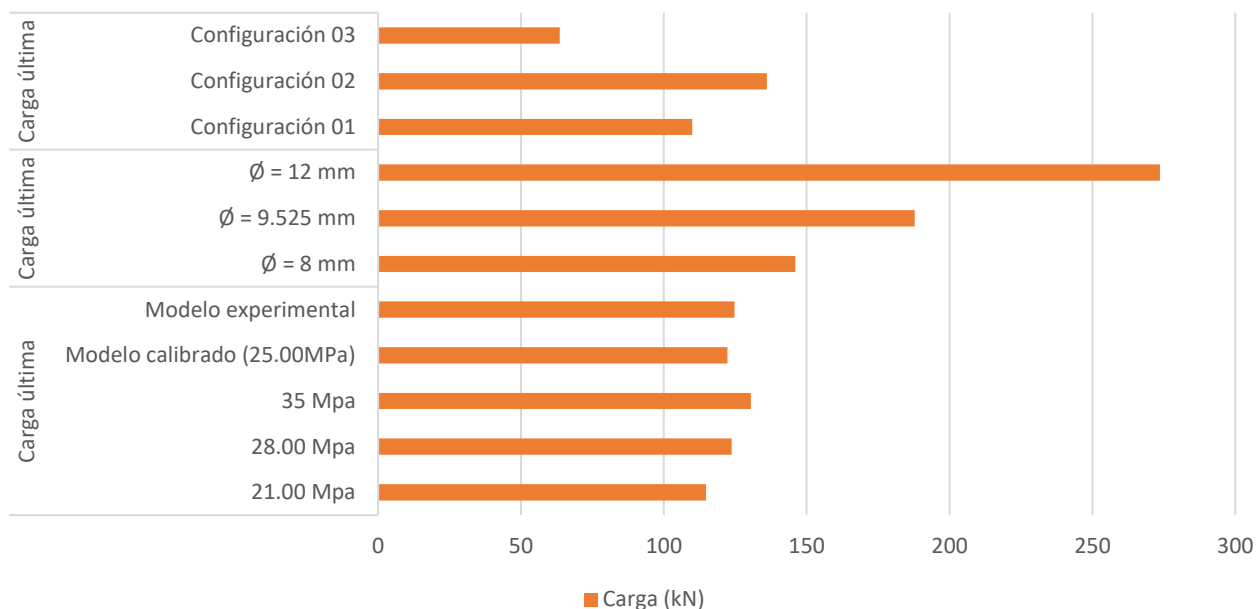
### Figura 142

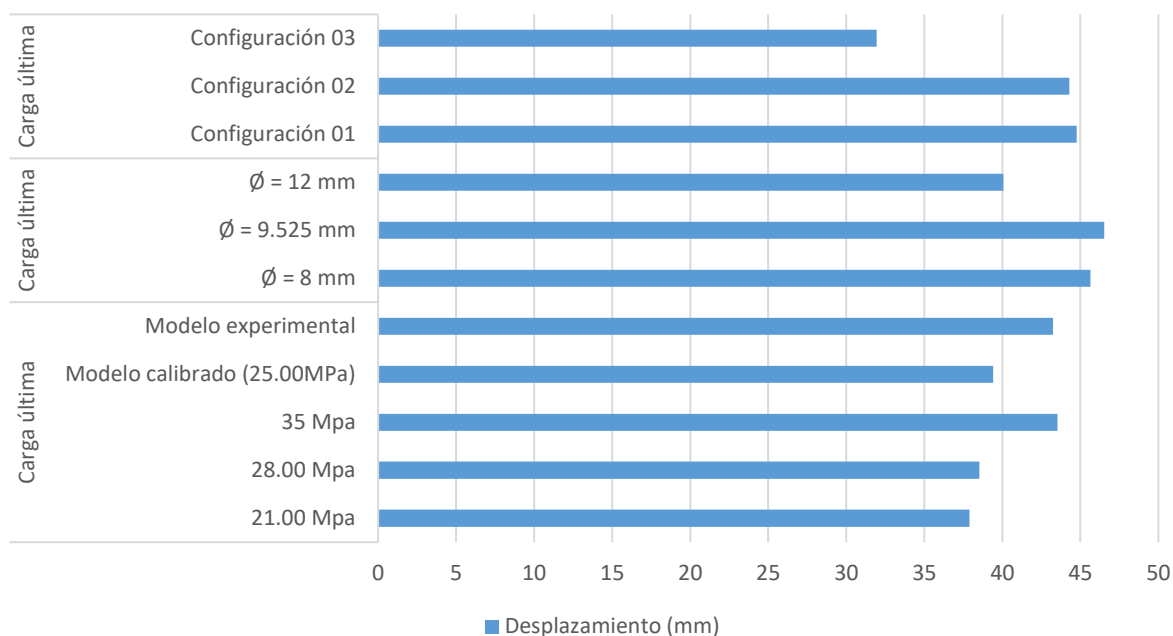
*Resultados / Punto de rotura del concreto – Carga*



*Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 143***Resultados / Punto de rotura del concreto – Desplazamiento**Nota.* Fuente: El autor.**Figura 144***Resultados / Punto de fluencia del refuerzo de acero – Carga**Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 145***Resultados / Punto de fluencia del refuerzo de acero – Desplazamiento**Nota.* Fuente: El autor.**Figura 146***Resultados / Carga última – Carga**Nota.* Fuente: El autor.

**Figura 147***Resultados / Carga última – Desplazamiento*

*Nota.* Fuente: El autor.

Éstos resultados muestran que la respuesta estructural de losas Bubbledeck pueden ser sometidas a un análisis de sensibilidad, mientras se logre calibrar un modelo procedente de un ensayo experimental y que éste cuente con una aproximación cercana. El estudio actual confirma que la capacidad de un modelo numérico para capturar la influencia de variaciones geométricas y estructurales en losas tipo Bubbledeck es fundamental para su validación y posterior aplicación en diseño estructural. La conclusión alcanzada confirma que el método de elementos finitos (FEM), implementado en el software ABAQUS, es efectivo para representar el comportamiento no lineal de elementos de concreto armado aligerado, al identificar con precisión puntos clave como el inicio de fisuración del concreto, la fluencia del acero y la carga última. Este tipo de simulación no solo reproduce fielmente los parámetros estructurales, sino que también permite evaluar con anticipación el efecto de cambios en diseño, lo cual es crucial para la toma de decisiones en ingeniería estructural.

De acuerdo con Lee y Fenves (1998), la precisión en la predicción del comportamiento estructural de elementos de concreto mediante modelos de daño-plasticidad depende en gran medida de la adecuada calibración del modelo con base en datos experimentales y de la correcta implementación de parámetros materiales. Su estudio demostró que FEM es especialmente eficaz para simular la degradación progresiva del concreto y el comportamiento a carga última, validando su uso como herramienta predictiva de alta confiabilidad.

Asimismo, la curva carga–desplazamiento, al ser una representación integral del desempeño estructural, permite evaluar la rigidez inicial, la ductilidad y la resistencia final de las losas, lo que la convierte en un indicador indispensable para estudios comparativos entre distintas configuraciones. De esta manera, el análisis realizado refuerza el valor del FEM no solo como herramienta de validación, sino también como medio para optimizar estructuras en términos de materiales y seguridad estructural.

## **VI. Conclusiones**

### **Conclusión para el objetivo general**

Según el análisis de sensibilidad de la respuesta estructural de las losas Bubbledeck frente a variaciones en la configuración de esferas y refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos, se comprobó que el uso del software ABAQUS ofrece resultados coherentes con los experimentales, mostrando diferencias mínimas durante la calibración del modelo. El método de elementos finitos implementado en ABAQUS utiliza un modelo de plasticidad con daño para el concreto, diseñado principalmente para el análisis de estructuras de concreto armado sometidas a cargas cíclicas y monótonas. Los mecanismos de falla predominantes del concreto incluyen el agrietamiento por tracción y el aplastamiento por compresión, y la teoría aplicada en ABAQUS permite capturar los efectos de daño irreversible asociados a estos procesos en el concreto u otros materiales.

Concluimos que es posible realizar simulaciones numéricas generando variaciones en un modelo numérico calibrado, las cuales nos darán una respuesta estructural aproximada a la real, además que un análisis de sensibilidad en la respuesta estructural de losas Bubbledeck permite identificar la variación de los resultados ante cambios en la configuración de esferas y el refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos, haciendo uso de las curvas de carga – desplazamiento, como instrumento de medición.

### Conclusión para el objetivo 01

De acuerdo a la validación de un modelo numérico a partir de un ensayo experimental que represente la respuesta estructural de losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos, se determinó que es posible generar un modelo numérico tomando como base un ensayo experimental realizado previamente.

Se observó que el desplazamiento en el punto de rotura del concreto del modelo experimental es de 2.52mm a una carga de 63.625 kN y en el modelo calibrado el desplazamiento es de 2.89mm a una carga de 65.609 kN, respecto al punto de fluencia del refuerzo de acero en el modelo experimental surge en el desplazamiento 14.42mm a una carga de 107.74kN mientras que en el modelo calibrado surge en el desplazamiento 13.78mm a una carga de 106.59kN; finalmente para el punto de carga última en el modelo experimental se presenta en el desplazamiento 43.256mm a una carga de 124.78 kN y en el modelo calibrado se presenta en el desplazamiento 39.42 mm a una carga de 122.29kN, se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 21**

*Comparación clave entre modelo experimental y numérico*

Parámetro	Experimental	Modelo Numérico	
	(Desplazamiento/Carga)	Calibrado (Desplazamiento/Carga)	Variación (%)
Punto de rotura del concreto	2.52 mm / 63.63 kN	2.89 mm / 65.61 kN	+14.7 % / +3.1 %
Fluencia del refuerzo de acero	14.42 mm / 107.74 kN	13.78 mm / 106.59 kN	-4.4 % / -1.1 %
Carga última	43.26 mm / 124.78 kN	39.42 mm / 122.29 kN	-8.9 % / -2.0 %

*Nota.* Fuente: El autor.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la comparación entre el modelo experimental y el modelo numérico, se verificó que la simulación mediante el método de elementos finitos reproduce con alta fidelidad la respuesta estructural de las losas tipo Bubbledeck. Las variaciones encontradas en los parámetros clave son las siguientes:

- El punto de rotura del concreto presentó una variación del +14.7 % en desplazamiento y +3.1 % en carga, indicando una leve sobreestimación del modelo numérico respecto al inicio de fisuración del concreto.
- En el punto de fluencia del refuerzo de acero, la diferencia fue de -4.4 % en desplazamiento y -1.1 % en carga, lo cual representa una excelente correlación con el comportamiento plástico observado en el experimento.
- Finalmente, para la carga última, se observó una variación de -8.9 % en desplazamiento y -2.0 % en carga, mostrando que el modelo numérico subestima ligeramente la ductilidad, pero predice de forma precisa la capacidad máxima de carga.

En conjunto, estas variaciones se encuentran dentro de márgenes aceptables de error en simulaciones estructurales, por lo que se concluye que el modelo numérico calibrado es válido y confiable para representar el comportamiento estructural de losas Bubbledeck bajo carga, y puede ser utilizado para análisis predictivos o paramétricos con un alto grado de certeza.

## **Conclusión para el objetivo 2**

De acuerdo a la realización simulaciones numéricas para evaluar la respuesta estructural de losas Bubbledeck ante diferentes configuraciones de esferas y refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos, se determinó que el uso del método de elementos finitos que proporciona el software ABAQUS permite representar con precisión la respuesta estructural de elementos de concreto armado sujetos a cargas, como son las losas Bubbledeck.

Esta precisión en la predicción de la respuesta estructural es crucial para el cálculo y diseño estructural, especialmente donde se requiera minimizar el uso de materiales como son los aligerados en losas sin comprometer la resistencia de la misma y por ende la seguridad.

Se concluye que la realización de simulaciones numéricas permitió evaluar la respuesta estructural de losas Bubbledeck ante diferentes configuraciones de esferas y refuerzo de acero mediante el método de elementos finitos haciendo uso del software ABAQUS.

### **Conclusión para el objetivo 3**

Según la evaluación de la influencia de las variaciones en la configuración de esferas y el refuerzo de acero en las losas Bubbledeck mediante el método de elementos finitos, se observó que las modificaciones aplicadas al modelo numérico calibrado afectan significativamente la respuesta estructural de las losas, utilizando la curva carga-desplazamiento como referencia, la cual proporciona información sobre el punto de rotura del concreto, la fluencia del refuerzo de acero y la carga última.

Se concluye que el método de elementos finitos permite representar con alta precisión la respuesta estructural ante cambios en la configuración de esferas y refuerzo de acero de una losa de concreto armado aligerada con el sistema Bubbledeck, indicando que esta técnica es adecuada para modelar la capacidad de carga de este tipo de losas.

La respuesta estructural frente a los parámetros de rotura del concreto, fluencia del refuerzo y carga máxima constituye un factor clave en el diseño y cálculo estructural, especialmente al considerar la aplicación de este sistema de aligeramiento en futuras edificaciones. La capacidad del método de elementos finitos para capturar de manera confiable esta respuesta demuestra que es una herramienta valiosa en el diseño de losas aligeradas, ya que permite evaluar con mayor precisión la resistencia a deformaciones sin comprometer la estabilidad estructural.

## **VII.Recomendaciones**

### **Recomendación del objetivo general**

Con base en la conclusión obtenida, se recomienda continuar utilizando el método de elementos finitos con el software ABAQUS para realizar simulaciones en el análisis de la respuesta estructural de las losas Bubbledeck, dado que este enfoque ha mostrado ser coherente con los resultados experimentales y permite obtener respuestas estructurales precisas con mínimas discrepancias. Además, es recomendable llevar a cabo análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de las variaciones en la configuración de las esferas y el refuerzo de acero, ya que estos análisis facilitan la identificación de cómo dichos cambios afectan el comportamiento estructural. La implementación de curvas de carga-desplazamiento como herramienta de medición es crucial para obtener una evaluación precisa y confiable del rendimiento de las losas en condiciones de carga cíclica y monótona.

Se sugiere que futuros investigadores profundicen en el uso del método de elementos finitos en el análisis de estructuras similares, con el objetivo de ampliar el conocimiento sobre su aplicación y validar los modelos numéricos en una mayor variedad de condiciones. Además, sería beneficioso realizar ensayos experimentales adicionales que complementen los estudios numéricos, permitiendo una comparación más exhaustiva entre los resultados obtenidos mediante simulación y los comportamientos observados en pruebas físicas, lo que enriquecería aún más la precisión y confiabilidad de las simulaciones y fortalecería la base para el diseño de estructuras más eficientes y seguras.

### **Recomendación del objetivo específico 01**

Con base en la conclusión obtenida, se recomienda que futuros investigadores enfoquen sus estudios en la calibración de modelos numéricos a partir de ensayos experimentales, especialmente en el análisis de estructuras como las losas Bubbledeck. La validación de un modelo numérico con datos experimentales ha demostrado ser una herramienta eficaz para

representar de manera precisa la respuesta estructural, tal como se evidenció en la comparación de las curvas de carga-desplazamiento entre los modelos experimentales y calibrados. Este enfoque no solo mejora la fiabilidad de las simulaciones, sino que también permite ajustar los modelos a las realidades físicas observadas, lo cual resulta esencial para predecir el comportamiento estructural bajo diversas condiciones de carga.

Se incentiva a los futuros investigadores a realizar estudios que combinen la simulación numérica con ensayos experimentales, con el fin de afinar y validar modelos más precisos. Esto no solo fortalecerá los métodos de predicción en el diseño estructural, sino que también proporcionará una base sólida para mejorar la seguridad y eficiencia de las estructuras en la práctica. Además, la calibración de estos modelos permitirá una mejor comprensión del comportamiento de materiales y sistemas constructivos en condiciones reales, lo que puede llevar al desarrollo de diseños más optimizados y sostenibles.

### **Recomendación del objetivo específico 02**

Con base en la conclusión obtenida, se recomienda a los estudiantes que se interesen en el campo del análisis estructural que busquen capacitarse en el uso de software especializado en el método de elementos finitos, como ABAQUS u otros programas similares. El dominio de estas herramientas es fundamental, ya que permite realizar simulaciones numéricas precisas para evaluar la respuesta estructural de diversas configuraciones de elementos, como las losas Bubbledeck, optimizando el diseño y reduciendo el uso de materiales sin comprometer la seguridad estructural. La capacidad de predecir con precisión el comportamiento de las estructuras bajo diferentes condiciones de carga es esencial para desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles en la ingeniería civil. Invertir en esta capacitación brindará a los estudiantes una ventaja competitiva en el ámbito profesional, ya que podrán realizar análisis avanzados que contribuyan a un diseño estructural más seguro y económico.

### **Recomendación para el objetivo específico 03**

Con base en la conclusión obtenida, se recomienda que los investigadores complementen los estudios realizados mediante el método de elementos finitos con ensayos experimentales en laboratorio bajo condiciones controladas. Si bien el método de elementos finitos ha demostrado ser una herramienta precisa para representar la respuesta estructural de las losas Bubbledeck ante variaciones en la configuración de esferas y el refuerzo de acero, los ensayos experimentales permiten validar y ajustar los modelos numéricos, asegurando que los resultados obtenidos sean aún más representativos del comportamiento real de las estructuras. La combinación de ambos enfoques no solo mejora la precisión de las simulaciones, sino que también proporciona una comprensión más profunda de cómo los factores de diseño, como la carga última, la fluencia del refuerzo y el punto de rotura del concreto, influyen en la integridad estructural de las losas aligeradas. Además, los ensayos en laboratorio pueden revelar detalles adicionales que no siempre son capturados por los modelos numéricos, brindando una base más sólida para el diseño y la implementación de estas estructuras en futuras construcciones. Por lo tanto, se alienta a los investigadores a integrar estos dos métodos para enriquecer y fortalecer los resultados de sus estudios, contribuyendo a un diseño estructural más seguro y eficiente.

### VIII. Referencias bibliográficas

- ACI. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)*. American Concrete Institute.
- AIE, (2021). *Informe de estado global sobre los Edificios y la Construcción 2021*. United Nations Environment Programme.
- Amaya Astudillo, T. E., & Galindo Bacuilima, B. J. (2015). *Análisis del comportamiento y aplicación de losas bubbledeck*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca] Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca.  
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23114>
- Arias Galicia, F. (2012). *El proyecto de Investigación, Introducción a la metodología científica*. Episteme.
- ASTM C78/C78M-22. (2022). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Thrid-Point Loading)*.
- Banco Mundial. (2018). *Estudio de la urbanización en Centroamérica*.
- Bendezú Escobedo, J. A. (2017). *El prefabricado de concreto como una solución integral*. ASOCEM
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación, Administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Pearson.
- Blas Cadillo, B. N., & Luna Muñoz, C. D. (2023). *Propuesta de diseño de losas aligeradas en edificaciones con esferas de prenova en la ciudad de Huaraz, Perú, 2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo  
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/120088>

- Cámara Peruana de la Construcción (2021). *Informe Económico de la Construcción*. CAPECO.
- Cao, V. V. (2013). *A model for damage analysis of concrete*. Asian Journal of Civil Engineering.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (5th ed.)*. Pearson Education.
- Collado, C. F.-S. (2020). *Metodología de la investigación (6.ª ed.)*. McGraw-Hill Education.
- Cook, R. D. ((2002)). *Concepts and applications of finite element analysis (4th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Devore, J. L. (2021). *Probability and statistics for engineering and the sciences (10th ed.)*. Cengage Learning.
- Dirven , B. B., Pérez, R., Cáceres, R. J., Tito, A. T., Gómez , R. K., & Ticona, A. (2018). *El desarrollo rural establecido en las áreas Vulnerables*. Colección Racso.
- Gutiérrez, J. A. (2015). *Tecnología del concreto: fundamentos y aplicaciones*. .
- Harmsen, T. E. (2017). *Diseño de estructuras de concreto Armado*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Hegger, J. K. (2006). *Punching behavior of flat slabs with voids*. Structural Concrete.
- Henrique de Oliveira, T. (2020). *Lajes bubbledeck: um comparativo com o sistema construtivo de lajes maciças*. Revista IMED Ingeniería Civil.
- Hernández-Sampieri, R. &. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- Hernández-Sampieri, R. F.-C.-L. (2014). *Metodología de la investigación (6.ª ed.)*. McGraw-Hill Education.
- Hibbeler, R. C. (2016). *Analisis Estructural*. Pearson.
- Hyndman, R. J. (2018). *Forecasting: Principles and practice*. OTexts.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2020). *Encuesta Nacional de Hogares*. Obtenido de Encuesta Nacional de Hogares
- Lee, J. (1998). *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. Journal of Engineering Mechanics.
- Levin, R. I., & Rubin, D. S. (2004). *Estadística para la Administración y Economía*. Pearson Educación .
- López, A., García, B., & Martínez, C. (2018). *Innovaciones en sistemas constructivos: Distribución de esferas BubbleDeck para la construcción sostenible*. Revista de Ingeniería Sostenible
- Luna Castilla, P. E. (2019). *Diseño estructural de un edificio de concreto armado multifamiliar de seis pisos sin sótanos*. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/14742>
- MacGregor, J. G. (2019). *Reinforced concrete: Mechanics and design*. Pearson Education.
- Madandoust, R. K. (2017). *Analytical study on tensile strength of concrete*. International Journal of Concrete Research.
- Maekawa, K. P. (2003). *Non-linear mechanics of reinforced concrete*. Spon Press.
- Mahalakshmi, S., & Nanthini, S. (2017). *Bubble Deck*. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, V(3).
- Mahdi, A. S., & Mohammed, S. D. (2021). *Experimental and Numerical Analysis of Bubbles Distribution Influence in BubbleDeck Slab under Harmonic Load Effect*. Department of Civil Engineering University of Baghdad, Baghdad.

- Mazzotti, C. S. (2008). *A damage model for concrete under multiaxial cyclic loading*. *International Journal of Solids and Structures*. International Journal of Solids and Structures.
- Mazzotti, C. S. (2020). *Numerical modeling of concrete behavior using damage plasticity model in ABAQUS*. *Journal of Structural Engineering*.
- McCormac, J. C. (2015). *Introducción a la ingeniería estructural (8a ed.)*.
- Meza Vásquez, C., & Martell Leon Prieto, D. (2019). *Evaluación técnica y económica entre los sistemas prefabricados de losa con viguetas Vigacero y losas con viguetas pretensadas en un edificio multifamiliar en el distrito de Surquillo* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional de la Universidad Ricardo Palma.  
<https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/e4f5c73e-27c0-4396-9c8e-c9652a285f2a>
- Milad. (2017). *Investigating Behaviour of Reinforced Concrete with Glass Fibre*.
- Ministerio de Salud, MINAE, & PNUD. (2017). *Estrategia nacional para sustituir el plásticos de un solo uso por alternativas renovables y compostables*.
- Mohamed , H., Martel, C., Huayta, F., Rojas, R., & Arias, J. (2023). *Metodología de la investigación: Guía para el proyecto de tesis*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C.
- Montgomery, D. C. (2018). *Applied statistics and probability for engineers (7th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Morales Morales, R. (2013). *Diseño en Concreto Armado*. Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete (5th ed.)*. Pearson Education.
- Nilson, A. H. (2018). *Design of concrete structures*. McGraw-Hill Education.

- Ñaupas, H. V. (2021). *Metodología de la investigación científica (6.ª ed.)*. Ediciones de la U.
- Park, R. & Paulay. (1975). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons.
- Parker G., C. (2001). *Etica democracia y desarrollo*.
- Pérez de Cuellar, J. (2012). *Una nueva ética global*. Nuestra diversidad creativa.
- Pimentel Dialaman, J., Miranda, L. R., & Florian, F. (2021). *Bubbledeck: inovação, sustentabilidade e custo-benefícios no sistema construtivo de lajes bubbledeck*.  
RECIMA21 - Revista científica multidisciplinar.
- PlasticsEurope. (2020). *Plastics – the facts 2020*.
- Quarteroni, A. (2010). *Computacion Cientifica con MATLAB y Octave*. Dipartimento di Matematica Politecnico di Milano.
- Quino Quispe, W. P. (2019). *Optimización de concreto en losas aligeradas en construcción de viviendas, con la incorporación de vacíos esféricos y aplicación del sistema BubbleDeck*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.  
<https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3574>
- Reglamento Nacional de Edificaciones (Norma E-020). (2020). *Cargas*. Lima: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción – SENCICO.
- Reyes Guajardo, J. (2022). *Estudio comparativo respecto al análisis y diseño, entre una losa maciza de hormigón armado y una aligerada con esferas de polietileno de alta densidad*. [Tesis de pregrado, Universidad de Santiago de Chile]. Repositorio Institucional de la Universidad de Santiago de Chile.  
<https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/50369>
- Rueda Ruffrán, Y. S., & Jimenez Choquecota, J. M. (2021). *Análisis y diseño estructural comparativo de una edificación de concreto armado de cuatro pisos utilizando losas*

- BubbleDeck y losa aligerada en la ciudad de Tacna, 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio Institucional de la Universidad Privada de Tacna.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12969/2073>
- Sagadevan, R. (2020). *Studies on Structural Behaviour of Biaxial Voided Slab under Flexure and Punching Shear*. Indian institute of technology Madras, Madras.
- Saltelli, A. T. (2004). *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*.
- Sánchez, R. (2018). *Análisis estructural: principios y aplicaciones*.
- Segura Garcia, A. K. (2017). *(BDM®) para edificaciones*.
- Serrano, A. (2020). *Avances en la tecnología de materiales para la construcción*. Revista de Ingeniería Civil.
- Simulia, D. (2009). *Abaqus 6.9 documentation [Manual del software]*. Dassault Systèmes.
- Smith, J. (2019). *Design and analysis of lightweight slab systems*. Engineering Press.
- Solorzano Leon, W. G. (2022). *Diseño de estructuras de hormigón armado sin vigas, aliviadas por el sistema BubbleDeck en una vivienda de cuatro pisos, Huaraz, 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad Cesar Vallejo.  
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/96531>
- Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica Incluye Evaluación y administración de proyectos de investigación*. Limusasa
- Tovar, G. L. (1986). *El asentamiento y la segregación de los Blancos y Mestizos*. Cengage.
- Triviño Macías, B. F. (2019). *Edificio de servicios académicos UCSG*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/14025>

Wu, Y. F. (2018). *Finite element modeling of reinforced concrete structures: accuracy and reliability*. Engineering Structures.

Zienkiewicz, O. C. (2005). *The finite element method: Its basis and fundamentals (6th ed.)*. Elsevier Butterworth-Heinemann.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier Butterworth-Heinemann.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional de la Biblioteca central de la Universidad Tecnológica de los Andes.