

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CONECTORES TIPO
CANAL EN SISTEMAS DE ENTREPISO CON STEELDECK Y VIGUETAS EN
CELOSÍA POR MEDIO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL POR
ELEMENTOS FINITOS.

Trabajo Final de Maestría presentado por:
Jenny Paola Navarrete Chaparro

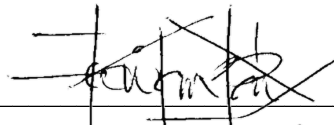
Dirigido por:
Fabián Augusto Lamus Báez, Ph.D.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Énfasis en Ingeniería Estructural

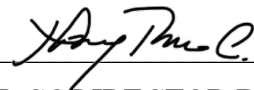
Bogotá D.C.
Diciembre, 20

NOTA DE ACEPTACIÓN



FIRMA DEL DIRECTOR DE TESIS

Ing. Fabián Augusto Lamus Báez, PhD.



FIRMA DEL CODIRECTOR DE TESIS

Ing. Nancy Torres Castellanos, PhD.



FIRMA DEL JURADO

Ing. Xavier Fernando Hurtado Amézquita, MSc.



FIRMA DEL JURADO

Ing. Luis Garza Vásquez, MSc.

Bogotá D.C., 10 de diciembre de 2023

Resumen

El presente trabajo de investigación se enfocó en la evaluación del comportamiento mecánico de los conectores de cortante tipo canal en un sistema de entrepiso compuesto con lámina steeldeck y viguetas en celosía, mediante la simulación numérica del ensayo de corte directo utilizando el método de los elementos finitos. Esta investigación pretende ofrecer una solución ágil y eficaz para evaluar la resistencia máxima de los conectores. Se busca la posibilidad de simplificar los programas experimentales tanto en investigaciones futuras similares como en proyectos constructivos. Adicionalmente, se presenta una descripción detallada del procedimiento para realizar la simulación numérica de estos entrepisos mediante el uso de herramientas computacionales. Adicional, se exponen diversas opciones de análisis que pueden abordarse en este proceso.

Para la simulación numérica se utilizó el software de análisis estructural Ansys Workbench. Las variables consideradas incluyeron la geometría del conector, el espesor de la losa de concreto y las propiedades mecánicas de los materiales. Para los modelos constitutivos de los materiales se empleó el modelo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal para el acero, que permitió representar con precisión el comportamiento no lineal y la capacidad de deformación. En cuanto al concreto, se utilizó el modelo de Menetrey Willam, que tuvo en cuenta la disminución de resistencia debido al inicio de la fisuración del concreto.

En una primera fase, se desarrolló un modelo determinista que consistió en la simulación numérica de ocho series de probetas que se ensayaron a corte directo. La validación de este modelo numérico se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados obtenidos con los datos experimentales correspondientes y las fórmulas propuestas. Posteriormente se formuló un modelo estocástico, donde se simularon treinta probetas y se realizó un análisis estadístico de los resultados, lo que permitió obtener un intervalo de confianza para la capacidad de los conectores. Los resultados fueron satisfactorios para ambos modelos numéricos formulados.

Finalmente, se realizaron ejemplos de aplicación para estimar el valor esperado de la resistencia máxima de los conectores de cortante en nuevas configuraciones del sistema compuesto de entrepiso. En estos ejemplos se variaron los valores de la resistencia a compresión del concreto, la resistencia a tensión del perfil tipo canal, la altura de la losa y la longitud del conector. El propósito fue predecir la influencia de estas variables en la respuesta del sistema y validar el modelo numérico.

Palabras clave: ensayo de corte directo, simulación numérica, sección compuesta, conector de cortante canal, método de los elementos finitos.

Abstract

The present research focused on the study of the mechanical behavior of channel type shear connectors in a composite floor system with steel deck and lattice girders, through numerical simulation of the direct shear test using the finite element method. The structural analysis software Ansys Workbench was employed for the numerical simulation. The considered variables included the connector geometry, the thickness of the concrete slab, and the mechanical properties of the materials. The Multilinear Isotropic Hardening model was used for steel as the constitutive model, accurately representing nonlinear behavior and deformation capacity. For concrete, the Menetrey Willam model was utilized, taking into account the decrease in strength due to the initiation of concrete cracking.

In the first phase, a deterministic model was developed involving the numerical simulation of eight series of specimens subjected to direct shear testing. Validation of this numerical model was carried out by comparing the results with corresponding experimental data and proposed formulas. Subsequently, a stochastic model was formulated, simulating thirty specimens, and a statistical analysis of the results was performed, allowing the derivation of a confidence interval for the mechanical response of the system. The results were satisfactory for both formulated numerical models.

Finally, application examples were conducted to estimate the expected value of the maximum resistance of shear connectors in new configurations of the composite floor system. In these examples, the values of concrete compression strength, channel-type profile tensile strength, slab height, and connector length were varied. The purpose was to predict the influence of these variables on the system's response and validate the numerical model.

Keywords: direct shear test, numerical simulation, composite section, channel-type shear connector, finite element method.

Índice

1.	Capítulo 1 Introducción	15
1.1.	Marco Teórico.....	17
1.1.1.	Sección Compuesta	17
1.1.2.	Conectores de Cortante	18
1.1.3.	Ensayo Push-Out	19
1.1.4.	Modelos Constitutivos de los Materiales	20
1.1.5.	Tipo de Elementos	31
1.1.6.	Tipos de Contactos	33
1.2.	Antecedentes.....	34
1.2.1.	Investigaciones Nacionales	34
1.2.2.	Investigaciones Internacionales.....	45
1.3.	Objetivos.....	50
1.3.1.	Objetivo General	50
1.3.2.	Objetivos Específicos	50
2.	Capítulo 2 Modelo Determinista.....	51
2.1.	Recopilación de Datos Experimentales	52
2.2.	Modelos Constitutivos de los Materiales.....	53
2.2.1.	Concreto	53
2.2.2.	Acero	56
2.3.	Construcción de los Modelos de Calibración	57
2.3.1.	Modelo de Calibración No. 1	57
2.3.2.	Modelo de Calibración No. 2	62
2.3.3.	Modelo de Calibración No. 3	65
2.4.	Preproceso.....	67

2.4.1.	Asignación de los materiales.....	67
2.4.2.	Discretización de la geometría	71
2.4.3.	Modelos para las Interfaces.....	75
2.4.4.	Generación del Mallado	77
2.4.5.	Condiciones de Frontera.....	80
2.5.	Postproceso	82
2.5.1.	Serie 1	82
2.5.2.	Serie 2.....	89
2.5.3.	Serie 3.....	92
2.5.4.	Serie 4.....	95
2.5.5.	Serie 5.....	98
2.5.6.	Serie 6.....	101
2.5.7.	Serie 7.....	104
2.5.8.	Serie 8.....	107
2.6.	Análisis de Resultados.....	110
2.6.1.	Reporte de Resultados.....	110
2.6.2.	Modos de Falla	113
3.	Capítulo 3 Modelo Estocástico	117
2.7.	Selección de las Variables Estocásticas	117
2.8.	Distribuciones de Probabilidad.....	118
2.8.1.	Distribución para la Resistencia a la Compresión del Concreto	119
2.8.2.	Distribución para la Resistencia a la Tensión de los Conectores	121
2.9.	Reglas de Simulación Estocástica	123
2.10.	Preproceso.....	125
2.10.1.	Geometría y Datos de Entrada.....	125
2.11.	Postproceso.....	126
2.12.	Análisis de Resultados.....	126
4.	Capítulo 4 Ejemplos de Aplicación.....	129
2.13.	Ejemplo de Aplicación No. 1	130
2.14.	Ejemplo de Aplicación No. 2.....	134
2.15.	Ejemplo de Aplicación No. 3.....	135
2.16.	Ejemplo de Aplicación No. 4.....	136

5.	Conclusiones	140
6.	Bibliografía	143

Lista de Figuras

Figura 1.	Sección Compuesta	17
Figura 2.	Sección Compuesta con Tablero de Acero Preformado. Fuente: (McCormac, 2012).	18
Figura 3.	Conectores de Cortante Tipo Canal.....	18
Figura 4.	Espécimen Típico del Ensayo a Corte Directo. Fuente: (Prakash, 2012).	19
Figura 5.	Curva Esfuerzo vs. Deformación para un Material Elastoplástico.....	20
Figura 6.	Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Bilineal del Concreto.	21
Figura 7.	Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal del Concreto.....	22
Figura 8.	Superficie Compuesta con Compresión Drucker-Prager y Superficies de Fluencia por Tensión Drucker-Prager.	23
Figura 9.	Ablandamiento Lineal en Compresión y Tracción.....	23
Figura 10.	Superficie de Fluencia para el Modelo Menetrey-Willam.	26
Figura 11.	Ablandamiento Lineal en Compresión y Tracción.....	28
Figura 12.	Discretización de Esferas por 42 Microplanos.....	30
Figura 13.	Elementos Finitos en Ansys Workbench.....	31
Figura 14.	Elemento Finito Tipo Hexaedro.	32
Figura 15.	Elemento Finito Tipo Tetraedro.	33
Figura 16.	Malla de la Losa de Concreto. Fuente: (Rodríguez L. J., 2020).....	37
Figura 17.	Malla del Conector de Cortante. Fuente: (Rodríguez L. J., 2020).	37
Figura 18.	Curva Esfuerzo vs. Deformación MELAS.....	39
Figura 19.	Curva Esfuerzo vs. Deformación Elasto Plástica.....	39

Figura 20. Mallado del Sistema Compuesto con Conectores Tipo Tornillo.....	40
Figura 21. Superficie de Falla de acuerdo con el criterio William y Warnke.	41
Figura 22. Mallado del Sistema Compuesto con Conectores Tipo Canal.	42
Figura 23. Mallado del Sistema Compuesto con Conectores Tipo Tornillo.....	44
Figura 24. Especímenes de estudio: (a) Conector Ángulo, (b) Conector Canal, (c) Conector T-PBL.....	45
Figura 25. Modelo de Carga Monótona.....	46
Figura 26. Modelo de Carga Repetida.	46
Figura 27. Discretización de los especímenes: (a) Vigueta y Concreto (a) Conector Ángulo, (b) Conector Canal, (c) Conector T-PBL.....	47
Figura 28. Conectores de Cortante usados en la Investigación de (Tahmasbi, 2016).	48
Figura 29. Modelo en Elementos Finitos de la Investigación de (Tahmasbi, 2016).	48
Figura 30. Conectores de Cortante usados en la Investigación de (Anju & Smitha, 2016).	49
Figura 31. Modelo de Elementos Finitos usado en la Investigación de (Anju & Smitha, 2016).	49
.....	
Figura 32. Probeta Tipo para simular el Ensayo de Corte Directo.	51
Figura 33. Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Bilineal del Concreto.....	53
Figura 34. Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal del Concreto.....	54
Figura 35. Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Bilineal del Acero.....	56
Figura 36. Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal del Acero.	56
Figura 37. Geometría y Mallado del Modelo de Calibración No. 1.	58
Figura 38. Modelo de Carga Calibración No. 1.....	58
Figura 39. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - HEXA – EIB.	59
Figura 40. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - HEXA – EIM.	59
Figura 41. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - TETRA – EIB.	60
Figura 42. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - TETRA – EIM.	60
Figura 43. Curva comparativa - Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Calibración No. 1. ...	61
Figura 44. Geometría y Mallado del Modelo de Calibración No. 2.	63
Figura 45. Geometría y Mallado del Modelo de Calibración No. 2.	63

Figura 46. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) Calibración No. 2.	64
Figura 47. Geometría y Mallado del Modelo de Calibración No. 3.	66
Figura 48. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Calibración No. 3.	66
Figura 49. Modelo del Conector Tipo Canal.	68
Figura 50. Curva Esfuerzo vs. Deformación para simular el Conector Tipo Canal de 3”.....	68
Figura 51. Curva Esfuerzo vs. Deformación para simular el Conector Tipo Canal de 4”.....	68
Figura 52. Modelo de la Vigueta en Celosía.....	69
Figura 53. Curva Esfuerzo vs. Deformación para simular la Vigueta en Celosía.	69
Figura 54. Modelo de la Losa en Concreto.	69
Figura 55. Definición del Modelo Constitutivo de Menetrey Willam.....	70
Figura 56. Ablandamiento Lineal en Compresión y Tracción para el Modelo de Menetrey Willam.....	70
Figura 57. Malla con Elementos tipo Hexaedros para el Conector de Cortante Tipo Canal.	71
Figura 58. Calidad de los Elementos tipo Hexaedros en el Conector de Cortante Tipo Canal.	72
Figura 59. Malla con Elementos tipo Tetraedros para el Conector de Cortante Tipo Canal.	72
Figura 60. Calidad de los Elementos tipo Tetraedros en el Conector de Cortante Tipo Canal.	72
Figura 61. Malla con Elementos tipo Tetraedros para la Vigueta en Celosía.....	73
Figura 62. Calidad de los Elementos tipo Tetraedros en la Vigueta en Celosía.	73
Figura 63. Malla con Elementos tipo Hexaedros para la Vigueta en Celosía.....	73
Figura 64. Calidad de los Elementos tipo Hexaedros en la Vigueta en Celosía.	74
Figura 65. Malla con Elementos tipo Tetraedros para la Losa de Concreto.	74
Figura 66. Calidad de los Elementos tipo Tetraedros en la Losa de Concreto.	74
Figura 67. Interfaz entre la Losa de Concreto y el Conector tipo Canal.	75
Figura 68. Interfaz entre la Losa de Concreto y la Vigueta en Celosía.	75
Figura 69. Interfaz entre el Conector tipo Canal y la Vigueta en Celosía.	76
Figura 70. Contacto tipo Adherido.	76
Figura 71. Malla Conector- Vigueta.	77
Figura 72. Malla Conectores de Cortante.	77
Figura 73. Malla Losa Vista Inferior.	78
Figura 74. Malla Losa Vista Superior.....	78
Figura 75. Calidad de Malla de los Conectores y Viguetas.....	79
Figura 76. Calidad de la Malla de la Losa Vista Inferior.....	79
Figura 77. Calidad de la Malla de la Losa Vista Superior.....	80

Figura 78. Modelo de Aplicación de la Carga.....	81
Figura 79. Condición de Apoyo de la Probeta.....	81
Figura 80. Geometría de la Serie 1.	83
Figura 81. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1.	83
Figura 82. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1(2). .	83
Figura 83. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 1.....	84
Figura 84. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto Vista Inferior en la Serie 1.	84
Figura 85. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto Vista Superior en la Serie 1.....	84
Figura 86. Esfuerzo Equivalente Interacción con Conectores de Cortante en la Serie 1.....	85
Figura 87. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1.....	85
Figura 88. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1 (2).	85
Figura 89. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1 (3).	86
Figura 90. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 1.....	86
Figura 91. Deformación Total Interacción con Conectores de Cortante en la Serie 1.	86
Figura 92. Deformación Total en la Probeta de la Serie 1.....	87
Figura 93. Deformación Total en la Probeta Vista Superior de la Serie 1.....	87
Figura 94. Deformación Total en la Probeta Vista Inferior de la Serie 1.	87
Figura 95. Curva Carga (kN) vs. Desplazamientos (mm) Para los dos Conectores – Serie 1 (Ansys).	88
Figura 96. Curva Carga (kN) vs. Desplazamientos (mm) Para un Conector – Serie 1.	88
Figura 97. Geometría de la Serie 2.	89
Figura 98. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 2.	90
Figura 99. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 2.....	90
Figura 100. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 2.....	90
Figura 101. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 2.....	91
Figura 102. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 2.....	91
Figura 103. Geometría de la Serie 3.	92
Figura 104. Esfuerzo Equivalente en la Losa en la Serie 3.	93
Figura 105. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 3.....	93
Figura 106. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 3.....	93
Figura 107. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 3.....	94
Figura 108. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 3.....	94
Figura 109. Geometría de la Serie 4.	95

Figura 110. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 4.	96
Figura 111. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 4.	96
Figura 112. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 4.	96
Figura 113. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 4.	97
Figura 114. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 4.	97
Figura 115. Geometría de la Serie 5.	98
Figura 116. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 5.	99
Figura 117. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 5.	99
Figura 118. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 5.	99
Figura 119. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 5.	100
Figura 120. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 5.	100
Figura 121. Geometría de la Serie 6.	101
Figura 122. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 6. ...	102
Figura 123. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 6.	102
Figura 124. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 6.	102
Figura 125. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 6.	103
Figura 126. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 6.	103
Figura 127. Geometría de la Serie 7.	104
Figura 128. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 7. ...	105
Figura 129. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 7.	105
Figura 130. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 7.	105
Figura 131. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 7.	106
Figura 132. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 7.	106
Figura 133. Geometría de la Serie 8.	107
Figura 134. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 8. ...	108
Figura 135. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 8.	108
Figura 136. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 8.	108
Figura 137. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 8.	109
Figura 138. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 8.	109
Figura 139. Gráfica Comparativa Resultados Modelo Determinista.	110
Figura 140. Plastificación del Conector – MEF Menetrey Willam.	113
Figura 141. Plastificación del Conector – Experimental (Rodríguez R.M.,2019).	113

Figura 142. Esfuerzos Equivalentes en la Losa de Concreto Reforzado– MEF Menetrey Willam.	114
.....	
Figura 143. Fisuración de la Losa de Concreto Reforzado – (Rodríguez R.M.,2019).	114
Figura 144. Fisuración de la Losa de Concreto Reforzado (2) – (Rodríguez R.M.,2019).	115
Figura 145. Esfuerzos Equivalentes en la Losa de Concreto – MEF Menetrey Willam.	116
Figura 146. Cizallamiento de la Losa de Concreto – Experimental (Rodríguez R.M.,2019)...	116
Figura 147. Distribución Gaussiana de la Resistencia a la Compresión del Concreto.	120
Figura 148. Distribución Acumulada de la Resistencia a la Compresión del Concreto.	120
Figura 149. Distribución Gaussiana de la Resistencia a la Tensión de los Conectores.....	122
Figura 150. Distribución Acumulada de la Resistencia a la Tensión de los Conectores.....	122
Figura 151. Geometría probeta – Modelo Estocástico.....	125
Figura 152. Gráfica Carga vs. Desplazamientos Series Modelo Estocástico.	126
Figura 153. Gráfica del Intervalo de Confianza para la Serie 1.....	128
Figura 154. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - Ejemplo de Aplicación No. 1.....	130
Figura 155. Gráfica Comparativa - Ejemplo de Aplicación No. 1.	131
Figura 156. Zona de Influencia de la Resistencia a la Compresión del Concreto - $f^c = 21$ MPa.	131
.....	
Figura 157. Zona de Influencia de la Resistencia a Compresión del Concreto - $f^c = 24$ MPa.	132
Figura 158. Zona de Influencia de la Resistencia a Compresión del Concreto - $f^c = 28$ MPa.	132
Figura 159. Zona de Influencia de la Resistencia a Compresión del Concreto - $f^c = 35$ MPa.	133
Figura 160. Zona de Influencia de la Resistencia a Compresión del Concreto - $f^c = 42$ MPa.	133
Figura 161. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - Ejemplo de Aplicación No. 2.....	134
Figura 162. Gráfica Comparativa - Ejemplo de Aplicación No. 2.	135
Figura 163. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Ejemplo de Aplicación No. 3. ...	136
Figura 164. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Ejemplo de Aplicación No. 4.....	137
Figura 165. Gráfica Comparativa - Ejemplo de Aplicación No. 4.....	137
Figura 166. Gráfica Comparativa 2 - Ejemplo de Aplicación No. 4.....	139

Lista de Tablas

Tabla 1. Geometría de Probetas Experimentales.	52
Tabla 2. Resultados de Ensayos a Compresión del Concreto.	52
Tabla 3. Resultados de Ensayos a Tensión del Acero.	53
Tabla 4. Datos de Entrada para la Calibración No. 1.	57
Tabla 5. Datos de Entrada para la Calibración No. 2.	62
Tabla 6. Datos de Entrada para la Calibración No. 3.	65
Tabla 7. Datos de Entrada para la Serie 1.	82
Tabla 8. Datos de Entrada para la Serie 2.	89
Tabla 9. Datos de Entrada para la Serie 3.	92
Tabla 10. Datos de Entrada para la Serie 4.	95
Tabla 11. Datos de Entrada para la Serie 5.	98
Tabla 12. Datos de Entrada para la Serie 6.	101
Tabla 13. Datos de Entrada para la Serie 7.	104
Tabla 14. Datos de Entrada para la Serie 8.	107
Tabla 15. Comparación de Resultados obtenidos en la Simulación Numérica.	110
Tabla 16. Comparación de resultados Experimentales y los resultados de la Simulación con Modelo Multilineal en el Concreto.	111
Tabla 17. Comparación de resultados Experimentales y los resultados de la Simulación con Menetrey Willam en el Concreto.	112
Tabla 18. Descripción de Variables en el Modelo Numérico Estocástico.	118
Tabla 19. Frecuencia de la Resistencia a Compresión del Concreto.	119
Tabla 20. Distribución Gaussiana de la Resistencia a la Compresión del Concreto.	119

Tabla 21. Distribución de Probabilidad Gaussiana para la Resistencia a la Tensión.	121
Tabla 22. Valor de las Variables Estocásticas con Probabilidades Conjuntas.....	124
Tabla 23. Características para las Series del Modelo Estocástico.	125
Tabla 24. Resultados del Modelo Numérico Estocástico.....	127
Tabla 25. Datos de Entrada para el Ejemplo de Aplicación No. 1.....	130
Tabla 26. Datos de Entrada para el Ejemplo de Aplicación No. 2.....	134
Tabla 27. Datos de Entrada para el Ejemplo de Aplicación No. 3.....	135
Tabla 28. Datos de Entrada para el Ejemplo de Aplicación No. 4.....	136
Tabla 29. Comparación de Resultados de la Simulación vs. Ecuación de Rodríguez R. M (2019).	138
Tabla 30. Comparación de Resultados de la Simulación vs. Ecuación de Rodríguez. J (2020).	138

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años, el uso de sistemas de entresijos compuestos con lámina colaborante ha experimentado un crecimiento significativo en el medio colombiano. Este tipo de sistema ha ganado cada vez más aceptación en la industria de la construcción. El sistema se compone de una losa de concreto reforzado sobre una lámina de acero preformada, conectada a las viguetas mediante conectores de cortante, permitiendo que el conjunto funcione como un sistema compuesto.

Actualmente, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (2010) avala únicamente el uso de conectores de cortante tipo espigo en la construcción de entresijos con lámina preformada. A nivel nacional, la industria ha optado por utilizar conectores de cortante tipo canal ya que pueden tener un costo menor asociado al precio del conector y su proceso de instalación. Es importante destacar que, actualmente no se cuentan con ecuaciones homologadas en el Reglamento para el diseño de estos conectores cuando se emplean en este tipo de entresijo con lámina preformada.

Investigaciones en Colombia por Rodríguez (2019) y Henao (2020), desarrollaron formulaciones que permiten predecir el valor de resistencia para los conectores tipo canal en sección compuesta con lámina colaborante y viguetas en celosía. Como resultado de estas investigaciones, se han realizado contribuciones importantes a la nueva norma AIS-100 que se espera sirva como base para la futura actualización de la normativa NSR.

Las investigaciones experimentales han demostrado ser costosas y consumir mucho tiempo, con resultados limitados debido al gran número de posibles combinaciones de componentes en el sistema
Jenny Navarrete Chaparro—Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2023

compuesto de entrepiso, que influyen en su respuesta mecánica. La falta de capacidad para estudiar otros resultados, como esfuerzos y deformaciones, ha impulsado la necesidad de validar el uso de un método de evaluación mediante simulación numérica. Esto permitiría ampliar la exploración de nuevas configuraciones, estimar su resistencia y buscar la configuración más conveniente, eficiente y económica, reduciendo así el costo y tiempo asociado a la fabricación de especímenes y a los ensayos experimentales. Además, disminuiría el uso informal de conectores al ofrecer una alternativa ágil y válida para evaluar su capacidad antes de su utilización.

En el desarrollo de esta investigación, se inició con la formulación de un modelo matemático determinista. Esta primera fase incluyó la modelación numérica del ensayo de corte directo de 8 series del sistema compuesto a través de la herramienta computacional Ansys Workbench. Posteriormente se procedió a comparar los resultados obtenidos con los valores de resistencia máxima de los conectores reportados experimentalmente a los 5 mm de desplazamiento. Los resultados indicaron que, mediante la simulación se obtuvieron valores en promedio un 5-50% superiores a los resultados experimentales al emplear el modelo constitutivo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal (EIM) en el concreto, conectores y viguetas. Por el contrario, al cambiar al modelo de Menetrey Willam en el concreto que incorpora la etapa de ablandamiento por fisuración del concreto, se observaron valores inferiores en un promedio del 16% respecto a los resultados experimentales.

En una segunda fase, se desarrolló un modelo numérico estocástico donde se incorporó la incertidumbre asociada a las variables. Consistió en la simulación de una muestra compuesta por 30 probetas, utilizando valores aleatorios de las variables estocásticas, que fueron la Resistencia a Compresión del Concreto y la Resistencia a Tensión de los Conectores. Estos valores se generaron mediante la herramienta estadística de Monte Carlo, la cual produce valores aleatorios basándose en la distribución de probabilidad que describe el comportamiento de cada variable. Se emplearon probabilidades conjuntas para determinar los pares de valores a utilizar en cada una de las treinta simulaciones. El resultado de este modelo estocástico se resume en la contribución de un intervalo de confianza con un 95% de probabilidad, indicando que la resistencia máxima de los conectores en un sistema de entrepiso compuesto con las características mencionadas en la Tabla 23. se encuentra dentro de este intervalo. Además, es posible calcular el intervalo para cualquier otra configuración del sistema con este modelo estocástico.

En la tercera fase del estudio, se implementó este modelo numérico a cuatro ejemplos de aplicación. Estos ejemplos abarcaron variaciones en la resistencia a compresión de la losa de concreto, la altura de la losa, la resistencia a tensión y la longitud de los conectores de cortante tipo canal. Los resultados resumen que el aumento en la resistencia a compresión de la losa de concreto y la altura de la losa se traduce en un incremento en la resistencia máxima de los conectores. No se observaron diferencias significativas al variar la resistencia a tensión de los conectores de cortante. Sin embargo, al aumentar la longitud de los conectores más allá de los 75 mm, se registró un aumento en la resistencia de aproximadamente un 20%.

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Sección Compuesta

En las últimas décadas, ha incrementado notablemente el uso de secciones compuestas, especialmente en puentes y edificios. Este sistema implica la unión de vigas de acero con losas de concreto, funcionando conjuntamente como una unidad. Esta combinación aprovecha las ventajas de cada material: la resistencia y ductilidad del acero, así como la resistencia y rigidez del concreto. El resultado es un elemento compuesto que ofrece mayor resistencia y eficiencia. Las fuerzas cortantes en la sección compuesta son transmitidas a través de conectores de cortante, los cuales garantizan adherencia a las vigas de acero. Además, la losa de concreto contribuye significativamente a la capacidad de la sección para resistir la flexión. (McCormac, 2012).

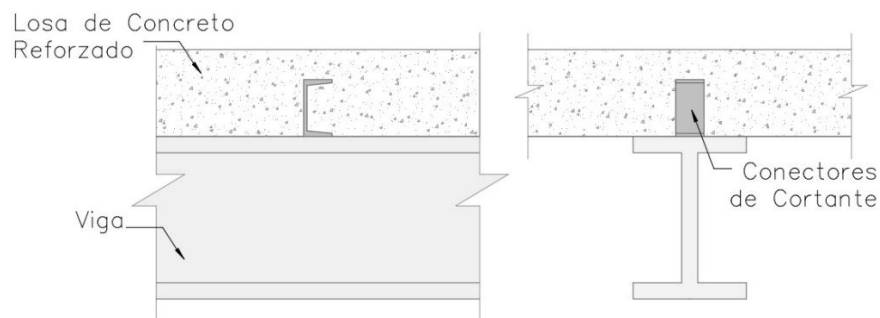
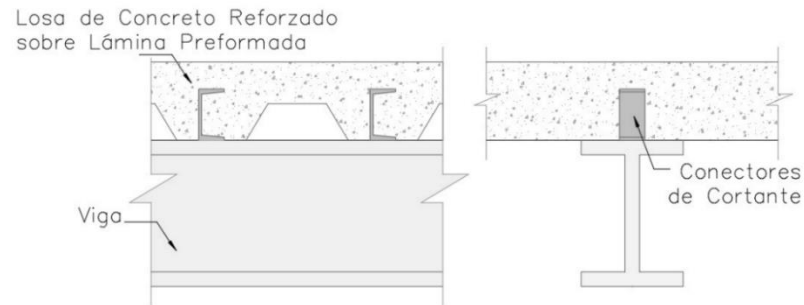


Figura 1. Sección Compuesta.

En este sistema, las vigas de acero se colocan longitudinalmente y soportan la carga principal. La losa de concreto puede apoyarse sobre tableros metálicos, conocidos como lámina colaborante o

steeldeck, que son ampliamente utilizados en entresijos de edificios. Estos tableros metálicos se pueden configurar de forma paralela o perpendicular a las vigas.

Figura 2. Sección Compuesta con Tablero de Acero Preformado. Fuente: (McCormac, 2012).



Este sistema compuesto proporciona una capacidad de carga y resistencia superiores en comparación con estructuras que utilizan únicamente concreto o acero de forma individual. Además, es más liviana que una estructura completamente de concreto, esto resulta en una disminución de los costos de construcción y una mayor eficiencia en el diseño.

1.1.2. Conectores de Cortante

La adherencia entre la losa de concreto y la viga de acero se considera despreciable, por este motivo se emplean conectores de cortantes soldados a las vigas para establecer una conexión eficiente entre ambas partes y así transferir la fuerza de corte. Entre los tipos de conectores disponibles se encuentran espigos, tornillos, espirales, canales, ángulos, zetas, entre otros.

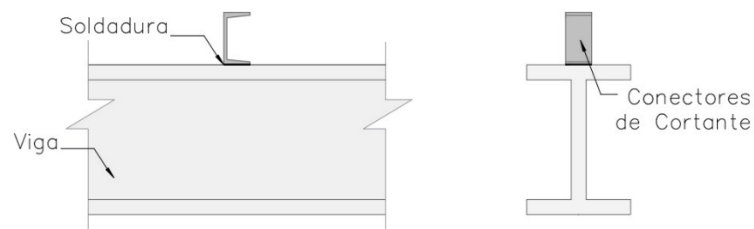


Figura 3. Conectores de Cortante Tipo Canal.

En la actualidad, los conectores tipo canal son los más económicos y ampliamente utilizados. En la mayoría de los casos su uso es informal, lo que resalta la necesidad de formular métodos ágiles y eficaces de evaluación de su resistencia.

1.1.3. Ensayo Push-Out

El ensayo Push-Out, también conocido como ensayo de corte directo, es una prueba mecánica para evaluar el comportamiento y la resistencia de los conectores de cortante en sistemas compuestos. En esta prueba se utilizan probetas a escala real que deben ser dispuestas de forma simétrica. Estas probetas constan de dos losas de concreto idénticas y viguetas de acero conectadas a la losa mediante los conectores de corte.

El ensayo consiste en aplicar una fuerza axial monótonica sobre el núcleo de la probeta a través del dispositivo de carga. Esta fuerza empuja los conectores de cortante y genera una carga de corte directo en la muestra. Posteriormente, se mide el desplazamiento generado para cada incremento de carga.

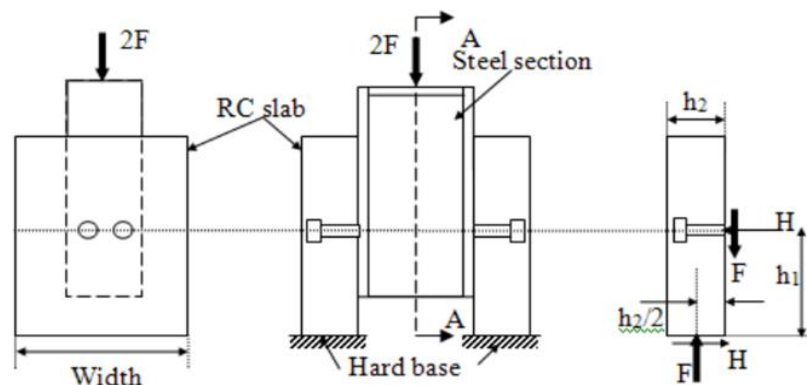


Figura 4. Especimen Típico del Ensayo a Corte Directo. Fuente: (Prakash, 2012).

Las posibles fallas asociadas al ensayo generalmente resultan ser el cizallamiento del conector en la soldadura, el aplastamiento de la losa de concreto alrededor de la base del conector, fisuración del concreto o rotura por tensión y plastificación del conector.

1.1.4. Modelos Constitutivos de los Materiales

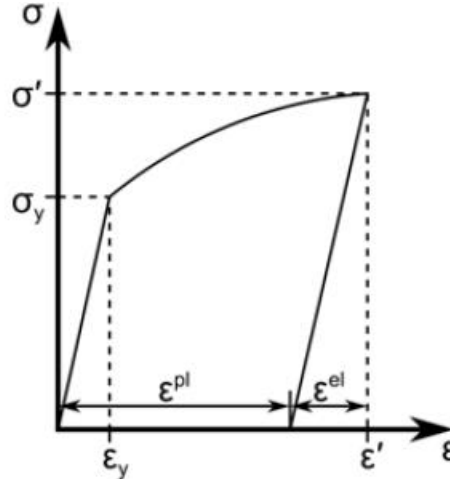
1.1.4.1. Concreto

Ansyes Workbench ofrece varios modelos constitutivos para el análisis del comportamiento del concreto. Los modelos que se emplearon en esta investigación fueron:

1.1.4.1.1. Modelo Elastoplástico

Este modelo tiene en cuenta la respuesta elástica y plástica del material. Se basa en la teoría de la plasticidad y considera que el concreto tiene una fase elástica lineal seguida de una fase plástica no lineal. En la fase elástica, el concreto se comporta de acuerdo con la ley de Hooke, es decir, la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado. Sin embargo, una vez que se alcanza un cierto valor de esfuerzo, el concreto comienza a deformarse permanentemente y entra en la fase plástica. (ANSYS, 2022).

Figura 5. Curva Esfuerzo vs. Deformación para un Material Elastoplástico.



Fuente: (ANSYS, 2022).

1.1.4.1.2. Endurecimiento Isotrópico Bilineal

En Ansyes Workbench este modelo permite una descripción simplificada del comportamiento del concreto en diferentes situaciones de carga, tales como cargas monotónicas, cíclicas y de fatiga, entre otras. Facilita la evaluación de la capacidad del concreto para resistir deformaciones plásticas y pronosticar su respuesta en términos de deformaciones, esfuerzos y deformaciones residuales.

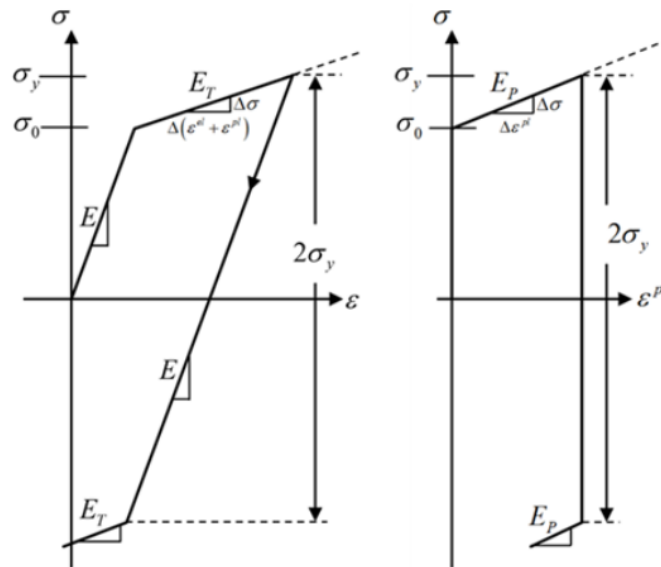
El Endurecimiento Isotrópico Bilineal consiste en una curva bilineal de Esfuerzo vs. Deformación que se divide en dos segmentos lineales. La pendiente del primer tramo representa el módulo elástico del material, mientras que el siguiente tramo tiene una pendiente igual al módulo tangente E_T , este último segmento indica un endurecimiento adicional a medida que se acumulan deformaciones plásticas (ANSYS, 2022).

El módulo tangente E_T y el módulo tangente plástico E_P están relacionados por:

$$E_P = \frac{E E_T}{E - E_T}$$

Donde E es el módulo elástico.

Figura 6. Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Bilineal del Concreto.



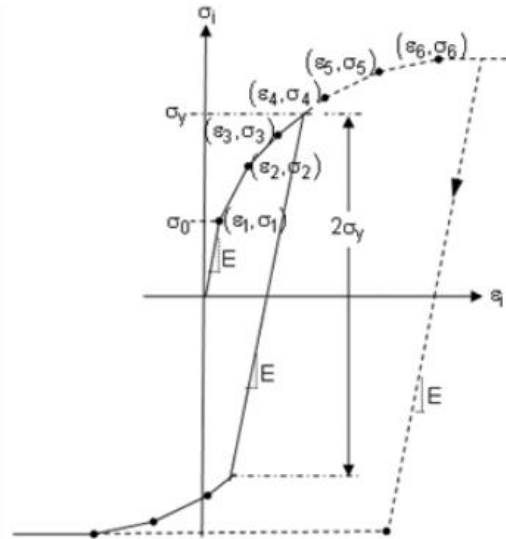
Fuente: (ANSYS, 2022).

1.1.4.1.3. Endurecimiento Isotrópico Multilineal

En Ansys Workbench este modelo simula el comportamiento no lineal del concreto en situaciones de carga complejas. Consiste en una curva de Esfuerzo-Deformación que tiene varios segmentos, cada segmento representa diferentes condiciones de carga y deformación, lo que brinda una representación más precisa del comportamiento del concreto. Estos segmentos pueden incluir comportamientos

elásticos, plásticos y de fisuración, lo que permite simular el daño y la deformación del concreto de manera más realista.

Figura 7. Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal del Concreto.



Fuente: (ANSYS, 2022).

1.1.4.1.4. Modelo de Drucker Prager

Este modelo se utiliza generalmente para describir el comportamiento del concreto bajo cargas cortantes y de compresión, considerando la fricción y la fisuración del material. Este modelo se basa en la teoría de la plasticidad y tiene en cuenta la resistencia a la compresión y la resistencia al corte del material. La resistencia al corte se define mediante el ángulo de fricción, que representa la resistencia interna del concreto al deslizamiento.

Superficies de Rendimiento y Potenciales de Flujo

Superficies de tracción y tracción-compresión

Cuando se involucran cargas en tracción y tracción-compresión, se emplea una superficie de fluencia de Drucker-Prager o una superficie de falla por tracción de Rankine para establecer la condición de fluencia. (ANSYS, 2022).

Superficie de Rendimiento de Drucker-Prager

La superficie de fluencia de tensión y tensión-compresión de Drucker-Prager está dada por:

$$f_{DP_t} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_t \sigma_m - \sigma_{Yt}$$

donde β_t y σ_{Yt} son constantes definidas por la resistencia a la tracción uniaxial R_t y la resistencia a la compresión uniaxial R_c .

Figura 8. Superficie Compuesta con Compresión Drucker-Prager y Superficies de Fluencia por Tensión Drucker-Prager.

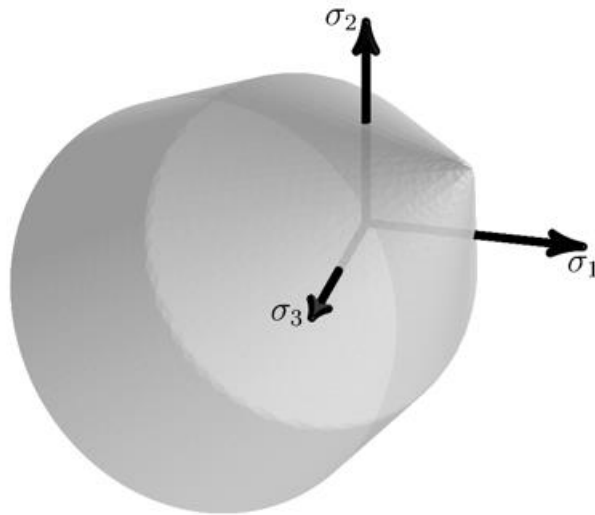
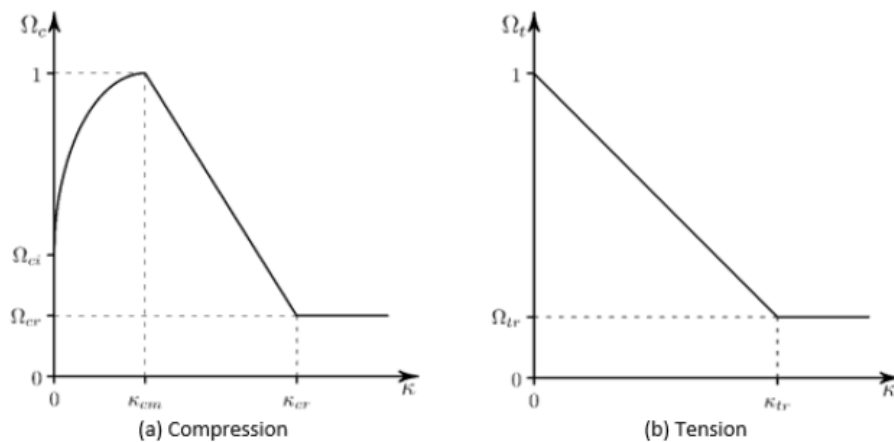


Figura 9. Ablandamiento Lineal en Compresión y Tracción.



Fuente: (ANSYS, 2022).

1.1.4.1.5. Modelo de Menetrey Willam

El modelo constitutivo de Menetrey-Willam se fundamenta en la superficie de fluencia de Willam-Warnke, que tiene similitudes con la superficie de Mohr-Coulomb y también comparte características con el modelo de Drucker Prager. Menetrey Willam se destaca por ser más efectivo para simular el comportamiento de materiales como el concreto, ya que presenta una superficie de fluencia con una estructura más suave, sin bordes afilados, evitando complicaciones en la resolución de la tensión superficial (ANSYS, 2022).

Superficies de Rendimiento y Potenciales de Flujo

Los parámetros que definen la función de rendimiento del material son:

Límite Elástico en Tracción Uniaxial (R_t), $R_t > 0$

Compresión Uniaxial (R_c), $R_c > R_t$

Compresión Biaxial (R_b), $R_b > R_c$

Ángulo de Dilatación, $\frac{R_t}{\sqrt{2}R_c} < \tan\psi \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$

Los parámetros que definen las funciones de endurecimiento y ablandamiento son:

$$\bar{R}_t = R_t \Omega_{tc}$$

$$\bar{R}_c = R_c \Omega_c$$

$$\bar{R}_b = R_b \Omega_c$$

$$\Omega_{tc} = \begin{cases} \Omega_t & k_c \leq k_{cm} \\ \Omega_t \Omega_c & k_c > k_{cm} \end{cases}$$

Donde

K_{cm} = Parámetro del material

Ω_c = Función de Compresión

Ω_t = Función de Endurecimiento por Tensión/Ablandamiento

K_c y K_t = Variables de Compresión o Endurecimiento por Tensión

La superficie de fluencia en coordenadas de tensión de Haigh-Westergaard viene dada por:

$$f_{MW} = \frac{C_2}{C_3} [\sqrt{2}\xi + r\rho] + \rho^2 - \frac{1}{c_3}$$

Donde

C_2 y C_3 = Funciones de los parámetros del material y las Funciones de Endurecimiento y Ablandamiento.

$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{6}} \left[\frac{1}{\bar{R}_c} - \frac{1}{\bar{R}_b} + \frac{\bar{R}_b - \bar{R}_t}{\bar{R}_c^2} \right] \quad C_3 = \frac{3}{2} \frac{1}{\bar{R}_c^2}$$

$$r = \frac{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + (2e - 1)^2}{2(1 - e^2) \cos \theta + (2e - 1) \sqrt{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + 5e^2 - 4e}}$$

$$e = \frac{1 + \epsilon}{2 - \epsilon}$$

$$\epsilon = \frac{\bar{R}_t \bar{R}_b^2 - \bar{R}_c^2}{\bar{R}_b \bar{R}_c^2 - \bar{R}_t^2}$$

Las coordenadas de tensión de Haigh-Westergaard son:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1$$

$$\rho = \sqrt{2J_2}$$

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{\sqrt{J_2^3}}$$

Con I_1 la primera invariante principal del tensor de tensión, y J_2 la J_3 segunda y tercera invariante principal del tensor de tensión desviadora:

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$$

$$J_2 = \frac{1}{6}((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2) + \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2$$

$$J_3 = \det(\sigma - I\sigma_m)$$

El potencial de flujo es:

$$Q_{MW} = \rho^2 + B_g \rho + C_g \xi$$

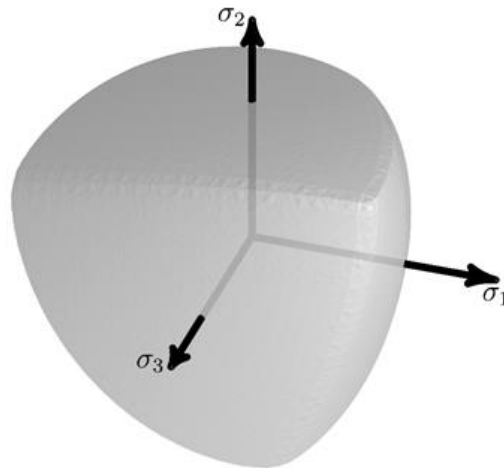
dónde:

$$B_g = \frac{2 \bar{R}_c \tan \psi - \sqrt{2} \bar{R}_t}{\sqrt{3} (1 - \sqrt{2} \tan \psi)}$$

$$C_g = \frac{B_g}{\sqrt{2}} + \frac{2 \bar{R}_t}{\sqrt{3}}$$

ψ = es el ángulo de dilatancia

Figura 10. Superficie de Fluencia para el Modelo Menetrey-Willam.



Fuente: (ANSYS, 2022).

Funciones de Endurecimiento y Ablandamiento

La evolución del comportamiento de endurecimiento y ablandamiento de las superficies de fluencia están definidas por las funciones de endurecimiento y ablandamiento Ω_c y Ω_t . Las cuales dependen de las variables de endurecimiento por compresión y tensión y evolucionan de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$\dot{k}_c = \frac{\alpha_c}{R_c} \sigma \dot{\epsilon}^{pl}$$

$$\dot{k}_t = \frac{\alpha_t}{R_t} \sigma \dot{\epsilon}^{pl}$$

donde α_c y α_t son funciones de peso de compresión y tensión dadas por:

$$\alpha_c = 1 - \alpha_t$$

$$\alpha_t = \begin{cases} 0 & \tan \alpha < -2 \\ \frac{1}{1 + \exp(-10 \tan \alpha)} & -2 \leq \tan \alpha \leq 2 \\ 1 & \tan \alpha > 2 \end{cases}$$

$$\tan \alpha = \sqrt{6} \frac{\xi}{\rho}$$

Ablandamiento Lineal

La función de la superficie de fluencia en compresión Ω_c , se compone de una función de endurecimiento no lineal y una función de ablandamiento lineal. Además, la función de rendimiento de endurecimiento es:

$$\Omega_c = \Omega_{ci} + (1 - \Omega_{ci}) \sqrt{2 \frac{K}{K_{cm}} - \frac{K^2}{K_{cm}^2}}$$

Ω_{ci} = Nivel de tensión relativo al comienzo del endurecimiento No Lineal

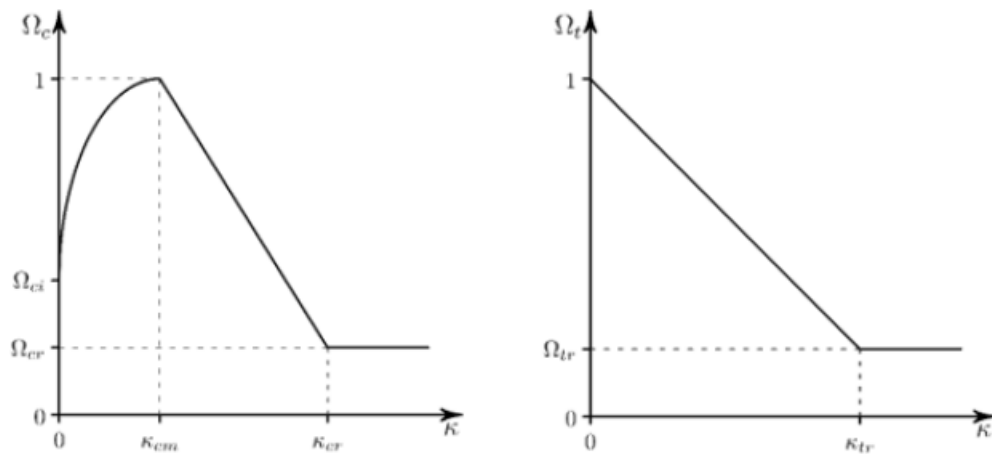
En $K = K_{cm}$, se alcanza la máxima resistencia a la compresión y el ablandamiento comienza con:

$$\Omega_c = 1 - \frac{1 - \Omega_{cr}}{k_{cr} - k_{cm}} (k - k_{cm})$$

En $K > K_{cr}$, el nivel de estrés relativo es el valor residual Ω_{cr} .

La función de fluencia en tensión, Ω_t , viene dada por una función de ablandamiento lineal. La tensión de fluencia relativa es igual a 1 en la fluencia inicial, disminuye a la tensión residual relativa Ω_{tr} cuando la deformación plástica efectiva es K_{tr} , y es constante para $K > K_{tr}$ (ANSYS, 2022).

Figura 11. Ablandamiento Lineal en Compresión y Tracción.



Fuente: (ANSYS, 2022).

Definición de los datos para formular el ablandamiento lineal:

k_{cm} = Deformación plástica a la resistencia de compresión uniaxial, $0 < k_{cm} < k_{cr}$

k_{cr} = Deformación plástica máxima efectiva en compresión, $k_{cr} > k_{cm}$

Ω_{ci} = Tensión relativa al inicio del endurecimiento no lineal, $0 \leq \Omega_{ci} \leq 1$

Ω_{cr} = Esfuerzo relativo de compresión residual, $0 < \Omega_{cr} \leq 1$

k_{tr} = Límite de deformación plástica en tensión, $k_{tr} \geq 0$

Ω_{tr} = Esfuerzo relativo de tracción residual, $0 < \Omega_{tr} \leq 1$

1.1.4.1.6. Modelo de Microplano

El modelo de microplano es un enfoque avanzado en la que el comportamiento del material se modela mediante leyes de tensión-deformación en varios planos individuales, utilizado en el análisis de materiales heterogéneos como el concreto, donde las propiedades del material pueden variar a nivel microscópico.

Este modelo considera la respuesta no homogénea del material, brindando una simulación más precisa del comportamiento del concreto, especialmente en situaciones con daños, fisuras o fallas a nivel microscópico. La disminución de la rigidez, que varía según la dirección, se representa mediante leyes de daño en planos de falla potenciales individuales, resultando en una formulación de daño macroscópico anisotrópico.

Formulación

La teoría del microplano comprende tres tareas esenciales: aplicar una restricción cinemática para relacionar los tensores de deformación macroscópicos con sus microplanos, definir leyes constitutivas a nivel de microplano y homogeneizar el proceso a nivel de punto material para obtener la respuesta general del material, fundamentado en el principio de equivalencia de energía.

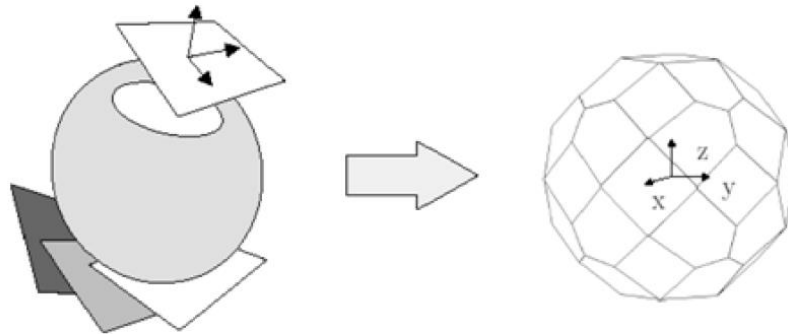
La formulación del modelo de material de microplano se basa en la suposición de que existe energía libre microscópica ψ^{mic} en el nivel de microplano y que la integral de ψ^{mic} sobre todos los microplanos es equivalente a una energía de Helmholtz libre macroscópica ψ^{mac} (ANSYS, 2022).

$$\psi^{mac} = \frac{3}{4\pi} \int \psi^{mic} d\Omega$$

Discretización

En el proceso de integración numérica se emplean cuarenta y dos microplanos. La discretización implica la transición de la microesfera a los microplanos que representan de manera aproximada la forma de la esfera. Dada la simetría presente en los microplanos, donde todos los planos restantes comparten la misma dirección normal, se contemplan específicamente 21 microplanos.

Figura 12. Discretización de Esferas por 42 Microplanos.



Fuente: (ANSYS, 2022).

1.1.4.2. Acero

Ansys Workbench ofrece diversos modelos constitutivos para representar el comportamiento del acero. Los modelos utilizados en esta investigación son:

1.1.4.2.1. Endurecimiento Isotrópico Bilineal

El endurecimiento isotrópico bilineal es útil para simular el comportamiento del acero en situaciones de carga cíclica o monotónica con diferentes niveles de deformación. Permite capturar el aumento de la resistencia y la rigidez del acero a medida que se produce la deformación plástica. Este modelo asume que el acero experimenta endurecimiento tanto en la dirección de tracción como en la compresión, y que el endurecimiento es independiente de la dirección de carga.

El modelo asume que la curva de endurecimiento tiene una forma bilineal, con una pendiente inicial de endurecimiento seguida de una pendiente de endurecimiento reducida después de alcanzar un límite de fluencia.

1.1.4.2.2. Endurecimiento Isotrópico Multilineal

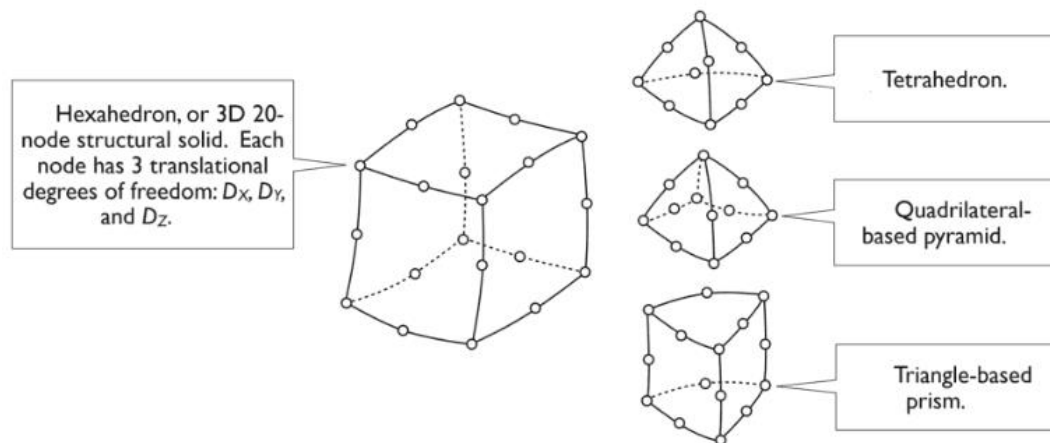
Este modelo describe el comportamiento mecánico del acero durante la deformación plástica. Se basa en la idea de que el acero exhibe una respuesta elástica seguida de una respuesta plástica, y que su rigidez aumenta en una medida que se deforma. Considera que el acero experimenta diferentes etapas de endurecimiento a medida que se somete a deformación.

A diferencia del modelo bilineal, el modelo multilineal puede tener múltiples segmentos en la curva de endurecimiento, lo que permite una representación más detallada del comportamiento del acero bajo deformaciones plásticas acumuladas. Este modelo considera que a medida que se acumulan deformaciones plásticas en el material, la resistencia a las cargas posteriores aumenta.

1.1.5. Tipo de Elementos

Ansys Workbench maneja una amplia variedad de elementos finitos que permiten simular y modelar diferentes tipos de estructuras y comportamientos dependiendo el problema. Dentro de los tipos de elementos finitos tridimensionales se encuentran los elementos sólidos, los cuales se utilizan para modelar componentes con comportamiento elástico y plástico. Algunos ejemplos de estos elementos sólidos son:

Figura 13. Elementos Finitos en Ansys Workbench.

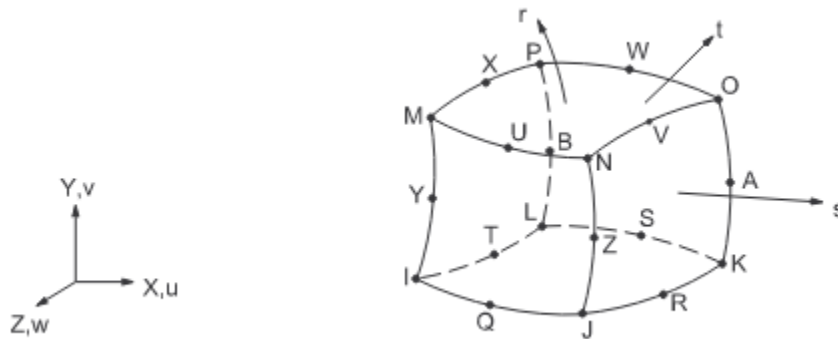


Fuente: (Lee, 2020).

1.1.5.1. Elementos Finitos Hexaédricos

También conocidos como elementos ladrillo, son utilizados para modelar sólidos con geometría regular. Proporcionan una buena precisión en el análisis de esfuerzos y deformaciones. Este elemento sólido de seis caras representado por el sólido SOLID186 cuando es de segundo orden con 20 nudos o SOLID185 de primer orden con 8 nudos. Este sólido utiliza funciones de forma bilineales tridimensionales para mostrar la variación de las deformaciones y esfuerzos dentro del elemento. Estas funciones de forma se basan en las coordenadas nodales y se utilizan para interpolar los valores de deformación y esfuerzos en todo el elemento.

Figura 14. Elemento Finito Tipo Hexaedro.



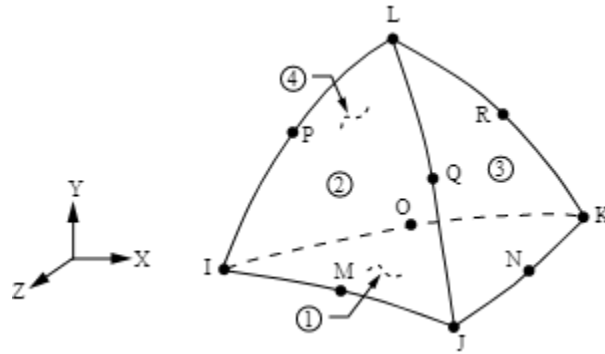
Fuente: (ANSYS, 2022).

1.1.5.2. Elementos Finitos Tetraédricos

Son utilizados para modelar sólidos con geometría irregular. Son útiles para modelar estructuras complejas o cuando la discretización requiere mayor flexibilidad. Este elemento sólido de cuatro caras representado por el sólido SOLID187 cuando es de segundo orden o 4 nudos en primer orden. Permite una representación más precisa de la geometría y las deformaciones en comparación con los elementos hexaédricos de menor orden.

Este sólido utiliza funciones de forma trilineales tridimensionales para interpolar los valores de deformación y esfuerzo dentro del elemento. Estas funciones de forma se basan en las coordenadas nodales y permiten una representación más precisa.

Figura 15. Elemento Finito Tipo Tetraedro.



Fuente: (ANSYS, 2022).

1.1.6. Tipos de Contactos

Los modelos de contacto determinan cómo es la interacción, la transferencia de carga, deformaciones y desplazamientos entre las interfaces de contacto de las partes de un modelo. Los contactos permiten modelar condiciones de unión, fricción, separación y deslizamiento entre las partes. Estos contactos pueden tener propiedades específicas, como coeficientes de fricción, rigidez normal y tangencial, y comportamiento no lineal.

1.1.6.1. Friccional

En esta configuración hay interacción entre dos superficies con fricción. Este tipo de contacto permite el deslizamiento relativo. Las dos caras en contacto pueden llevar esfuerzos cortantes hasta una cierta magnitud a través de su interfaz antes de que comiencen a deslizarse entre sí. Una vez que se supera el esfuerzo cortante, las dos caras se deslizarán entre sí. Se define un coeficiente de fricción que representa la resistencia al deslizamiento entre las superficies.

1.1.6.2. Sin fricción

Esta configuración de contacto no considera la resistencia a la fricción entre las superficies en contacto. En otras palabras, no se aplica ninguna fuerza de fricción que se oponga al deslizamiento relativo entre las superficies. Por lo tanto, se pueden formar espacios entre los cuerpos dependiendo de la carga. Esta solución no es lineal porque el área de contacto puede cambiar a medida que se aplica la carga. Se asume un coeficiente de fricción cero, lo que permite el deslizamiento libre.

1.1.6.3. Unido

Las regiones de contacto están unidas de forma permanente, no se permite el deslizamiento ni la separación entre caras o bordes. Este tipo de contacto permite una solución lineal ya que la longitud o el área del contacto no cambiará durante la aplicación de la carga. Puede ser aplicado en situaciones donde no se espera que haya movimientos relativos entre las partes, como en uniones rígidas o estructuras soldadas.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Investigaciones Nacionales

1.2.1.1. Rodríguez R. M., 2019

Comportamiento de Conectores de Cortante Tipo Canal en Sistemas de Entrepiso Conformados por Viguetas en Celosía, Concreto Reforzado y Lámina Colaborante.

El propósito de esta investigación fue desarrollar una formulación que determine un valor de la resistencia para los conectores de cortante tipo canal en un sistema de entrepiso compuesto con viguetas en celosía y losa de concreto reforzado sobre una lámina colaborante. Esto se realizó mediante un tratamiento de los resultados obtenidos de ensayar 8 series de probetas a corte directo.

Las probetas ensayadas presentaron características específicas, como láminas colaborantes de 2 y 3 pulgadas, conectores de cortante tipo canal de 3” y 4” pulgadas, alturas de losa de 100, 130 y 150 mm, y longitudes de conectores de 50 y 113 mm. Durante los ensayos se mantuvieron constantes variables importantes tales como la resistencia a compresión del concreto de 21 MPa, la posición del conector en posición débil, la aplicación de carga desde el frente, y la orientación perpendicular de la lámina colaborante respecto a las viguetas.

Con base a los resultados experimentales propone la siguiente formulación:

$$Q_n = 0.7 \left(\left(-43.4 \sqrt{f'_c} + 152.6 \frac{wr}{hr} + 0.40 Lc \right) (15.9 (tw + tf) + 0.66 Lc) \right)$$

Dónde:

Q_n = Capacidad a corte del conector (N)

f'_c = Resistencia a la Compresión del Concreto (MPa)

Lc = Longitud del conector en (mm)

wr = Ancho promedio del tablero metálico en (mm)

hr = Altura del tablero metálico en (mm)

tf = Espesor de aleta del conector en canal en (mm)

tw = Espesor del alma del conector en canal en (mm)

En esta investigación, se concluye que la formulación propuesta proporciona predicciones más confiables sobre la resistencia de los conectores tipo canal en entrepisos conformados por viguetas en celosía, concreto reforzado y lámina colaborante, en comparación con la formulación establecida por la NSR-10.

1.2.1.2. Rodríguez L. J., 2020

Comportamiento de Conectores de Cortante Tipo Canal en Sistemas de Entrepiso Conformados por Viguetas en Celosía, Lámina Colaborante y Concreto Reforzado.

En esta investigación se estudió el comportamiento mecánico de los conectores tipo canal, con viguetas tipo celosía y losa de concreto vaciada sobre lámina colaborante. El objetivo principal fue reestimar la ecuación propuesta por (Rodríguez R. M., 2019).

Además, se realizó una simulación de las probetas. El programa de análisis fue Ansys 2019.3, y se simularon 8 series para llevar a cabo el estudio. Las variables consideradas fueron la geometría del conector y de la losa de concreto. Se llevaron a cabo dos análisis, el primero lineal elástico y el segundo considerando el rango plástico de los materiales.

En cuanto a los materiales utilizados, expuso los datos de entrada para describir el concreto, que fue la Resistencia a la Compresión y el Módulo de Young, que fueron 20.46 MPa y 21735 MPa, respectivamente, obtenidos a partir de ensayos de compresión. Para el acero en el primer análisis de tipo lineal elástico, se ingresaron datos de Esfuerzo de Fluencia y de Módulo de Young de 367,8 MPa y 200000 MPa, respectivamente. En el segundo análisis, de tipo elastoplástico, se utilizó el Modelo de Endurecimiento isotrópico Bilineal con un módulo tangente de 1450 MPa.

En el primer análisis se utilizó un modelo de contacto tipo adherido entre el conector y el concreto, sin considerar la influencia de la fricción. En el segundo análisis se incorporó la fricción, considerando un coeficiente de 0,65.

En cuanto al modelo, se simuló la mitad de la probeta en términos de geometría. Para el mallado, se emplearon elementos sólidos tipo tetraédricos para ambos materiales. El tamaño de los elementos varió de 5 a 40 mm. A continuación, se presenta el resultado de la malla que utilizó.

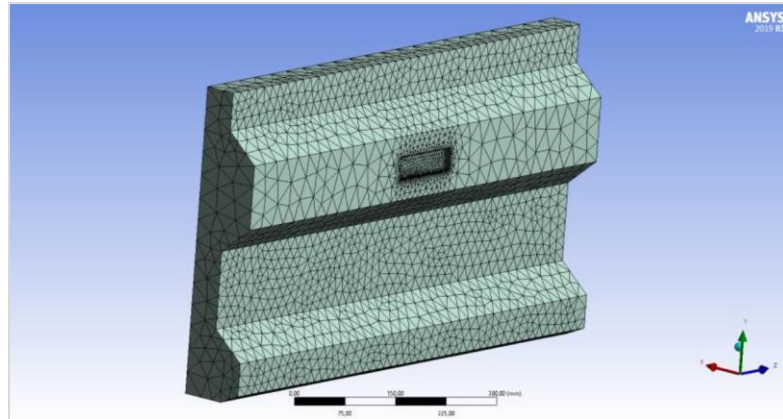


Figura 16. Malla de la Losa de Concreto. Fuente: (Rodríguez L. J., 2020).

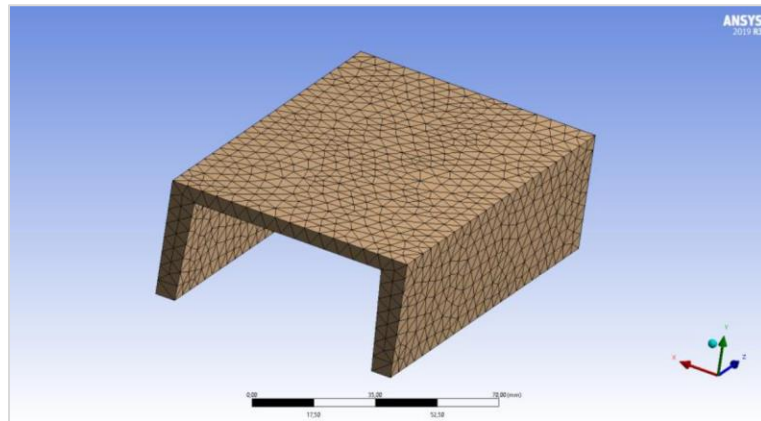


Figura 17. Malla del Conector de Cortante. Fuente: (Rodríguez L. J., 2020).

Las condiciones de frontera fueron establecidas basándose en el ensayo de corte directo. En resumen, se restringió el movimiento en la base del concreto en todas las direcciones y se limitó el movimiento en la dirección "y" en la parte media del modelo. Se empleó la herramienta de simetría para definir una región simétrica. El modelo de carga consistió en la aplicación de desplazamientos graduales en la base del conector, variando desde 0 hasta 5 mm.

Como última etapa se procedió a comparar la resistencia máxima de los conectores obtenida en la simulación con los resultados experimentales. Durante el primer análisis de elasticidad lineal se evidenció un margen de error que fluctuó entre el 2% y el 30%. En el segundo análisis, donde se tuvo en cuenta el comportamiento no lineal de los materiales, el margen de error varió entre el 4% y el 28.5%.

Además, propuso la siguiente formulación, resultado de haber reestimado la ecuación de (Rodríguez R. M., 2019).

$$Q_n = 0.7 \left(\left(-42.6 \sqrt{f'_c} + 150.2 \frac{wr}{hr} + 0.38 Lc \right) (16.1 (tw + tf) + 0.67 Lc) \right)$$

Dónde:

Q_n = Capacidad a corte del conector (N)

f'_c = Resistencia a la Compresión del Concreto (MPa)

Lc = Longitud del conector (mm)

wr = Ancho promedio del tablero metálico (mm)

hr = Altura del tablero metálico (mm)

tf = Espesor de la aleta del conector tipo canal (mm)

tw = Espesor del alma del conector tipo canal en canal (mm)

En esta investigación se concluye que la formulación resultante de la reestimación de la ecuación de diseño propuesta por (Rodríguez R. M., 2019) arroja resultados muy cercanos a los obtenidos, con diferencias en los resultados del orden del 0.35% al 1%.

1.2.3.4. Hernández, 2017

Comportamiento de Conectores de Cortante Tipo Tornillo en Secciones Compuestas con Lámina Colaborante.

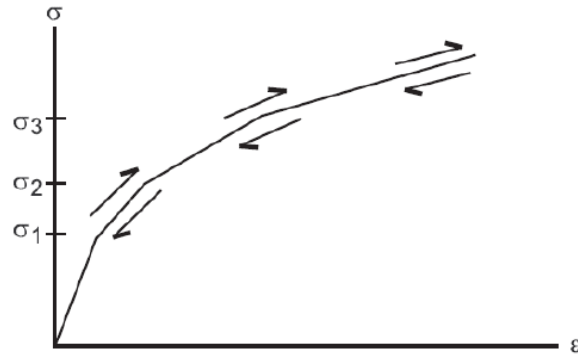
En esta investigación se estudió el comportamiento mecánico de los conectores tipo tornillo, con viguetas tipo IPE 200 y una losa de concreto vaciada sobre lámina colaborante. El objetivo principal consistió en analizar la respuesta del sistema ante solicitaciones de corte directo, mediante ensayos experimentales y modelación numérica.

El programa de análisis empleado fue Ansys 2013, simuló 21 probetas para llevar a cabo el estudio. Las variables consideradas fueron el diámetro del conector, cantidad y separación de conectores, la geometría de la losa de concreto y la disposición de la losa respecto a las viguetas. Realizó un análisis elastoplástico considerando el comportamiento plástico de los materiales.

En cuanto a los modelos constitutivos de los materiales utilizados, utilizó el modelo Elástico Multilineal (MELAS) para describir el comportamiento del concreto. La pendiente del primer segmento de la curva corresponde al módulo de elasticidad, y en el que los incrementos de carga y descarga siguen

la misma trayectoria, por lo cual, la deformación plástica obtenida bajo este modelo no representa un comportamiento histerético. (Hernández, 2017).

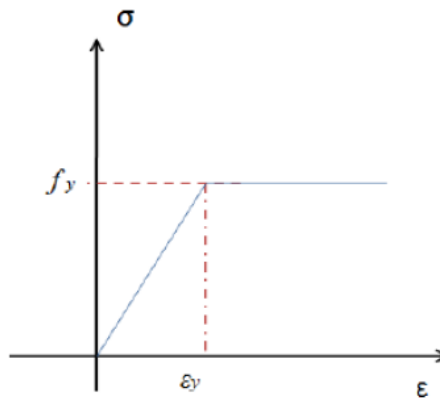
Figura 18. Curva Esfuerzo vs. Deformación MELAS.



Fuente: (Hernández, 2017).

En la representación del acero del conector se empleó el Modelo Elasto-Plástico Bilineal. Los datos incluyeron un Módulo de Young de 200,000 MPa. Para el segundo tramo de la curva, se utilizó un Módulo Tangente Elastoplástico de 0 MPa.

Figura 19. Curva Esfuerzo vs. Deformación Elasto Plástica.

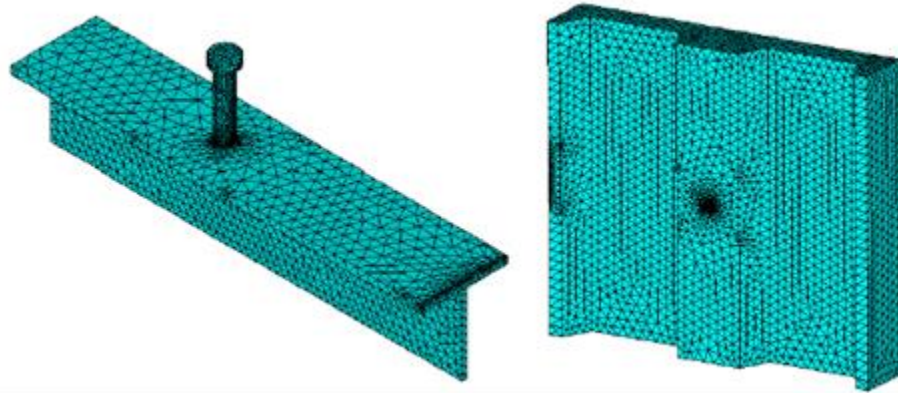


Fuente: (Hernández, 2017).

Para describir el comportamiento mecánico del acero en las viguetas tipo "I", utilizó un modelo lineal con un Módulo de Young de 200,000 MPa. En relación con el contacto de las interfaces entre el concreto y el perfil metálico, se aplicó un modelo de dilatación. No obstante, el estudio no detalla explícitamente el modelo utilizado para representar la interfaz entre el conector y el concreto.

En lo que respecta al modelo, se llevó a cabo la simulación de la mitad de la probeta en términos de geometría. En el proceso de mallado se utilizaron elementos sólidos tipo tetraédricos (Solid65-3D y Solid45-3D).

Figura 20. Mallado del Sistema Compuesto con Conectores Tipo Tornillo.



Fuente: (Hernández, 2017).

Las condiciones de frontera fueron configuradas con base en el ensayo de corte directo. En resumen, se restringió el movimiento en la base del concreto en todas las direcciones y se limitó el desplazamiento en la dirección "Z" en el área longitudinal del alma de la viga de acero. El modelo de carga consistió en la aplicación de desplazamientos controlados sobre los nudos acoplados en el eje "Y", paralelo al sentido de aplicación de la carga. (Hernández, 2017).

Para finalizar, se realiza una comparación entre la máxima respuesta estructural obtenida en la simulación numérica y la carga de falla experimental. En los modelos con un conector y lámina paralela al perfil, se evidenció un margen de error en los resultados que osciló entre el 8% y el 17%. En los modelos con un conector y lámina perpendicular al perfil, se observó un margen de error en los resultados que varió entre el 17% y el 24%.

En los modelos con dos conectores y lámina paralela al perfil, se demostró un margen de error en los resultados que osciló entre el 1% y el 16%. En los modelos con dos conectores y lámina perpendicular al perfil, se obtuvo un margen de error en los resultados que fluctuó entre el 10% y el 48%.

Se realizó un análisis estadístico mediante una regresión lineal, a través del cual se formuló una ecuación de diseño para calcular la carga por conector.

$$Q_n = 0.21A_{cp}(f'_cE_c)^{0.5} \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.11}$$

1.2.3.5. Muñoz, 2013

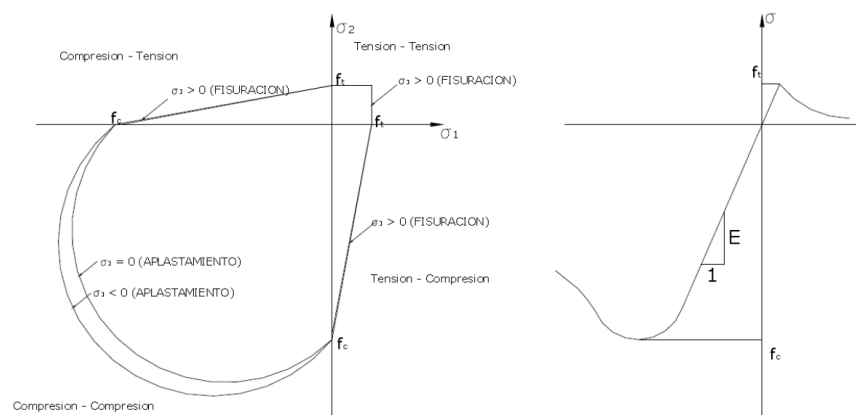
Comportamiento de canales como conectores de cortante para un sistema de sección compuesta usando lámina colaborante.

En esta investigación se estudió el comportamiento mecánico de los conectores tipo canal con viguetas tipo IPE 200 y una losa de concreto vaciada sobre lámina colaborante. El objetivo principal fue analizar y formular la respuesta del sistema ante solicitaciones de corte directo, mediante ensayos experimentales y modelación numérica.

El programa de análisis fue Ansys V10.0, donde se simularon dos probetas para llevar a cabo el estudio. Se consideraron diversas variables, entre las que se incluyó la orientación de la lámina colaborante, manteniendo la longitud del conector constante en 70 mm. Los análisis se llevaron a cabo tanto en el rango elástico como en el rango elasto-plástico, teniendo en cuenta el comportamiento plástico de los materiales.

En relación con los modelos constitutivos de los materiales empleados, se adoptó el criterio de falla propuesto por William y Warnke (1975), el cual describe una superficie de esfuerzo máximo para el concreto.

Figura 21. Superficie de Falla de acuerdo con el criterio William y Warnke.



Fuente: (Muñoz, 2013).

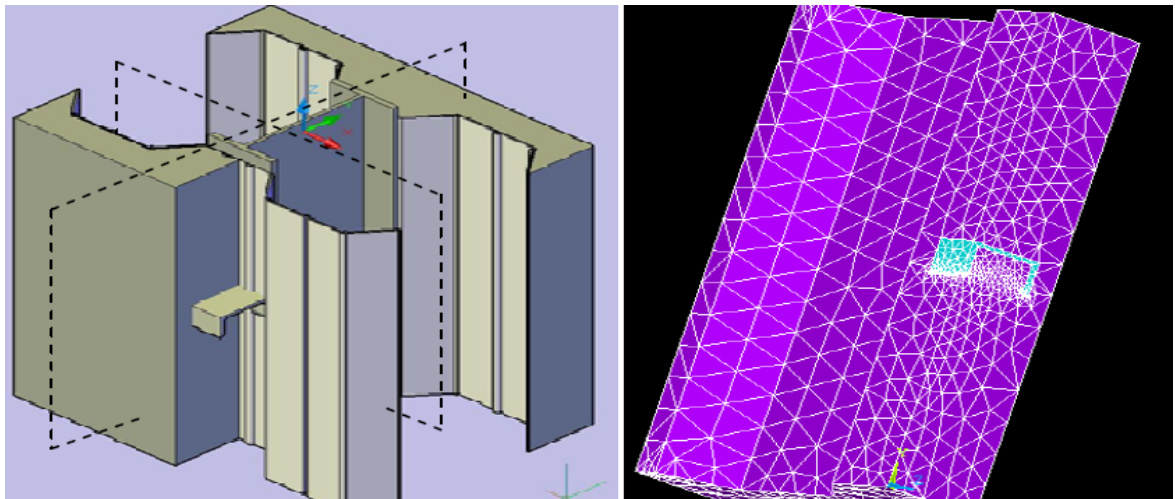
En la representación del acero del conector, se aplicó el criterio de falla de Von Mises.

$$(\sigma_{(1)} - \sigma_{(2)})^2 + (\sigma_{(2)} - \sigma_{(3)})^2 + (\sigma_{(1)} - \sigma_{(3)})^2 < 2\sigma_Y^2$$

Para describir el comportamiento mecánico del acero de los conectores, se empleó una curva esfuerzo - deformación con dos segmentos, uno en el rango elástico y otro en el rango plástico con un Módulo de Young de 200.000 MPa. En el estudio no se detalló el modelo utilizado para representar la interfaz entre el conector y el concreto.

En relación con el modelo, se realizó la simulación de un cuadrante de la probeta en términos de geometría. Para la generación de la malla se emplearon elementos sólidos tipo tetraédricos SOLID65. Este tipo de sólido permitió modelar la fisuración en tensión y el aplastamiento en compresión.

Figura 22. Mallado del Sistema Compuesto con Conectores Tipo Canal.



Fuente: (Muñoz, 2013).

Las condiciones de frontera se configuraron tomando como referencia el ensayo de corte directo. En resumen, restringió el movimiento en la base del concreto en todas las direcciones, y se limitó el movimiento en las direcciones “x” y “z” en las caras del modelo para tener en cuenta la restricción de la simetría. El modelo de carga consistió en la aplicación de desplazamientos en varias etapas en la base del conector.

Para concluir, se llevó a cabo una comparación entre las respuestas del sistema mediante la simulación y los resultados experimentales.

En el primer análisis lineal elástico, los resultados diferían considerablemente en comparación con los experimentales, con un margen de error que oscilaba entre el 35% y el 46.5%.

En el segundo análisis elastoplástico, los resultados presentaban diferencias mínimas en relación con los experimentales, con un margen de error del 2.1% al 2.6%. En este análisis, se pudo observar un modo de falla en las probetas y una fisuración del concreto bastante similar a los resultados experimentales.

Se propuso la siguiente formulación para prever la carga de falla de los conectores bajo investigación:

$$q_n = \left(22.8\sqrt{f'_c} + 0.027 \right) \left(0.919e^{0.0016L} \right)$$

1.2.3.6. Aguirre, 2012

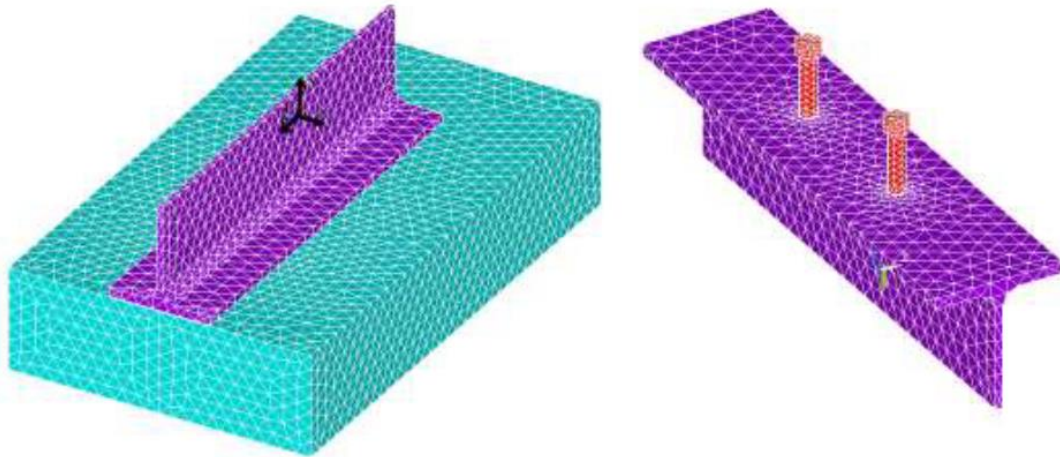
Simulación numérica del comportamiento de conectores de cortante tipo tornillo en un sistema de sección compuesta ante sollicitación de corte directo.

En esta investigación se estudió el comportamiento mecánico de los conectores tipo tornillo, con viguetas tipo IPE 200 y losa de concreto vaciada sobre lámina colaborante. El objetivo principal fue analizar la respuesta del sistema ante sollicitaciones de corte directo, mediante simulación numérica. El programa de análisis fue Ansys V.11, simuló 18 configuraciones para llevar a cabo el estudio. Las variables consideradas fueron el diámetro del conector, cantidad y separación de conectores.

En cuanto a los modelos constitutivos de los materiales utilizados, se utilizó el modelo de daño de William & Warnke para describir el comportamiento del concreto. Para el acero del conector, se utilizó el Modelo Elasto Plástico con criterio de falla de Von Mises para representar las grandes deformaciones. Para describir el comportamiento mecánico del acero de las viguetas tipo “I” se empleó un modelo lineal elástico.

En términos de geometría, se simuló la mitad de la probeta. El modelo empleado para representar el contacto en las interfaces entre el concreto y el perfil metálico consideró una dilatación de 1 mm. Para la generación de la malla se utilizaron elementos sólidos tipo tetraédricos, con dimensiones de 0.6 cm para los tornillos y 1.5 cm para el perfil y la placa.

Figura 23. Mallado del Sistema Compuesto con Conectores Tipo Tornillo.



Fuente: (Aguirre, 2012).

Las condiciones de frontera fueron establecidas tomando como referencia el ensayo de corte directo. En resumen, se restringió el movimiento en la base del concreto en todas las direcciones y se limitó el desplazamiento en la dirección "y" en el área longitudinal del alma de la viga de acero. El modelo de carga implicó la aplicación de desplazamientos controlados sobre la cara superior del perfil.

Para concluir, se llevó a cabo una comparación entre la máxima respuesta estructural obtenida en la simulación numérica y la carga de falla experimental. Los resultados son los siguientes:

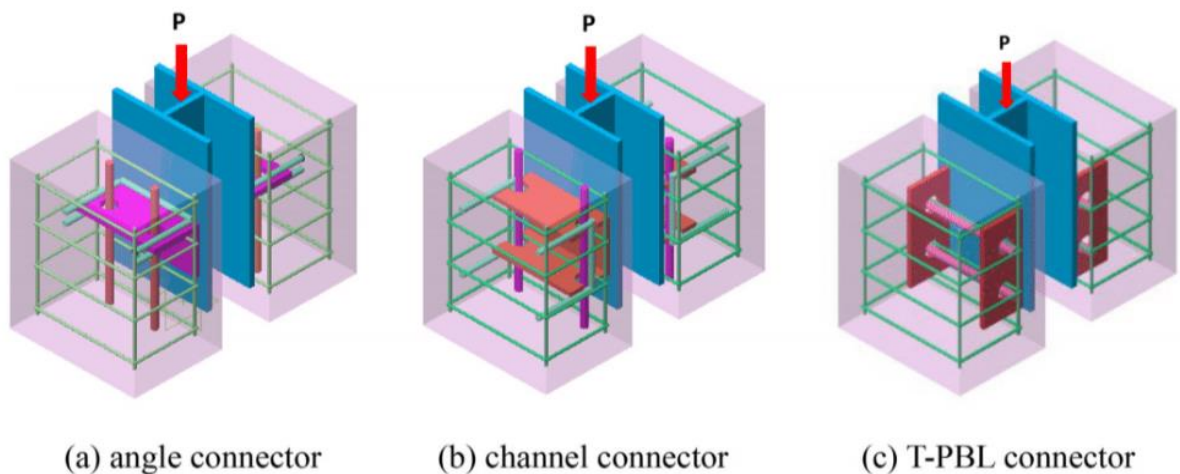
En los modelos con diámetro de tornillo de 5/8", se evidenció un margen de error en los resultados que osciló entre el 5% y el 15%. En los modelos con diámetro de tornillo de 1/2", se observó un margen de error en los resultados que varió entre el 4% y el 16%. Por último, en los modelos con diámetro de tornillo de 3/4", se demostró un margen de error en los resultados que fluctuó entre el 8% y el 26%.

1.2.2. Investigaciones Internacionales

1.2.2.1. Deng, 2019

El autor propone un nuevo tipo de conector de corte el conector de canal. Se llevaron a cabo pruebas de empuje en tres grupos de 12 muestras de conectores de corte bajo cargas monótonas y repetidas, y se comparó y analizó el comportamiento estático y de fatiga de los tres diferentes conectores de corte. El estudio comprendió ensayos experimentales y simulación numérica mediante el programa de análisis ABAQUS, donde simuló tres grupos de 4 muestras de conectores tipo ángulo, canal y T-PBL. Por grupo se realizó una prueba con carga repetida y tres con carga monótona.

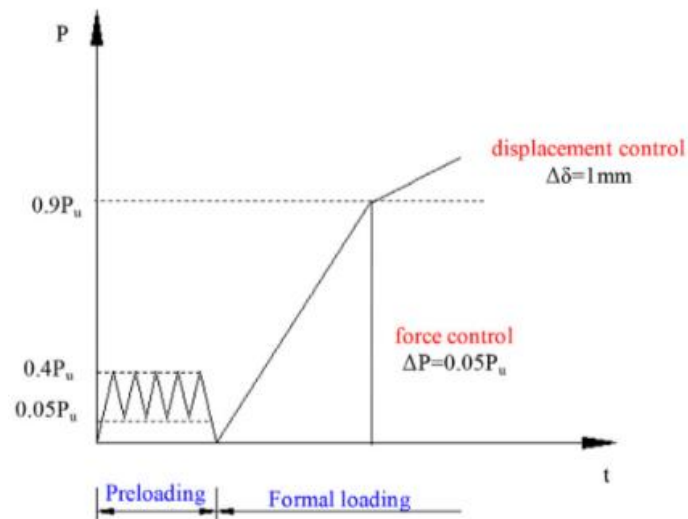
Figura 24. Especímenes de estudio: (a) Conector Ángulo, (b) Conector Canal, (c) Conector T-PBL.



Fuente: (Deng, 2019).

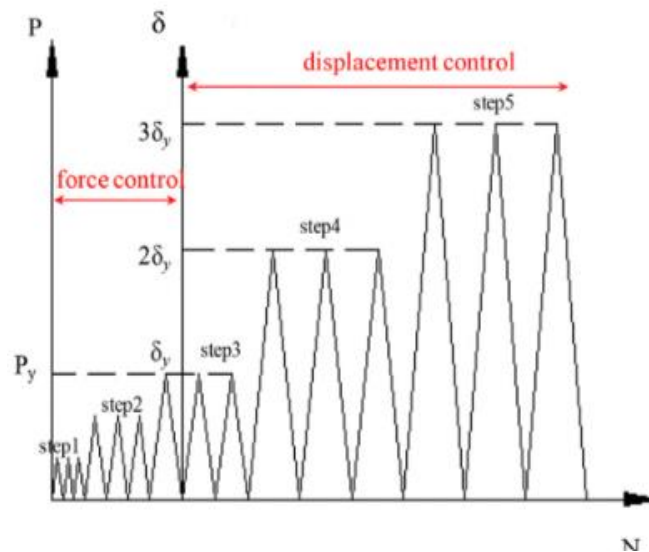
Se empleó un modelo constitutivo específico para los materiales en estudio, siendo el modelo elástico-plástico seleccionado para describir la relación constitutiva de placas de acero y barras de acero. Para el concreto, se optó por el modelo de daño plástico, y la relación tensión-deformación uniaxial se derivó de la curva recomendada en el Apéndice C.2.3 del Código GB50010-2010. En cuanto a la interacción entre elementos, se implementó una unión dura entre las barras de refuerzo y el hormigón.

Figura 25. Modelo de Carga Monótona.



Fuente: (Deng, 2019).

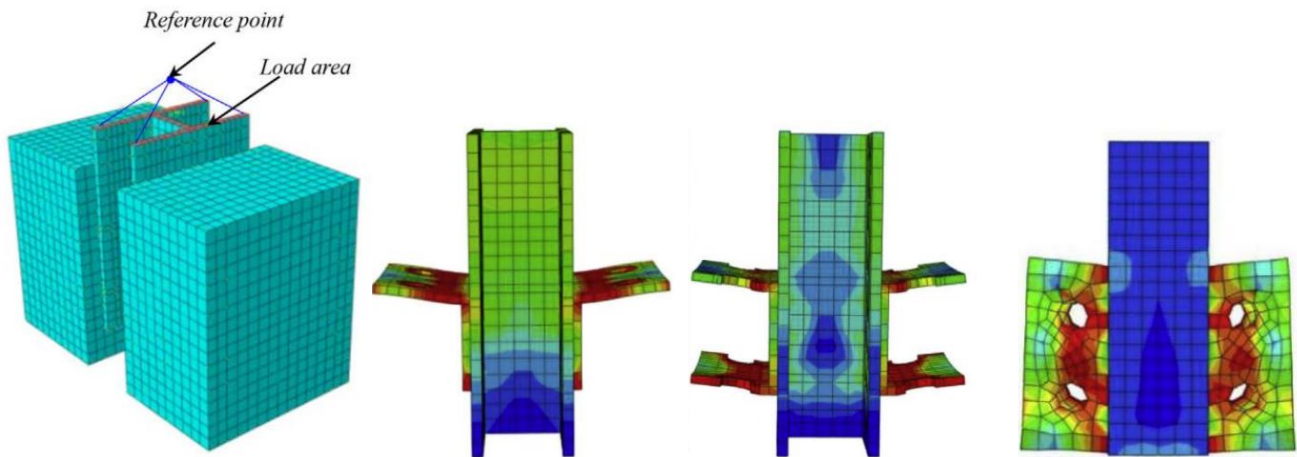
Figura 26. Modelo de Carga Repetida.



Fuente: (Deng, 2019).

Para todos los componentes del sistema se utilizó el elemento finito C3D8R y un elemento de armadura T3D2 para las barras de refuerzo. Con relación al modelo de carga, se aplicó una carga uniforme en la dirección vertical (Z) sobre la parte superior del acero. En cuanto a las condiciones de contorno, se limitaron las traslaciones de las caras 1 y 2 del perfil de acero en forma de I en ambas direcciones (XY). Además, se implementó una restricción en la parte inferior del bloque de hormigón.

Figura 27. Discretización de los especímenes: (a) Vigueta y Concreto (a) Conector Ángulo, (b) Conector Canal, (c) Conector T-PBL.



Fuente: (Deng, 2019).

En el estudio, se encontró que los conectores de canal tienen la mayor capacidad de carga, seguidos por los conectores en ángulo y, finalmente, los conectores T-PBL. La degradación de la rigidez es más lenta en los conectores de canal, mientras que es más rápida en los conectores en ángulo y T-PBL. Además, los conectores T-PBL exhiben la mayor disipación de energía, mientras que los conectores en ángulo y de canal tienen la misma capacidad en este aspecto.

1.2.2.2. Tahmasbi, 2016

Esta investigación se centró en el estudio del comportamiento de conectores de cortante, tanto en forma de C como en forma de L, mediante ensayos realizados a ocho probetas de sistemas compuestos. Estas muestras estaban compuestas por dos losas de concreto reforzado, una vigueta I de acero IPE270 y dos conectores de cortante. El acero estructural fue de grado ST37, con un límite elástico de 240 MPa. Se propuso un modelo de elementos finitos para simular las pruebas de empuje de estos conectores de corte, incorporando un análisis no lineal de los materiales, con el uso de ABAQUS.

El bloque de hormigón, la viga de acero y los conectores de corte fueron discretizados con el elemento sólido C3D8R. La carga se aplicó a cada muestra con una máquina de ensayo universal de 1000 kN de capacidad usando control de desplazamiento con una velocidad de 0,1 mm/s para todas las

muestras. Se aplicó carga monótona continuamente hasta que la muestra claramente comenzó a fracturarse y fallar.

Figura 28. Conectores de Cortante usados en la Investigación de (Tahmasbi, 2016).

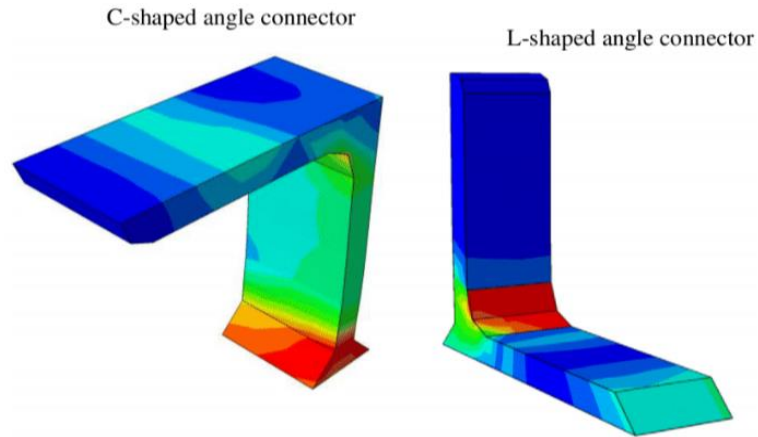
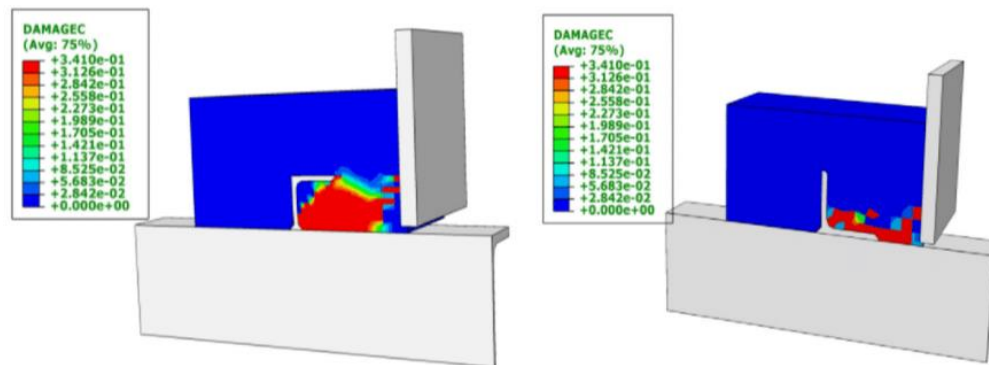


Figura 29. Modelo en Elementos Finitos de la Investigación de (Tahmasbi, 2016).



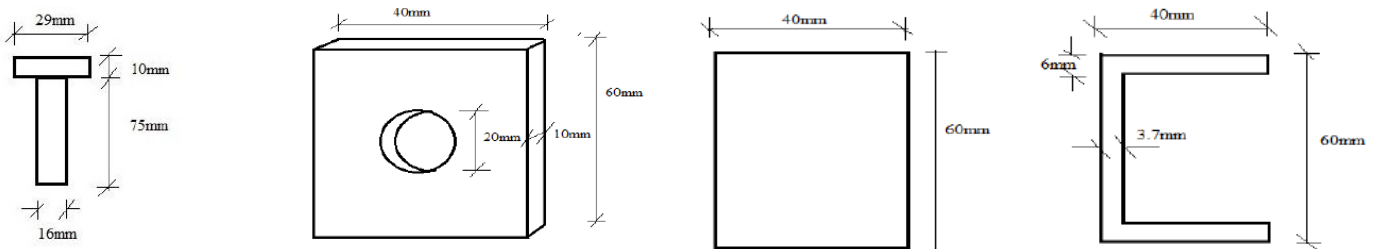
Como resultado el análisis de elementos finitos también confirma los resultados de la prueba de aumentar la longitud del conector de corte aumenta proporcionalmente su resistencia al corte. Se observa que el máximo esfuerzo en los conectores angulares en L se produce en la unión soldada a la viga, mientras que en los conectores angulares en C es en el ala unida.

1.2.2.3. Anju, 2016

El autor lleva a cabo un estudio de secciones compuestas que comprende losa de concreto, viga de acero y cuatro tipos de conectores con el objetivo de determinar cuál ofrece el mejor rendimiento bajo carga estática. Se utilizó un análisis estático no lineal a través del programa de análisis estructural Ansys.

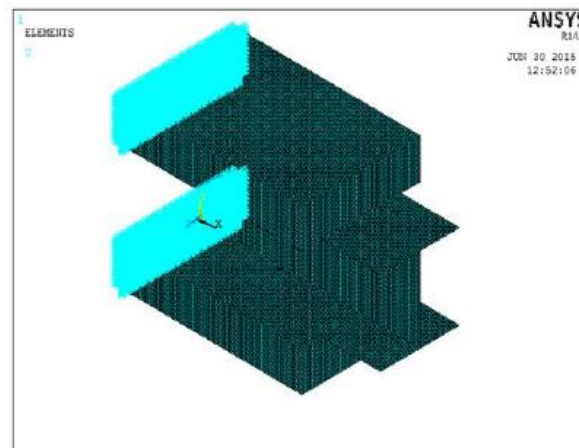
El modelo de análisis se conformó con una viga de acero tipo I (454x100x254 mm) con $E = 200$ GPa, y una losa de concreto de 100 mm con $E = 29$ GPa. Respecto a los conectores, se evaluaron los tipos perno, canal, T y Perfobond.

Figura 30. Conectores de Cortante usados en la Investigación de (Anju & Smitha, 2016).



En lo que respecta a los elementos finitos, se empleó el elemento SOLID 65 para modelar la losa de concreto, mientras que el BEAM 189 fue utilizado para representar los conectores de perno. Para la sección de acero y otros conectores, se optó por el elemento SHELL 63. El modelo de carga consistió en la aplicación de desplazamientos con incrementos de carga distribuidos uniformemente de 50,7 kN, evaluándose para cada conector hasta alcanzar una carga de 254 kN.

Figura 31. Modelo de Elementos Finitos usado en la Investigación de (Anju & Smitha, 2016).



Según los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos de los diferentes tipos de conectores de corte, se puede concluir que el conector de corte tipo canal exhibe menos desplazamiento en comparación con los otros tipos. Por el contrario, el conector tipo Perfobond muestra el desplazamiento máximo más alto para la carga dada. Estos hallazgos sugieren que el conector tipo canal podría ser más eficiente en términos de resistencia y comportamiento bajo carga estática en comparación con el tipo Perfobond y otros conectores evaluados.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un modelo matemático que describa el comportamiento inelástico del sistema de entrepiso steeldeck con conectores de cortante tipo canal y viguetas en celosía, bajo la acción de cargas estáticas y considerando deformaciones infinitesimales.

1.3.2. Objetivos Específicos

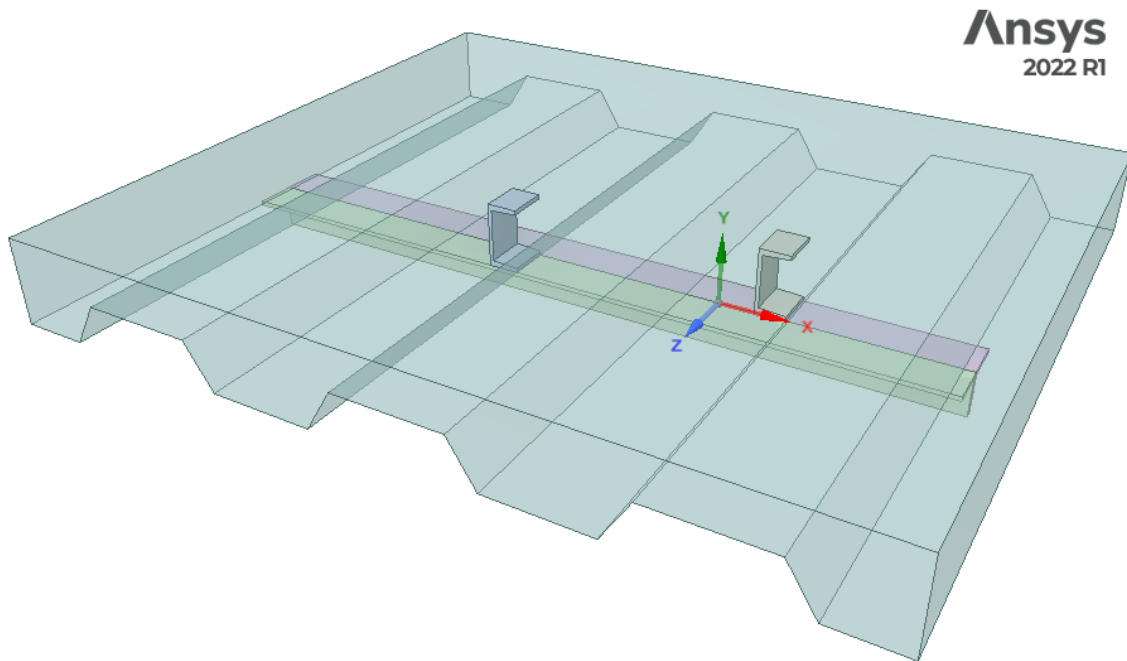
- Formular un modelo matemático determinista para el sistema de entrepiso steeldeck con conectores de cortante tipo canal y viguetas en celosía, a partir de la geometría de los componentes y los modelos constitutivos de los materiales.
- Validar el modelo matemático determinista a través de la comparación entre los resultados experimentales y las simulaciones por elementos finitos del ensayo de corte directo de probetas del sistema de entrepiso steeldeck con conectores a cortante tipo canal y viguetas en celosía.
- Desarrollar un modelo estocástico que permita incorporar la variabilidad de las propiedades mecánicas del concreto y el acero durante la simulación del sistema compuesto. Con el propósito de obtener un intervalo de confianza para la respuesta mecánica del sistema.
- Evaluar y predecir numéricamente la influencia de las variables del sistema de entrepiso steeldeck mediante la aplicación del modelo matemático en la simulación de nuevas configuraciones.

Capítulo 2

Modelo Determinista

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación mediante el método de elementos finitos de las probetas experimentales ensayadas en la investigación de (Rodríguez R. M., 2019). Se detalla el preproceso que incluye la descripción de la configuración geométrica de los modelos, los modelos constitutivos y las propiedades mecánicas de los materiales, así como la generación de la malla, los modelos para las interfaces, las condiciones de frontera, el modelo de carga y los resultados.

Figura 32. Probeta Tipo para simular el Ensayo de Corte Directo.



2.1. Recopilación de Datos Experimentales

A continuación, se describen las configuraciones geométricas y las propiedades mecánicas de los materiales que fueron utilizadas para la modelación en elementos finitos, las cuales se obtuvieron a partir de los ensayos realizados en la investigación de (Rodríguez R. M., 2019).

Tabla 1. Geometría de Probetas Experimentales.

Serie	Lámina Colaborante	Concreto (MPa)	Altura Losa (mm)	Conector	Longitud del Conector	Cantidad de Probetas
1	2"	21,1	100	3"	50	4
2	2"	21,1	100	3"	113	3
3	2"	21,1	150	3"	50	3
4	2"	21,1	150	3"	113	3
5	3"	21,1	130	4"	50	3
6	3"	21,1	130	4"	113	3
7	3"	21,1	150	4"	50	3
8	3"	21,1	150	4"	113	3

Fuente: (Rodríguez R. M., 2019).

Tabla 2. Resultados de Ensayos a Compresión del Concreto.

Cilindro	Área (mm ²)	Días	Resistencia (MPa)
1	8107,32	15	20,27
2	8107,32	15	19,00
3	8107,32	22	20,33
4	8107,32	22	22,26
5	8107,32	46	25,41
6	8107,32	46	26,02
7	8107,32	46	22,63
8	8107,32	46	26,14
9	8107,32	46	27,1
10	8107,32	46	25,71
11	8107,32	46	24,87
12	8107,32	46	25,52

Fuente: (Rodríguez R. M., 2019).

Tabla 3. Resultados de Ensayos a Tensión del Acero.

Muestra	Carga de fluencia (kN)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Máxima carga (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Reducción de área (%)	Elongación (%)
C-3 in	21,52	367,8	29,94	511,8	46,8	33,6
C-4 in	22,11	327,6	32,24	477,6	41,6	29,2
Ángulo 2x3/16 in	31,38	428	41,41	564,7	43,6	18,4

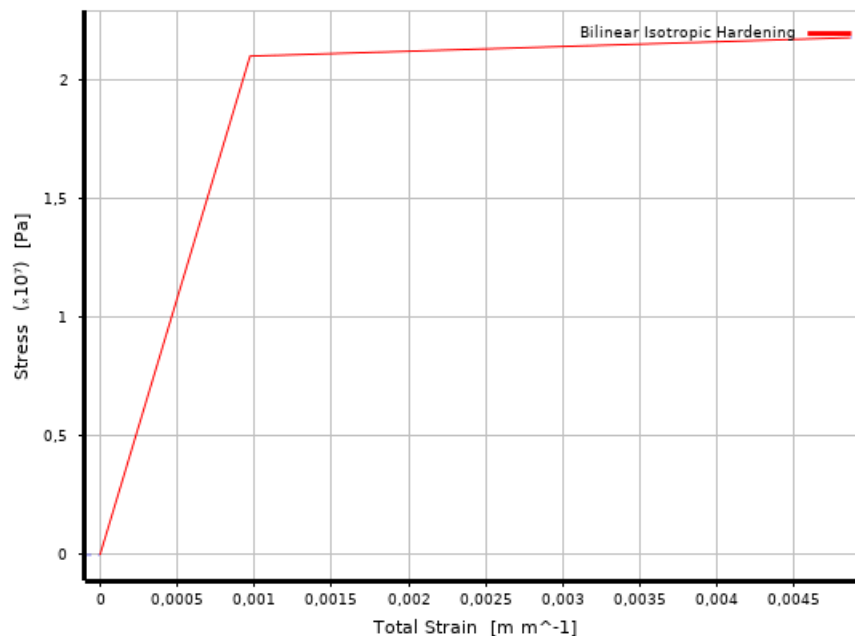
Fuente: (Rodríguez R. M., 2019).

2.2. Modelos Constitutivos de los Materiales

Se presentan los modelos que se utilizaron en el proceso de calibración, con el objetivo de identificar el modelo óptimo que se empleó en la simulación de las probetas en el modelo determinista y estocástico.

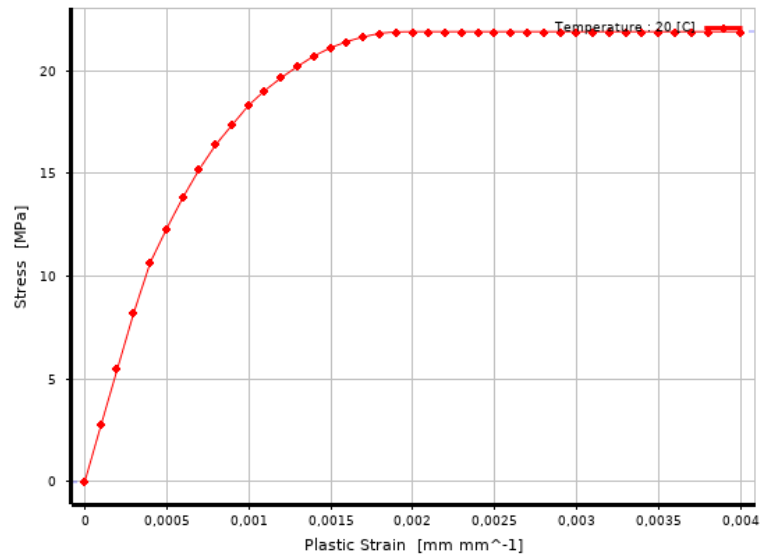
2.2.1. Concreto

2.2.1.1. Endurecimiento Isotrópico Bilineal

**Figura 33.** Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Bilineal del Concreto.

2.2.1.2. Endurecimiento Isotrópico Multilineal

Figura 34. Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal del Concreto.



Fuente: (ANSYS, 2022).

2.2.1.3. Modelo de Drucker Prager

```

/prep7
! ELASTIC CONSTANTS
MP,EX,1,23.0E9
MP,NUXY,1,0.2
! Base Drucker-Prager concrete
Rc=24.0E6 ! uniaxial compressive strength
Rt=3.40E6 ! uniaxial tensile strength
Rb=28.0E6 ! biaxial compressive strength
delta_c=1.0 ! dilatancy factor tension
delta_t=1.0 ! dilatancy factor compression
! Linear hardening/softening
kappa_cm=0.0025-Rc/23.0E9
kappa_cr=0.01
omega_ci=0.35
omega_cr=0.2
kappa_tr=0.0005
omega_tr=0.2
TB,CONCR,1,,DP
TBDATA,1,Rc,Rt,Rb
TB,CONCR,1,,DILA
TBDATA,1,delta_t,delta_c
TB,CONCR,1,,HSD6
TBDATA,1,kappa_cm,kappa_cr,omega_ci,omega_cr,kappa_tr,omega_tr

```

2.2.1.4. Modelo de Menetrey Willam

```

/prep7
! ELASTIC CONSTANTS
MP,EX,1,23.0E9
MP,NUXY,1,0.2
! base Menetrey-Willam concrete
Rc=24.0E6 ! uniaxial compressive strength
Rt=3.40E6 ! uniaxial tensile strength
Rb=28.0E6 ! biaxial compressive strength
psi=30 ! dilatancy angle
! linear hardening softening
kappa_cm=0.0025-Rc/23.0E9
kappa_cr=0.01
omega_ci=0.35
omega_cr=0.2
kappa_tr=0.0005
omega_tr=0.2
TB,CONCRETE,1,,MW
TBDATA,1,Rc,Rt,Rb
TB,CONCRETE,1,,DILA
TBDATA,1,psi
TB,CONCRETE,1,,HSD6
TBDATA,1,kappa_cm,kappa_cr,omega_ci,omega_cr,kappa_tr,omega_tr

```

2.2.1.5. Modelo de Microplano

```

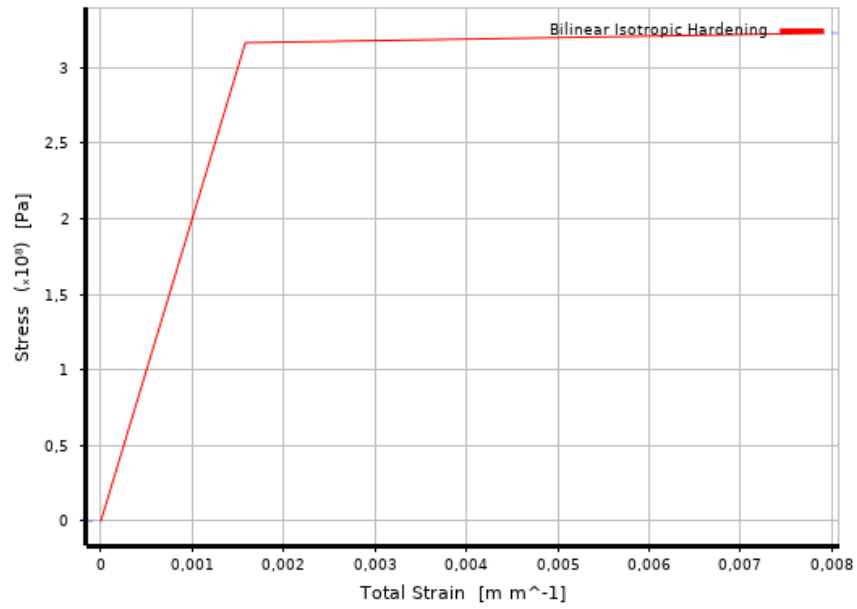
/prep7
ET,1,215
KEYO,1,18,2
E = 23000
nu = 0.2
fuc = 24
fbc = 28
fut = 3.4
Rt = 1
D = 20e4
sigVc = -40
R = 2
c = 1500
m = 2.5
gamt0 = 0
gamc0 = 5e-5
betat = 6000
betac = 4000
! Define elastic properties of material
MP,EX,1,E
MP,NUXY,1,nu
! Define microplane model properties
TB,MPLA,1,,DPC
TBDATA,1,fuc,fbc,fut,Rt,D,sigVc
TBDATA,7,R,gamt0,gamc0,betat,betac
TB,MPLA,1,,

```


2.2.2. Acero

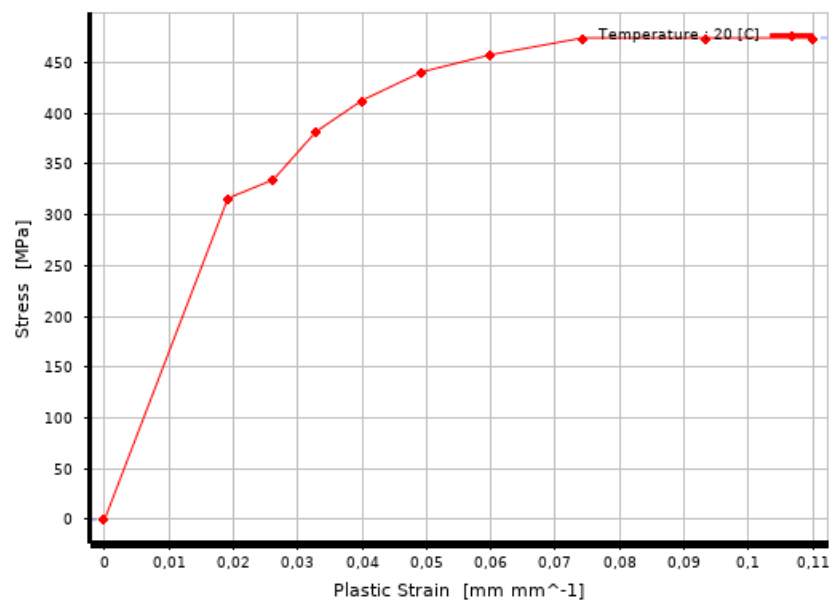
2.2.2.1. Endurecimiento Isotrópico Bilineal

Figura 35. Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Bilineal del Acero.



2.2.2.2. Endurecimiento Isotrópico Multilineal

Figura 36. Curva Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal del Acero.



2.3. Construcción de los Modelos de Calibración

2.3.1. Modelo de Calibración No. 1

En este modelo de calibración se realizó la modelación del conector de cortante tipo canal. Se llevo a cabo una serie de iteraciones con el objetivo de estudiar la influencia del tipo de elemento finito, el tamaño del elemento finito y el modelo constitutivo del acero en la precisión de los resultados.

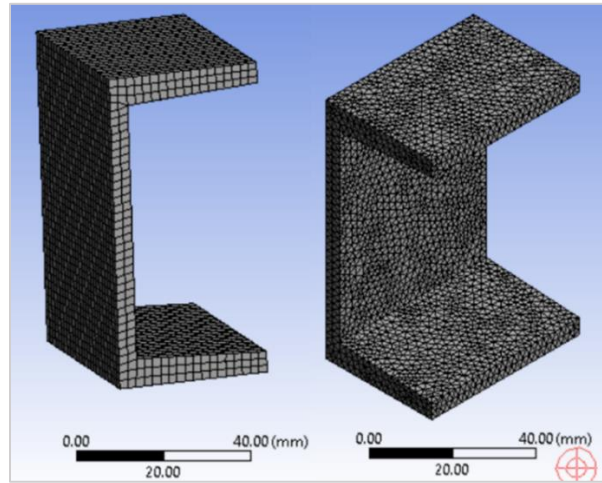
Tabla 4. Datos de Entrada para la Calibración No. 1.

Calibración No. 1	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	328 MPa
Módulo de Young	200000 MPa
Módulo Tangente	1450 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Bilineal
	Isotrópico Multilineal

2.3.1.1. Geometría/Mallado

Se generó un mallado para la geometría del conector utilizando elementos finitos tetraédricos (TETRA) y hexaédricos (HEXA). El tamaño del elemento finito se varió en un rango de 2 a 10 mm mediante iteraciones. Los modelos constitutivos utilizados fueron Endurecimiento Isotrópico Bilineal (EIB) y Endurecimiento Isotrópico Multilineal (EIM).

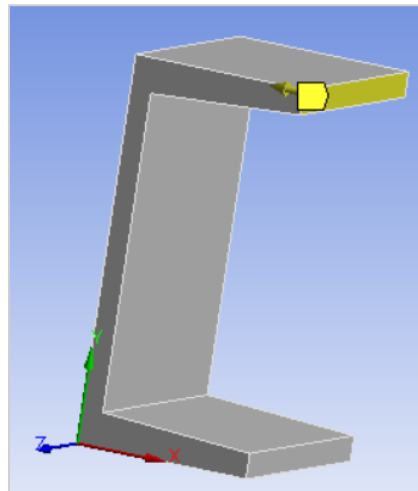
Figura 37. Geometría y Mallado del Modelo de Calibración No. 1.



2.3.1.2. Modelo de Carga y Apoyo

Se aplicaron desplazamientos graduales en la cara superior del conector, distribuidos a lo largo de diferentes subpasos. Además, se proporcionó un apoyo fijo en la base.

Figura 38. Modelo de Carga Calibración No. 1.



2.3.1.3. Resultados

Para el modelo que incorporo elementos hexaédricos (HEXA) y utiliza los modelos constitutivos de Endurecimiento Isotrópico Bilineal (EIB) y Multilineal (EIM) , se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 39. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - HEXA – EIB.

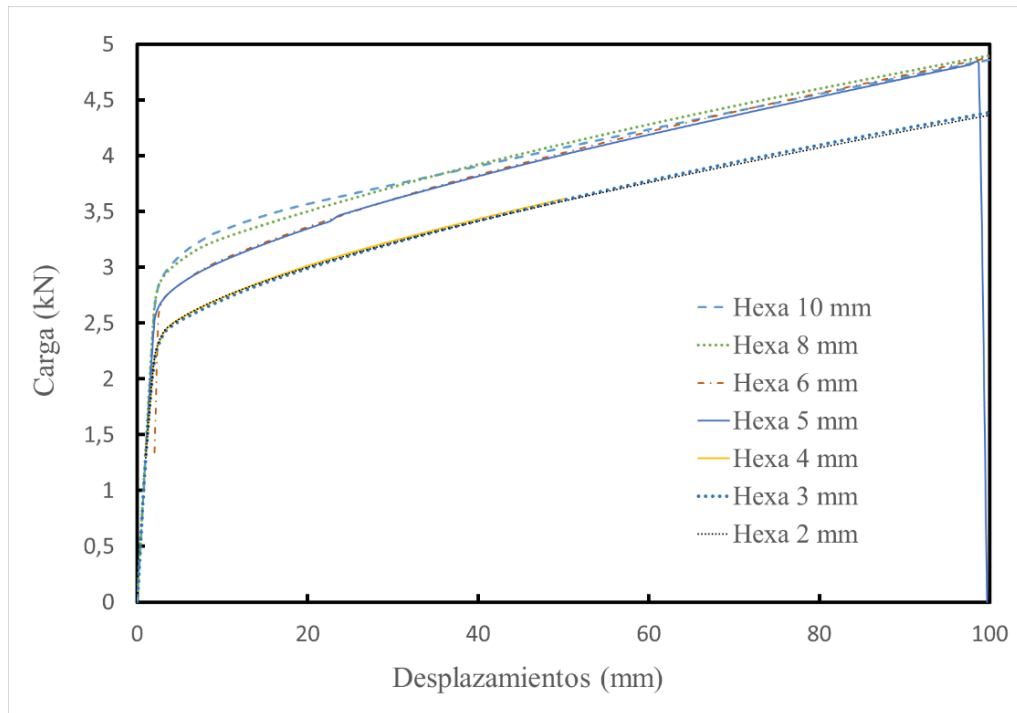
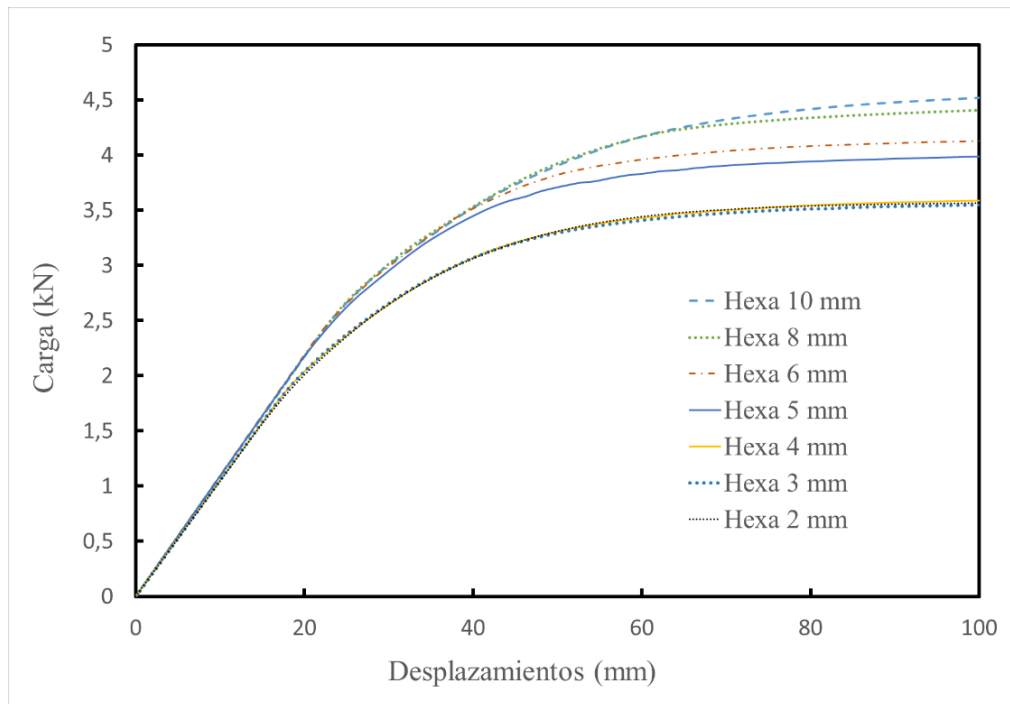


Figura 40. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - HEXA – EIM.



Para el modelo que incorpora elementos tetraédricos (TETRA) y utiliza los modelos constitutivos de Endurecimiento Isotrópico Bilineal (EIB) y Multilineal (EIM), se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 41. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - TETRA – EIB.

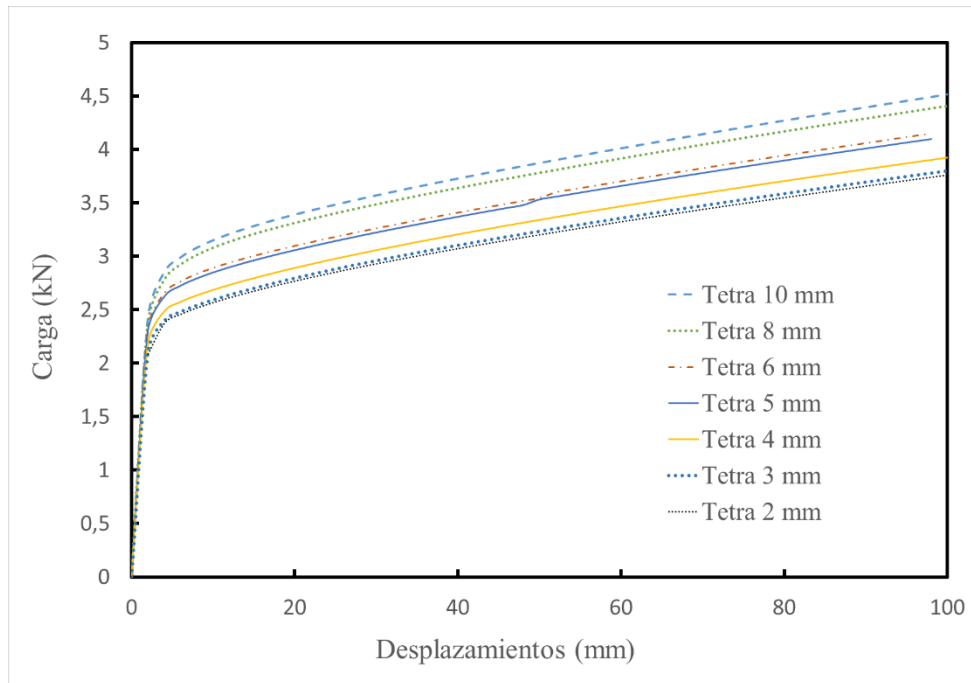
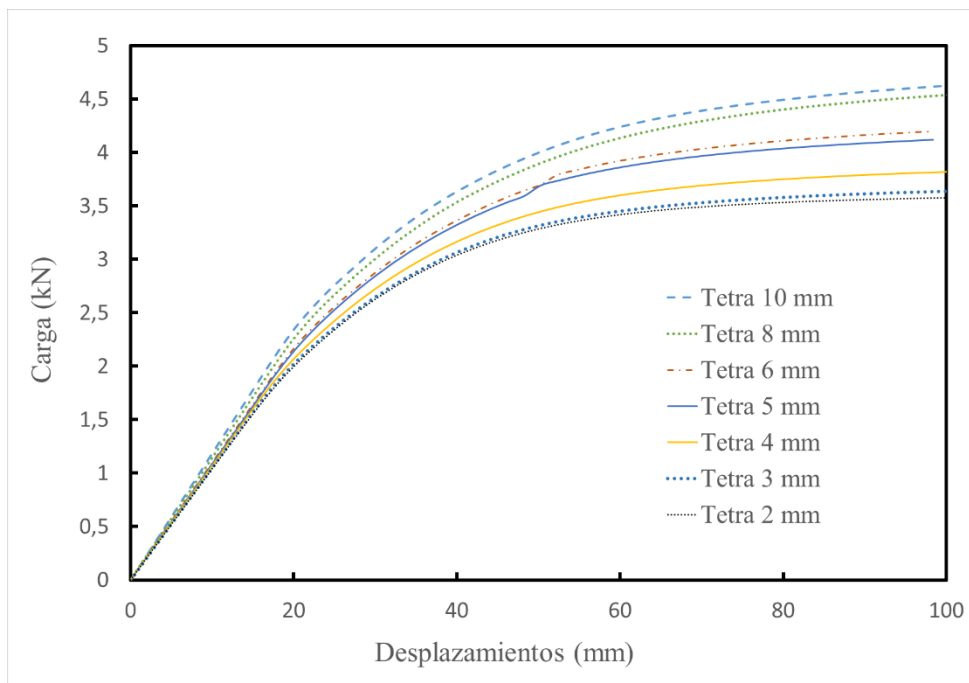
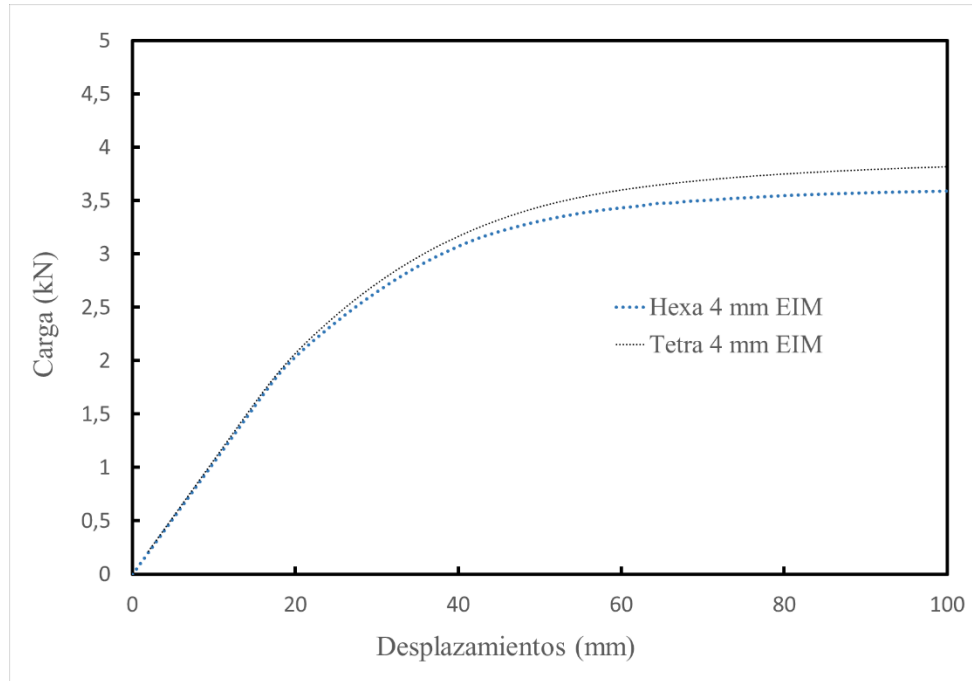


Figura 42. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - TETRA – EIM.



Curva comparativa resultado de la simulación con el modelo constitutivo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal (EIM), utilizando elementos tetraédricos (TETRA) y hexaédricos (HEXA), con un tamaño de elemento constante de 4 mm.

Figura 43. Curva comparativa - Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Calibración No. 1.



2.3.1.4. Conclusión

Según los resultados obtenidos en la calibración No. 1, se puede afirmar que la respuesta del sistema se mantuvo similar, ya sea que se utilizara una malla con elementos tipo tetraédricos o hexaédricos para discretizar el conector de cortante. Cabe destacar que el tiempo de análisis en la malla estructurada con hexaedros fue menor, ya que involucra una menor cantidad de elementos y nodos. Además, se identificó que el modelo constitutivo que mejor se ajustó al comportamiento del acero fue el Endurecimiento Isotrópico Multilineal. Por último, se observó que los resultados del sistema no experimentaron grandes variaciones si se utiliza un tamaño de elemento en el conector dentro del rango de 2 a 4 mm.

2.3.2. Modelo de Calibración No. 2

En este modelo de calibración se incorporó la modelación conjunta del conector de cortante tipo canal y una sección de la losa de concreto. Se llevó a cabo una serie de iteraciones cuyo propósito era investigar la influencia de las variables en los resultados, particularmente cuando había confinamiento del concreto. Entre las variables consideradas se encontraron el tipo de elemento finito y el modelo constitutivo del concreto.

Tabla 5. Datos de Entrada para la Calibración No. 2.

Calibración No. 2	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	328 MPa
Módulo de Young	200000 MPa
Módulo Tangente	1540 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Resistencia a la Compresión	24 MPa
Módulo de Young	23000 MPa
Altura de la Losa	100 mm
Modelo Constitutivo	Isotrópico Bilineal Isotrópico Multilineal

2.3.2.1. Geometría/Mallado/Interfaz

La geometría del modelo fue mallada con elementos finitos tetraédricos y hexaédricos, empleando un coeficiente de fricción de 0.45 en la interfaz de contacto concreto-acero. En cuanto al tamaño de los elementos finitos, se utilizó un tamaño de 5 mm para el conector y de 30 mm para la losa de concreto, aplicando un refinamiento de malla en el contacto entre ambos materiales.

Figura 44. Geometría y Mallado del Modelo de Calibración No. 2.

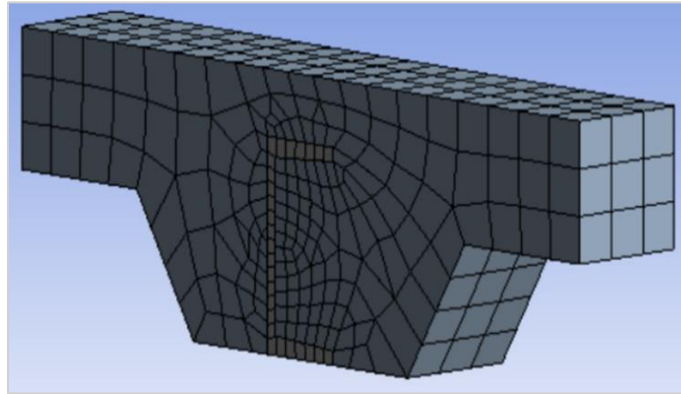
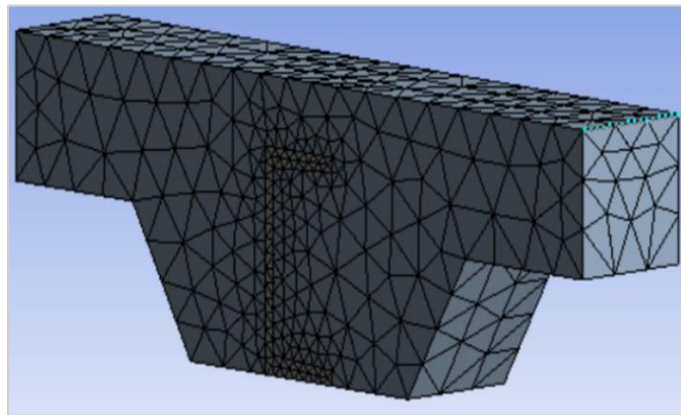


Figura 45. Geometría y Mallado del Modelo de Calibración No. 2.



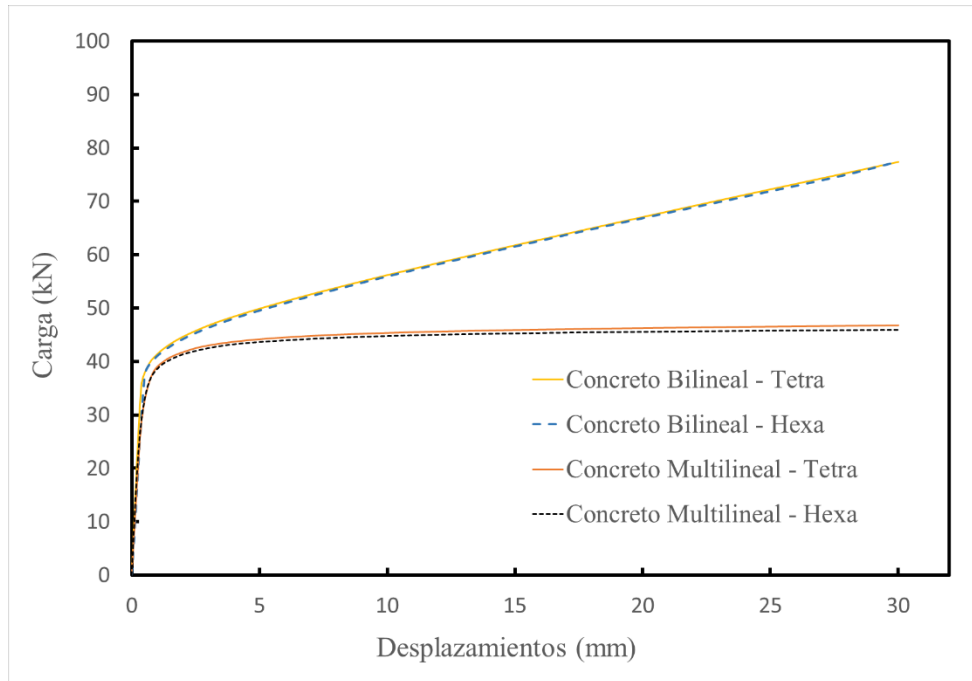
2.3.2.2. Modelo de Carga

En la base del conector se aplicaron desplazamientos graduales en el pasado, distribuidos en varios subpasos con el fin de obtener una mayor cantidad de resultados. Además, se estableció un apoyo fijo en la cara lateral derecha de la sección de la losa de concreto.

2.3.2.3. Resultados

A continuación, se presenta la gráfica comparativa del resultado de las simulaciones con modelos constitutivos de Endurecimiento Isotrópico Bilineal (EIB) y Multilineal (EIM) para el concreto.

Figura 46. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) Calibración No. 2.



2.3.2.4. Conclusión

De acuerdo con los resultados de la calibración No. 2, donde se compararon mallas de elementos tipo tetraédricos y hexaedros para la sección de la losa de concreto, se observan resultados iguales. El modelo constitutivo que mejor describió el comportamiento del concreto fue el Endurecimiento Isotrópico Multilineal ya que el Bilineal tiene comportamiento creciente debido al Módulo Tangente.

2.3.3. Modelo de Calibración No. 3

Se modeló el conector de cortante tipo canal junto con una sección de la losa de concreto circundante al conector. Este enfoque se implementó con el objetivo de explorar la respuesta del sistema en situaciones donde el concreto está confinado en una extensión más amplia. Se analizaron variables que incluían el tamaño de los elementos finitos y el modelo constitutivo del concreto, considerando la disminución de resistencia debido al inicio de la fisuración.

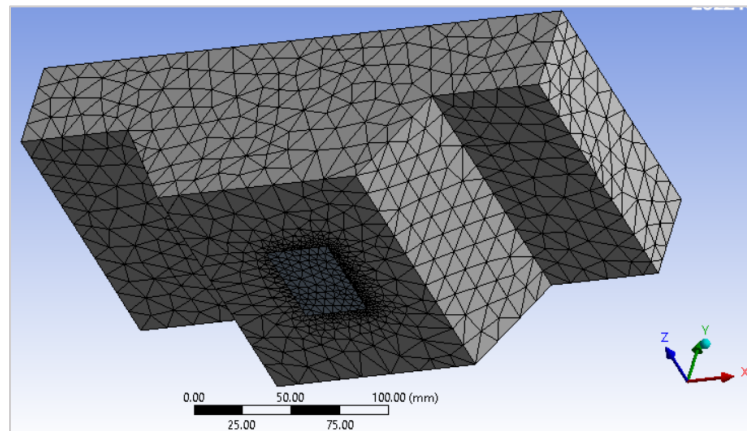
Tabla 6. Datos de Entrada para la Calibración No. 3.

Calibración No. 3	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	328 MPa
Módulo de Young	200000 MPa
Módulo Tangente	1540 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Resistencia a la Compresión	24 MPa
Módulo de Young	23000 MPa
Altura de la Losa	100 mm
	Isotrópico Bilineal
	Isotrópico Multilineal
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam
	Drucker Prager

2.3.3.1. Geometría/Mallado/Interfaz

El mallado se realizó mediante elementos finitos tetraédricos, empleando un coeficiente de fricción de 0.45 en la interfaz entre los dos materiales. Respecto al tamaño de los elementos finitos, se aplicó un tamaño de 5 mm en el conector. En la losa de concreto, se llevó a cabo un refinamiento, estableciendo un tamaño de 5 mm en la región de contacto con el conector y de 30 mm en el resto del área.

Figura 47. Geometría y Mallado del Modelo de Calibración No. 3.



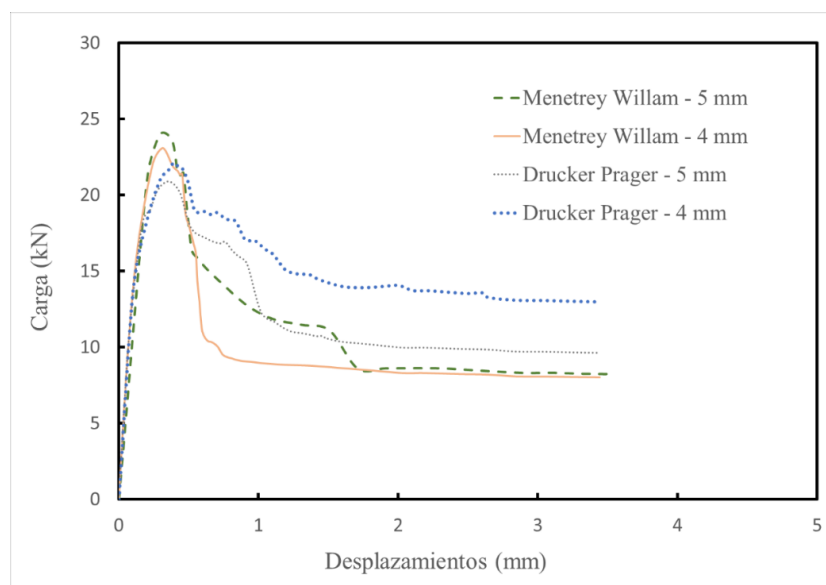
2.3.3.2. Modelo de Carga

En la base del conector se aplicaron desplazamientos graduales en el pasado, distribuidos en varios subpasos con el fin de obtener una mayor cantidad de resultados. Además, se estableció un apoyo fijo en la cara lateral derecha de la sección de la losa de concreto.

2.3.3.3. Resultados

A continuación, se presenta la gráfica comparativa de los resultados de las simulaciones con modelos constitutivos de Endurecimiento Isotrópico Bilineal y Multilineal para el concreto.

Figura 48. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Calibración No. 3.



2.3.3.4. Conclusión

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la calibración No. 3, se pudo afirmar que el modelo constitutivo que mejor se ajustó al comportamiento del concreto, específicamente en la etapa de disminución de rigidez debido a la fisuración, fue el modelo de Menetrey Willam. Es notable que los modelos constitutivos que incorporaron la fisuración del concreto mostraron resistencias máximas más bajas.

2.4. Preproceso

En esta sección se detallan los pasos para la creación del modelo de elementos finitos en el programa de análisis estructural Ansys Workbench. En primer lugar, se describieron los modelos constitutivos de los materiales. Posteriormente, se presenta la geometría utilizada, los contactos entre superficies, así como una descripción detallada de los elementos y herramientas empleadas para la generación de la malla de cada componente. Se aplicaron las condiciones de frontera, se definió la carga indicando su magnitud, dirección y ubicación.

2.4.1. Asignación de los materiales

Con base en los resultados de las calibraciones, se eligió el Modelo Constitutivo de Menetrey Willam para el concreto y el modelo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal para el acero, tanto de los conectores como de las viguetas. Se presentan las curvas Esfuerzo vs. Deformación utilizadas en el programa.

2.4.1.1. Conector Tipo Canal

Figura 49. Modelo del Conector Tipo Canal.

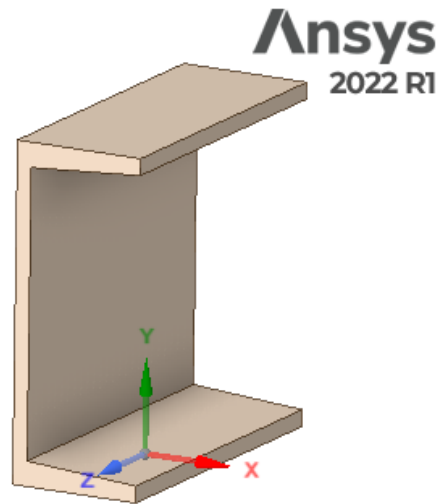


Figura 50. Curva Esfuerzo vs. Deformación para simular el Conector Tipo Canal de 3".

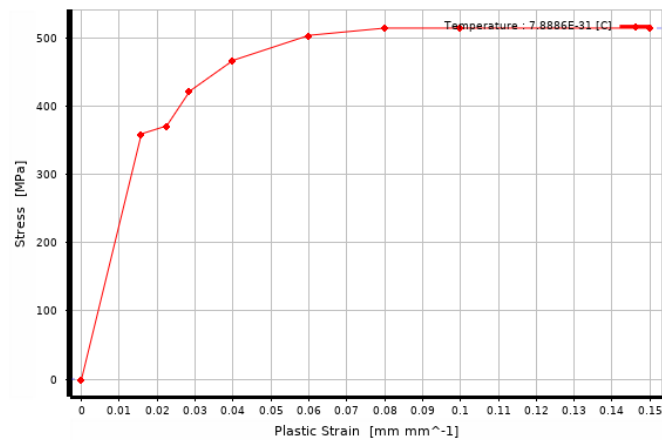
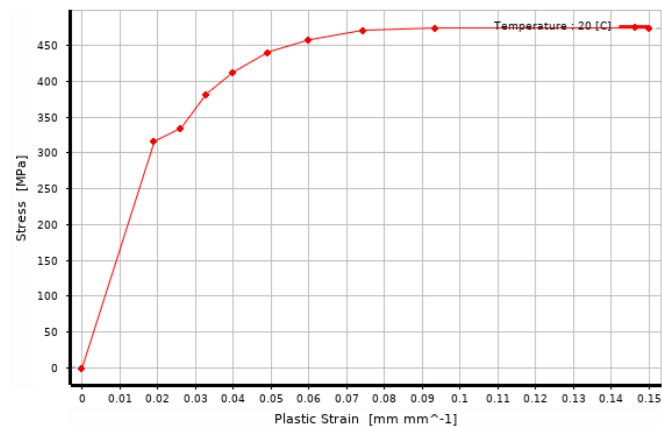


Figura 51. Curva Esfuerzo vs. Deformación para simular el Conector Tipo Canal de 4".



2.4.1.2. Vigueta Tipo Ángulo

Figura 52. Modelo de la Vigueta en Celosía.

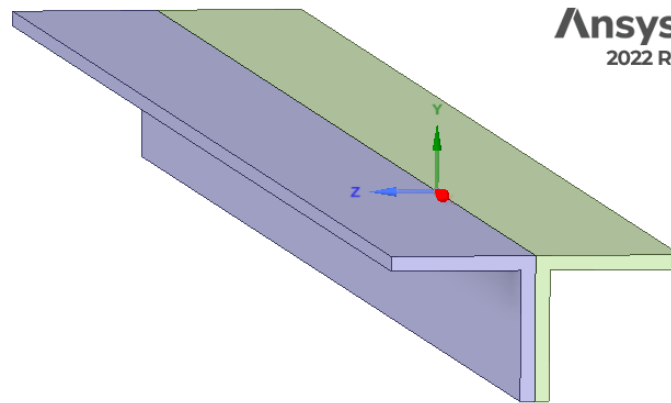
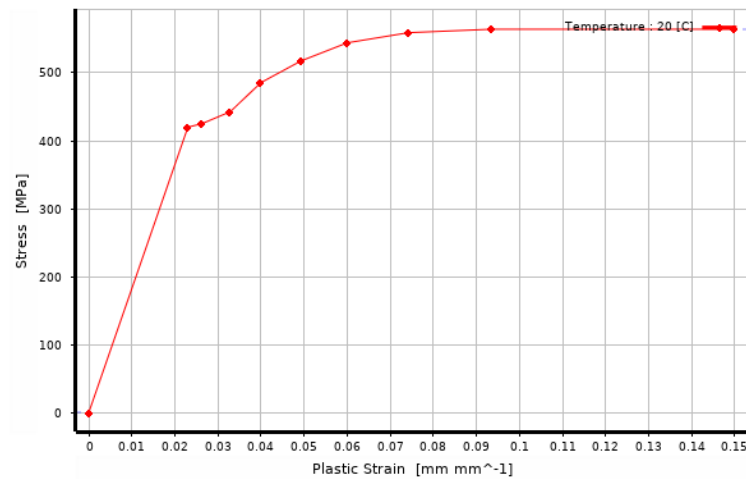
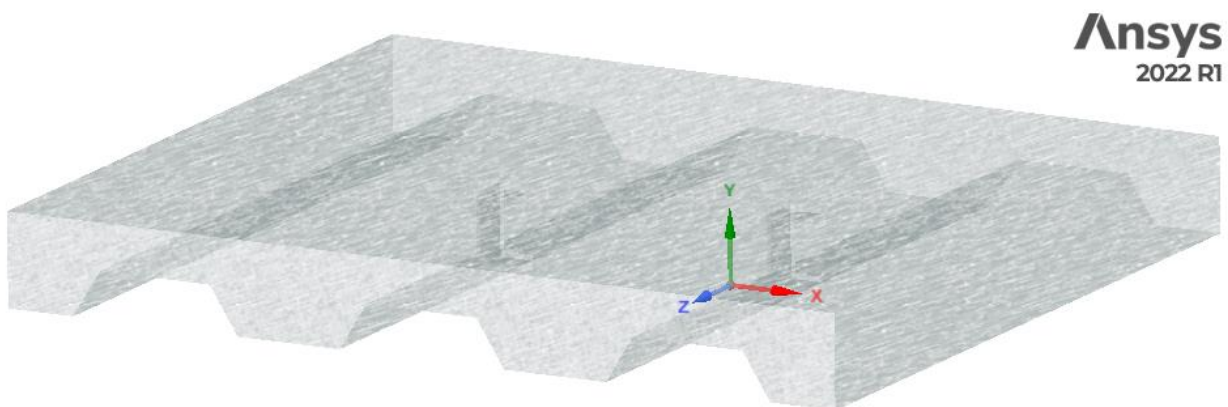


Figura 53. Curva Esfuerzo vs. Deformación para simular la Vigueta en Celosía.



2.4.1.3. Losa de Concreto

Figura 54. Modelo de la Losa en Concreto.



Fuente: (ANSYS, 2022).

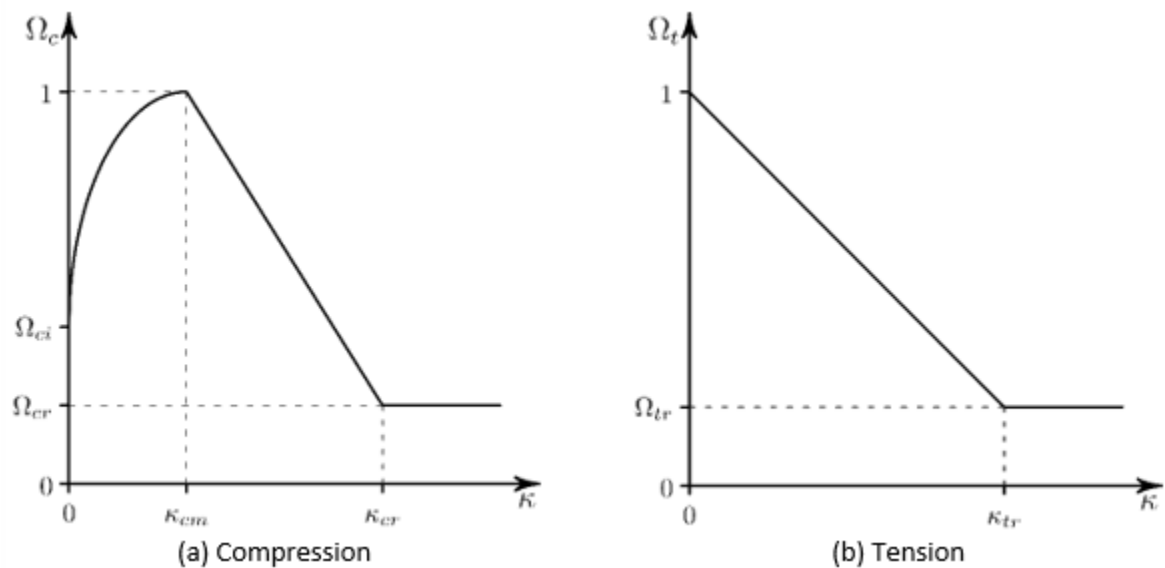
Figura 55. Definición del Modelo Constitutivo de Menetrey Willam.

```

/prep7
! ELASTIC CONSTANTS
MP,EX,1,23.0E9
MP,NUXY,1,0.2
! base Menetrey-Willam concrete
Rc=24.0E6 ! uniaxial compressive strength
Rt=3.40E6 ! uniaxial tensile strength
Rb=28.0E6 ! biaxial compressive strength
psi=30 ! dilatancy angle
! linear hardening softening
kappa_cm=0.0025-Rc/23.0E9
kappa_cr=0.01
omega_ci=0.35
omega_cr=0.2
kappa_tr=0.0005
omega_tr=0.2
TB,CONCRETE,1,,MW
TB,DATA,1,Rc,Rt,Rb
TB,CONCRETE,1,,DILA
TB,DATA,1,psi
TB,CONCRETE,1,,HSD6
TB,DATA,1,kappa_cm,kappa_cr,omega_ci,omega_cr,kappa_tr,omega_tr

```

Fuente: (ANSYS, 2022).

Figura 56. Ablandamiento Lineal en Compresión y Tracción para el Modelo de Menetrey Willam.

Fuente: (ANSYS, 2022).

2.4.2. Discretización de la geometría

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de la malla, comparando una malla estructurada para los hexaedros y una malla no estructurada para los tetraedros. A continuación, se presentan ambas estructuras de malla para los componentes del sistema compuesto, junto con la gráfica de calidad de los elementos finitos en función de las relaciones geométricas. La unidad representa una mayor calidad, mientras que 0 indicaba una menor calidad.

2.4.2.1. Discretización para el Conector de Cortante Tipo Canal

Se optó por emplear el elemento finito tipo tetraedro para la discretización de los conectores de cortante, decisión tomada tras un análisis de sensibilidad que evaluó la influencia del tipo de elemento y su tamaño. Este elemento se ajustó debido a la geometría irregular del componente. El elemento utilizado se representa mediante el sólido SOLID187, que cuenta con cuatro caras. Se llevó a cabo un análisis de primer orden, lo que implica el uso de 4 nudos. Este enfoque proporciona una mayor precisión en la representación de la geometría y deformaciones en comparación con los elementos hexaédricos de menor orden. El sólido utiliza funciones de forma trilineales tridimensionales basadas en coordenadas nodales para lograr una representación más precisa de deformaciones y esfuerzos.

Figura 57. Malla con Elementos tipo Hexaedros para el Conector de Cortante Tipo Canal.

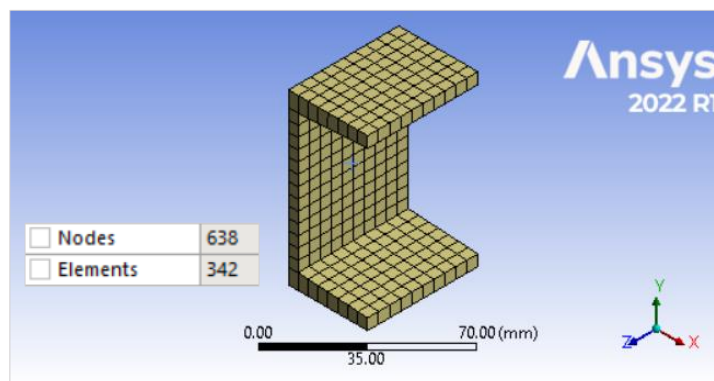


Figura 58. Calidad de los Elementos tipo Hexaedros en el Conector de Cortante Tipo Canal.

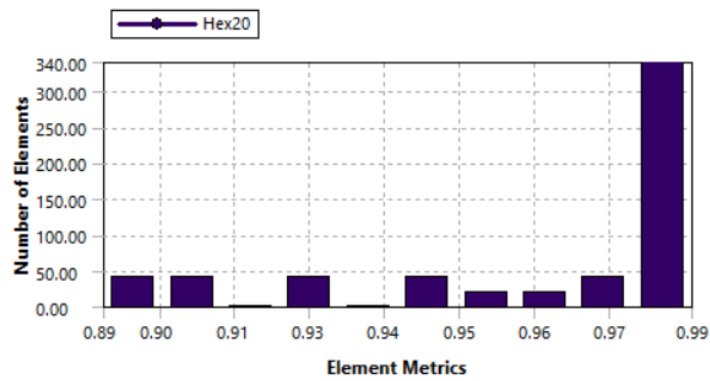


Figura 59. Malla con Elementos tipo Tetraedros para el Conector de Cortante Tipo Canal.

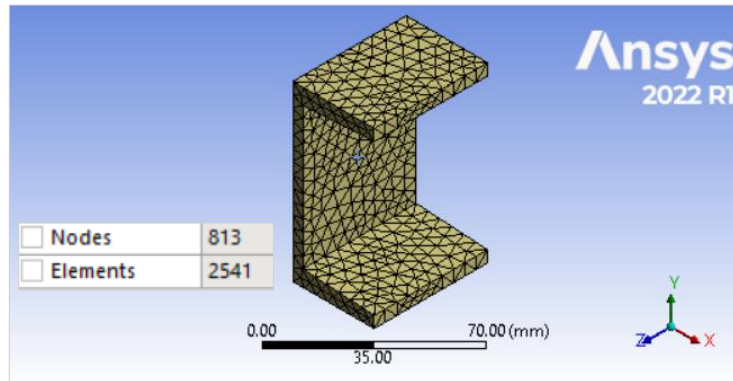
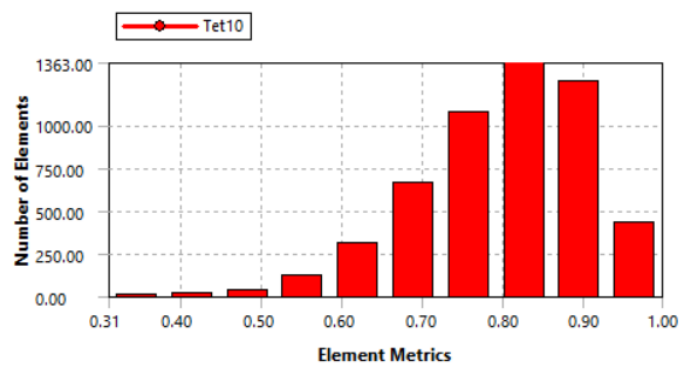


Figura 60. Calidad de los Elementos tipo Tetraedros en el Conector de Cortante Tipo Canal.



2.4.2.2. Discretización para la Vigueta en Celosía

Figura 61. Malla con Elementos tipo Tetraedros para la Vigueta en Celosía.

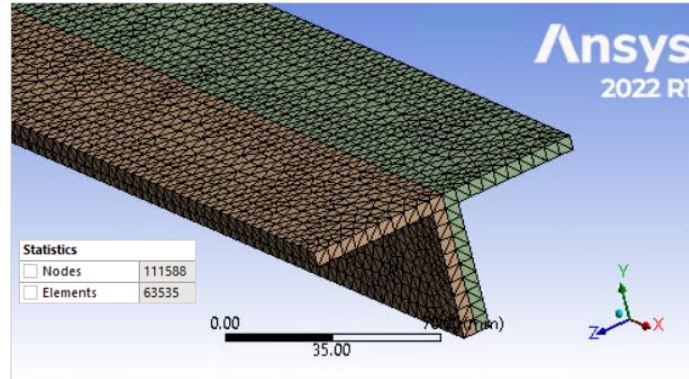


Figura 62. Calidad de los Elementos tipo Tetraedros en la Vigueta en Celosía.

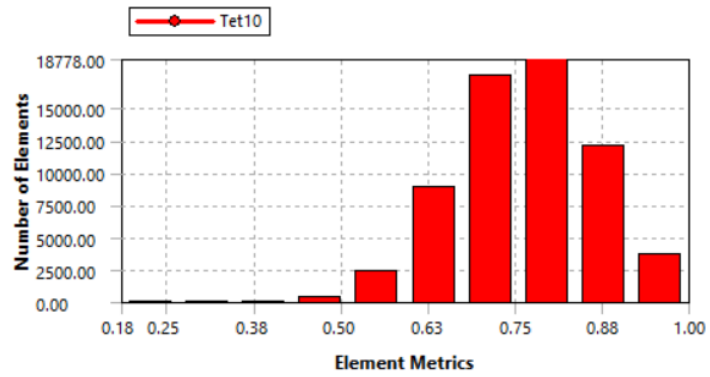


Figura 63. Malla con Elementos tipo Hexaedros para la Vigueta en Celosía.

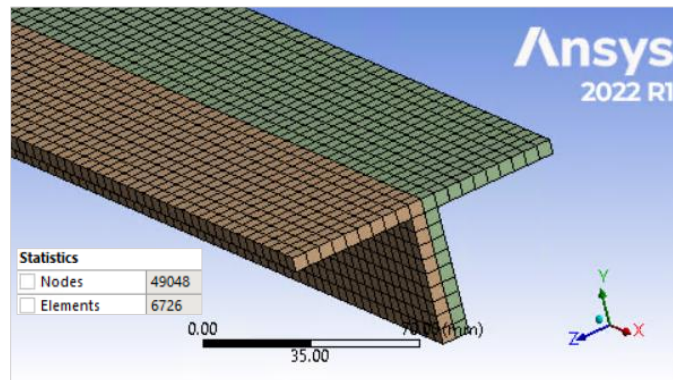
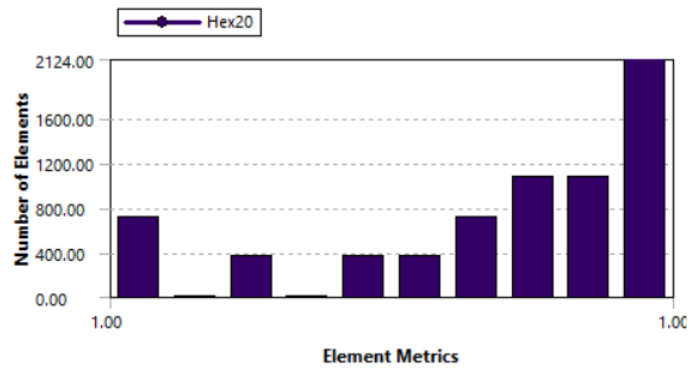


Figura 64. Calidad de los Elementos tipo Hexaedros en la Vigueta en Celosía.



2.4.2.3. Discretización para la Losa de Concreto

Figura 65. Malla con Elementos tipo Tetraedros para la Losa de Concreto.

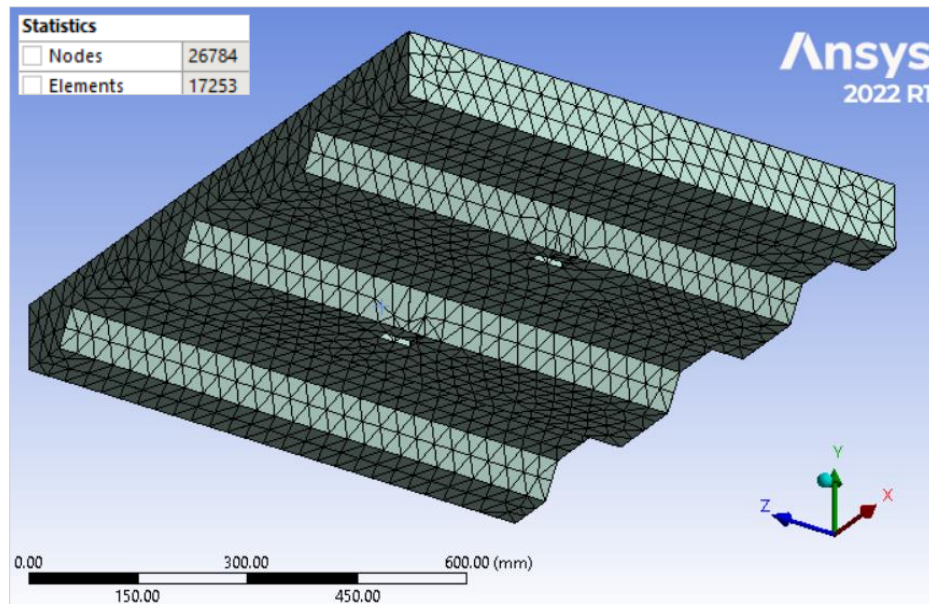
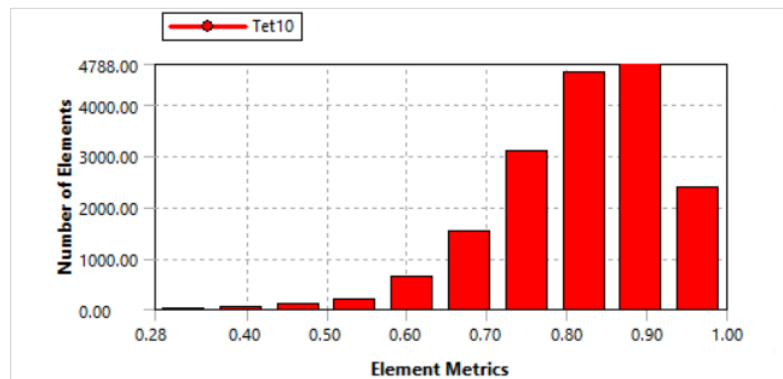


Figura 66. Calidad de los Elementos tipo Tetraedros en la Losa de Concreto.

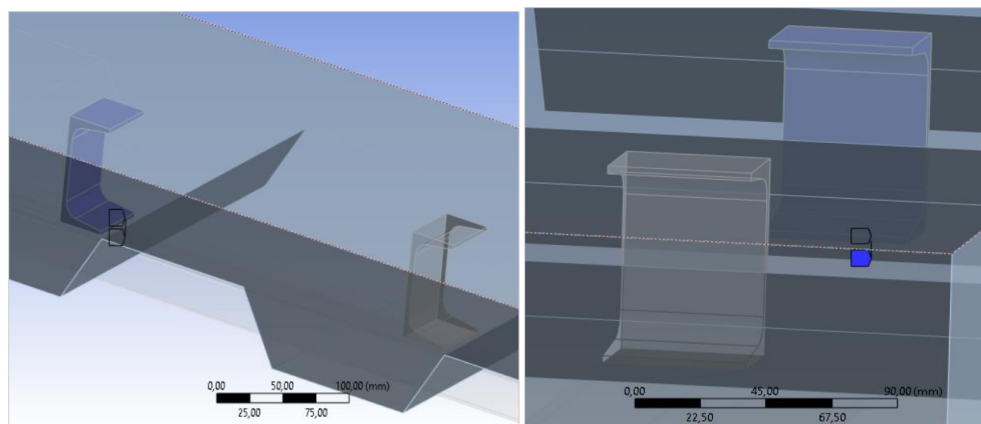


2.4.3. Modelos para las Interfaces

2.4.3.1. Contacto entre el Conector de Cortante y la Losa de Concreto - Friccional

Se utilizó este tipo de contacto porque permite que haya fricción entre las superficies, el valor del coeficiente de fricción entre el acero y el concreto puede variar dependiendo de diversos factores, como la rugosidad de las superficies, la presión de contacto, el estado húmedo o seco, entre otros. No existe un valor único y exacto para el coeficiente de fricción, en este estudio se utilizó un valor de 0.45

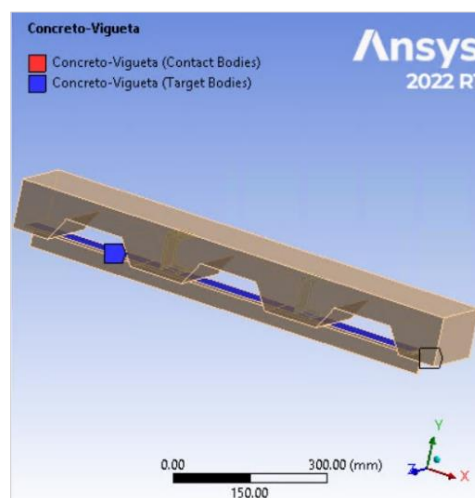
Figura 67. Interfaz entre la Losa de Concreto y el Conector tipo Canal.



2.4.3.2. Contacto entre la Losa de Concreto y las Viguetas - Sin fricción

Esta configuración de contacto no consideró la resistencia a la fricción entre las superficies en contacto. Se asumió un coeficiente de fricción cero, lo que permitió el deslizamiento libre.

Figura 68. Interfaz entre la Losa de Concreto y la Vigueta en Celosía.



2.4.3.3. Contacto entre las Viguetas en Celosía y los Conectores de Cortante – Adherido

Esta superficie se configuró con un contacto tipo adherido. Este tipo de contacto simula una soldadura u otra forma de unión rígida en la que no se permite el deslizamiento ni la separación entre las superficies en contacto.

Figura 69. Interfaz entre el Conector tipo Canal y la Vigueta en Celosía.

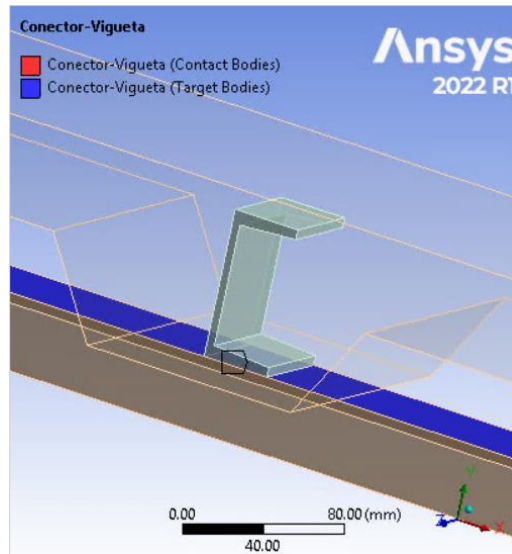
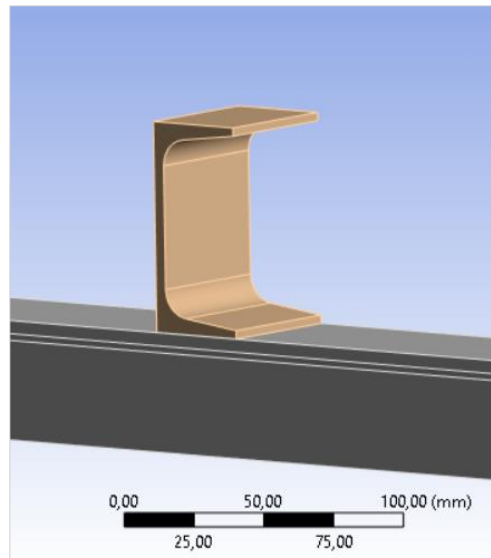


Figura 70. Contacto tipo Adherido.



2.4.4. Generación del Mallado

Considerando las calidades evidenciadas en las gráficas anteriores, donde la cantidad de nudos y elementos influyó en el tiempo de análisis y la convergencia de los resultados, se optó por utilizar elementos tetraédricos para la losa de concreto y los conectores de cortante, así como elementos hexaédricos para las viguetas, debido a su forma regular. Además, se implementó un refinamiento en la zona de contacto de los conectores con la losa de concreto.

Figura 71. Malla Conector- Vigüeta.

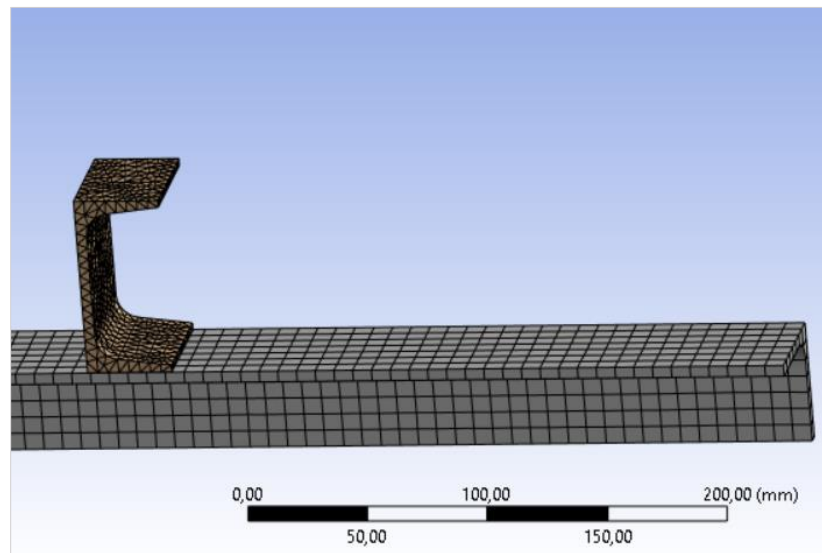


Figura 72. Malla Conectores de Cortante.

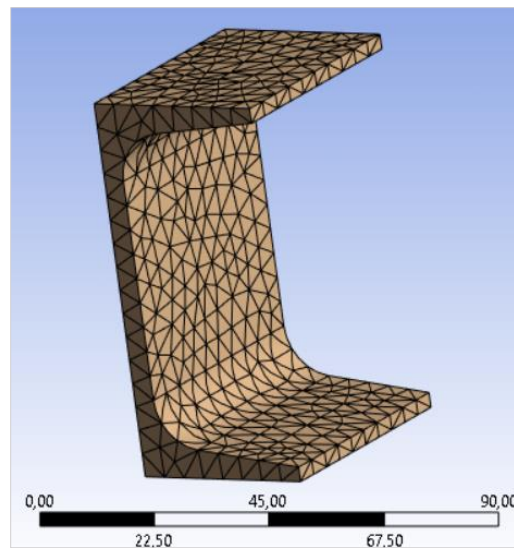


Figura 73. Malla Losa Vista Inferior.

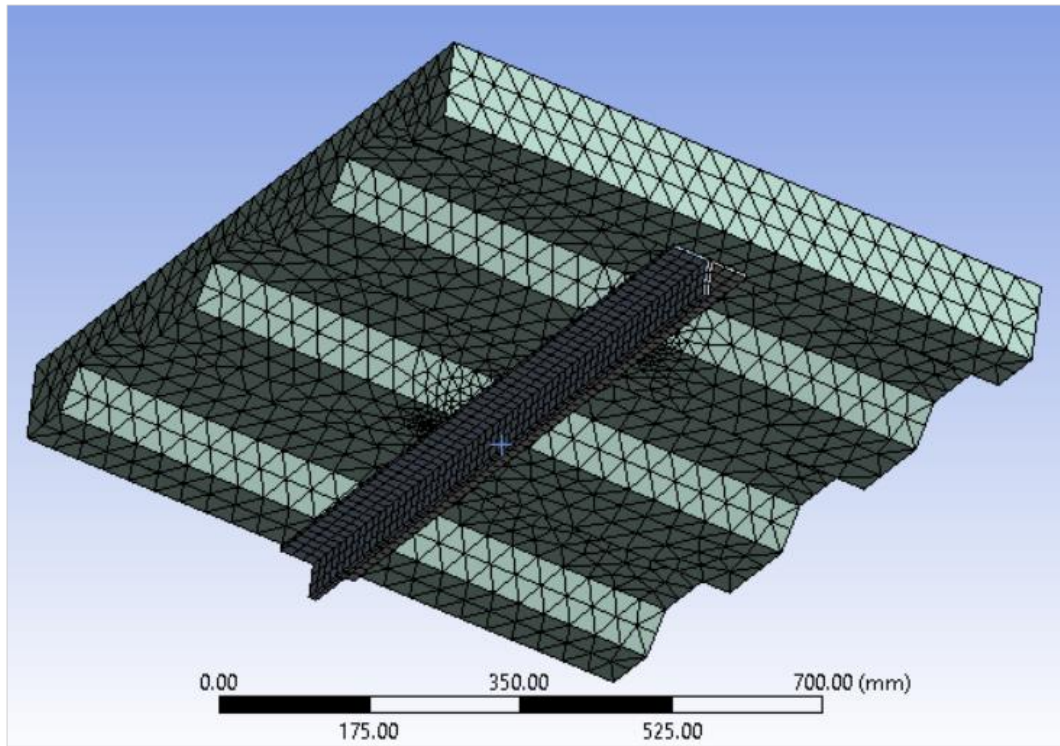
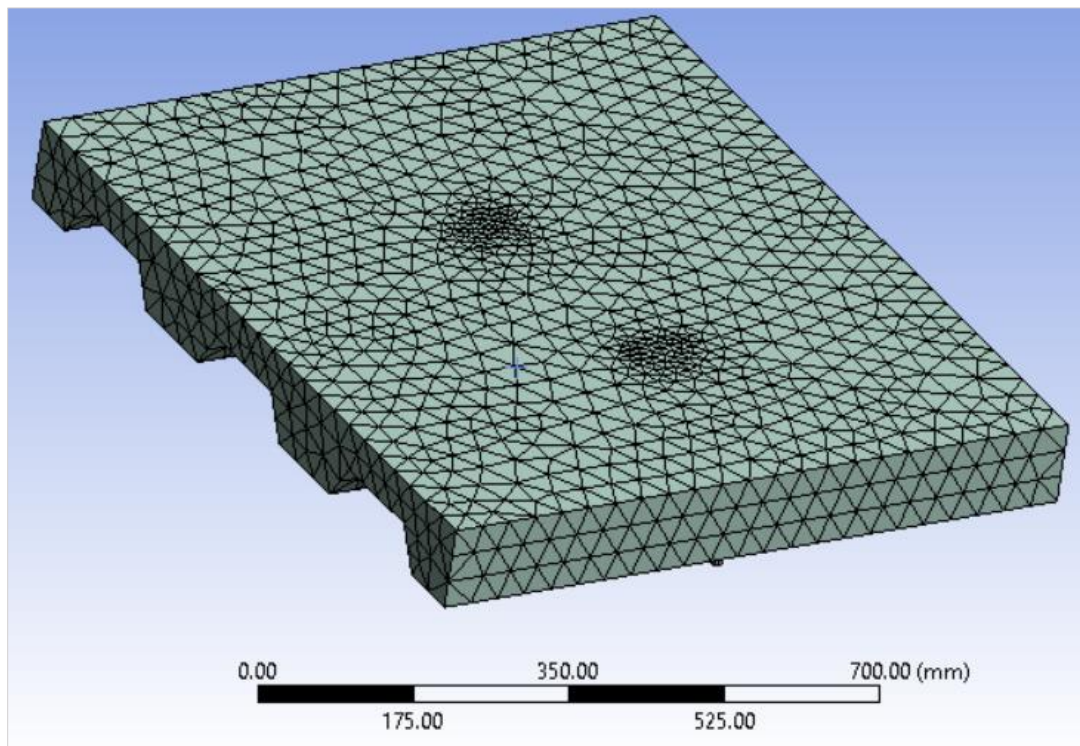


Figura 74. Malla Losa Vista Superior.



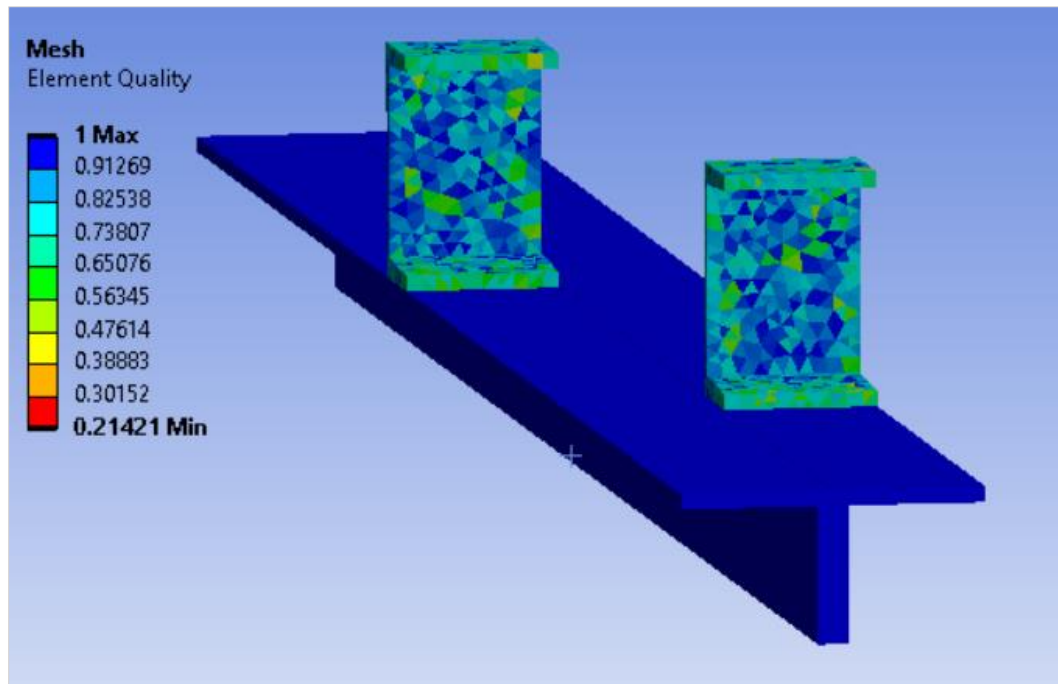


Figura 75. Calidad de Malla de los Conectores y Viguetas.

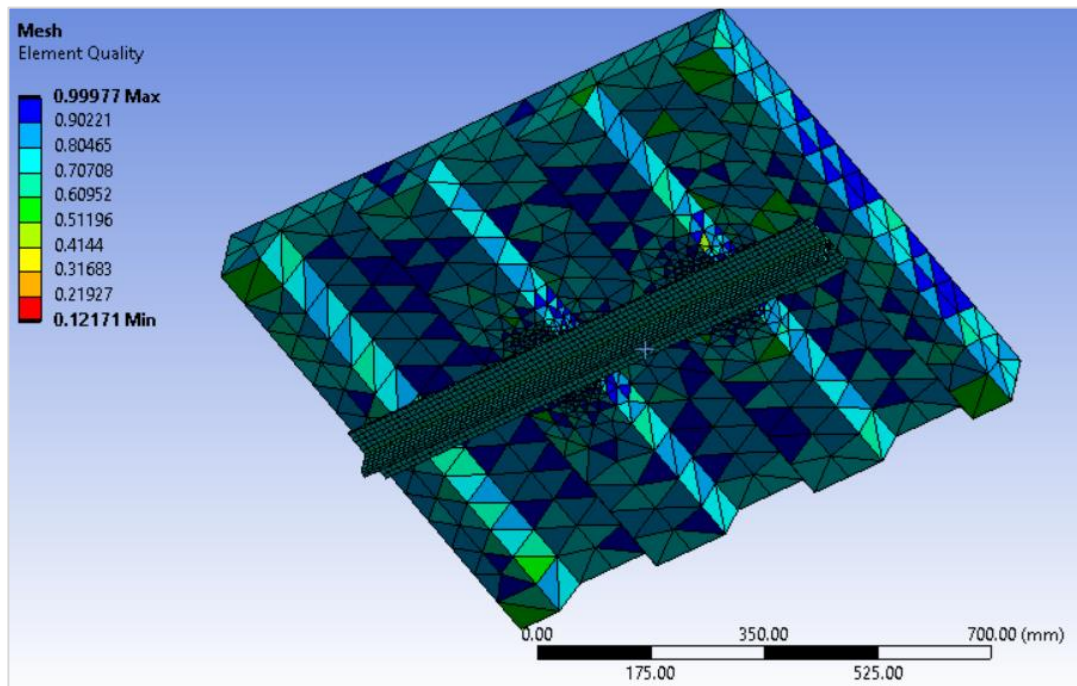


Figura 76. Calidad de la Malla de la Losa Vista Inferior.

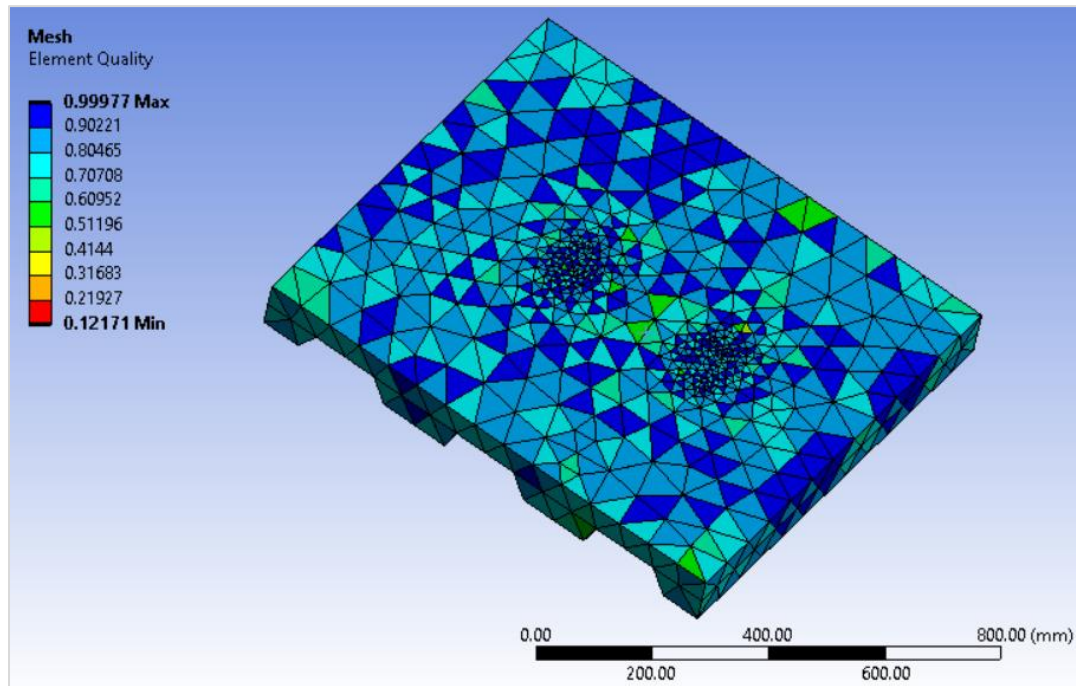


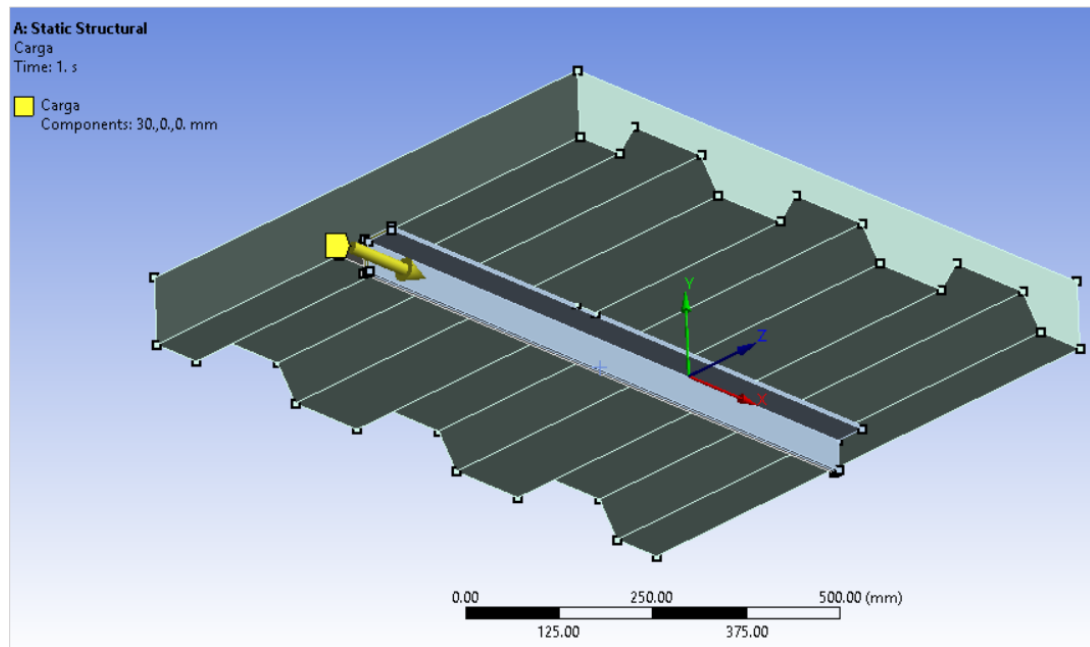
Figura 77. Calidad de la Malla de la Losa Vista Superior.

2.4.5. Condiciones de Frontera

2.4.5.1. Asignación de Cargas

En la simulación de las series experimentales se utilizó un modelo de carga que implicaba la aplicación de desplazamientos graduales en la cara de la vigueta en celosía. De esta manera, se buscó transmitir estos desplazamientos a la base de cada uno de los conectores, en la misma ubicación donde se aplicó la carga durante el ensayo de corte directo.

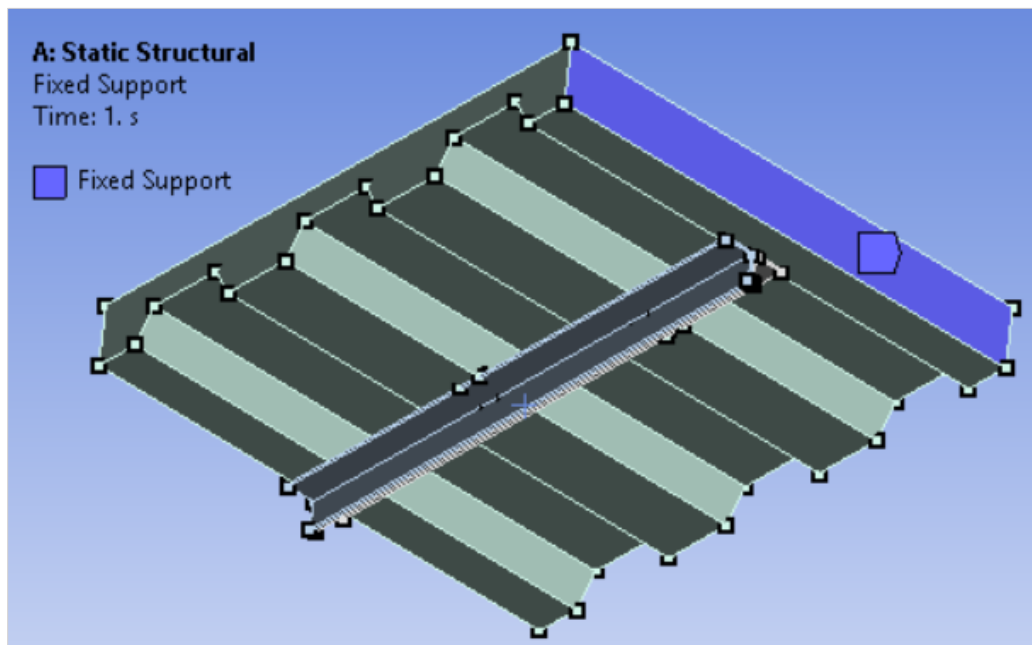
Figura 78. Modelo de Aplicación de la Carga.



2.4.5.2. Asignación de Apoyos

Los apoyos se configuraron conforme al montaje de las probetas para llevar a cabo el ensayo de corte directo. Se restringieron los desplazamientos en la base de la losa de concreto.

Figura 79. Condición de Apoyo de la Probeta.



2.5. Postproceso

En esta fase se presentan los resultados de haber simulado las ocho configuraciones del entrepiso compuesto que fueron ensayadas experimentalmente por (Rodríguez R. M., 2019). Se describen los datos correspondientes a deformaciones totales, esfuerzos y desplazamientos en los conectores, en las viguetas en celosía y en la losa de concreto.

2.5.1. Serie 1

La configuración geométrica y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la probeta de la serie número uno son las siguientes:

Tabla 7. Datos de Entrada para la Serie 1.

Serie 1	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilíneal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilíneal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	100 mm
Resistencia a la Compresión Uniaxial	24 MPa
Resistencia a la Tensión Uniaxial	3,4 MPa
Resistencia a la Compresión biaxial	28 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam
	Isotrópico Multilíneal

Figura 80. Geometría de la Serie 1.

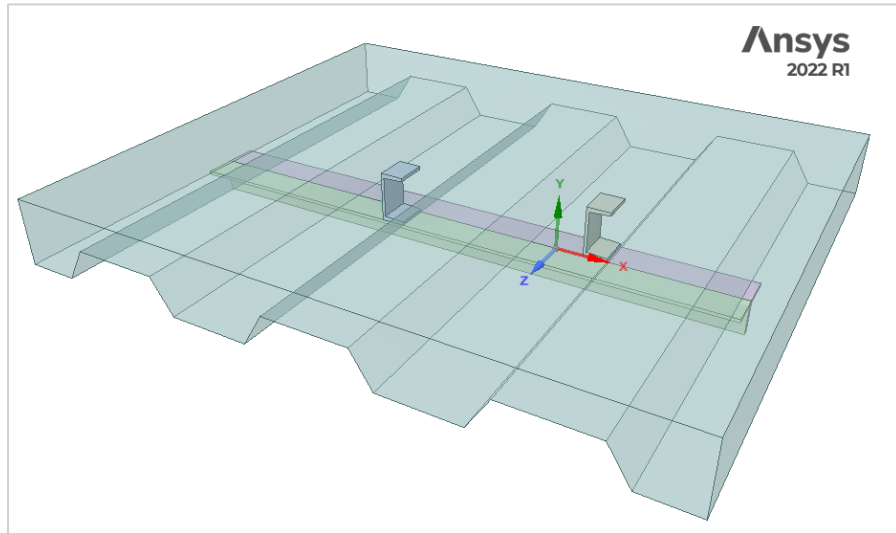


Figura 81. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1.

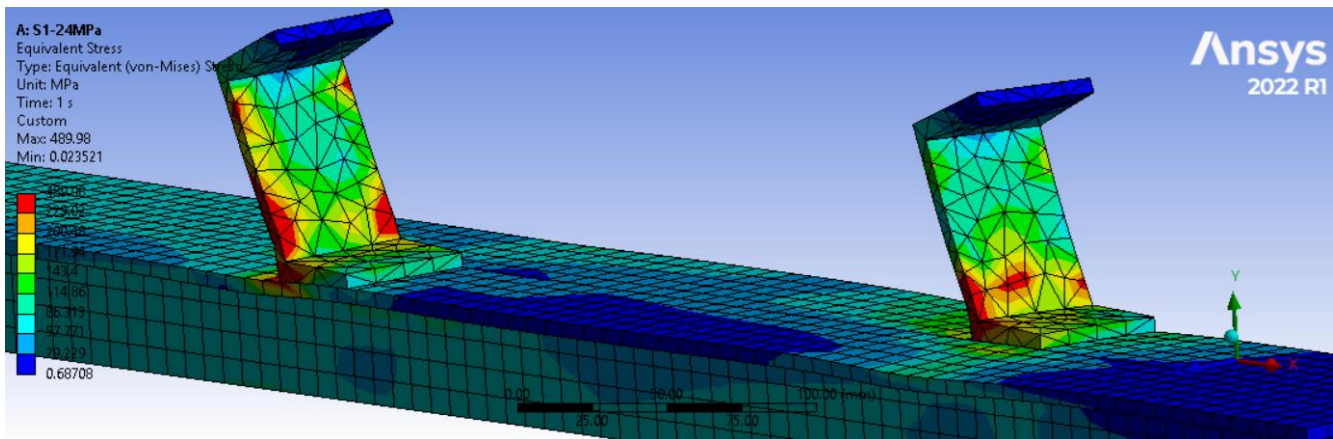


Figura 82. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1(2).

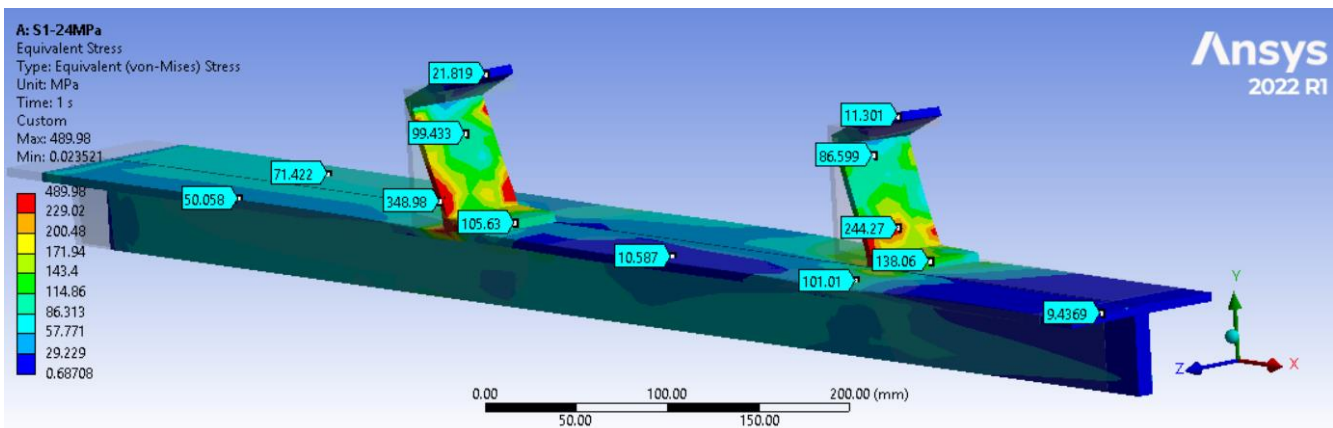


Figura 83. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 1.

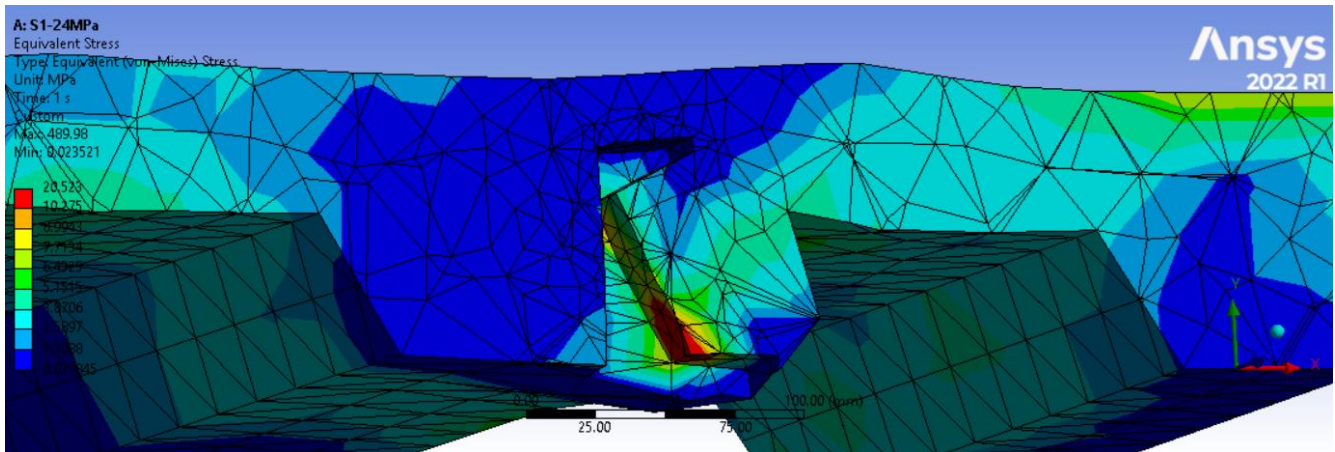


Figura 84. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto Vista Inferior en la Serie 1.

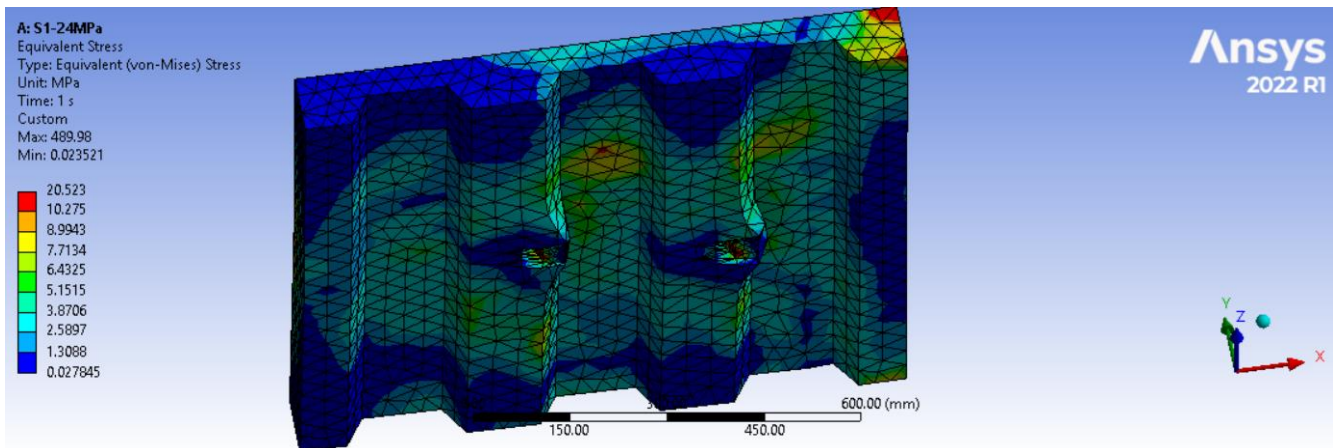


Figura 85. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto Vista Superior en la Serie 1.

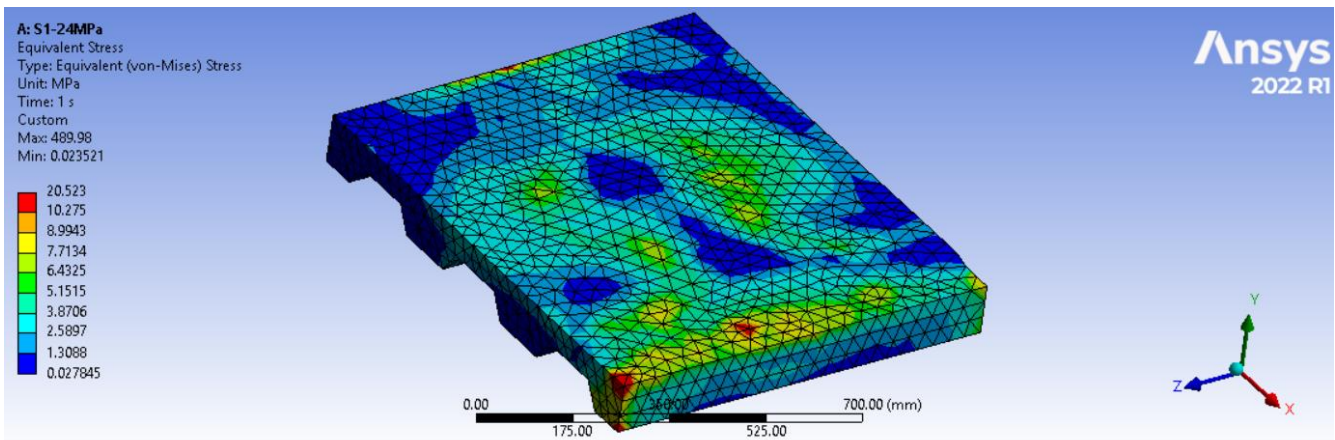


Figura 86. Esfuerzo Equivalente Interacción con Conectores de Cortante en la Serie 1.

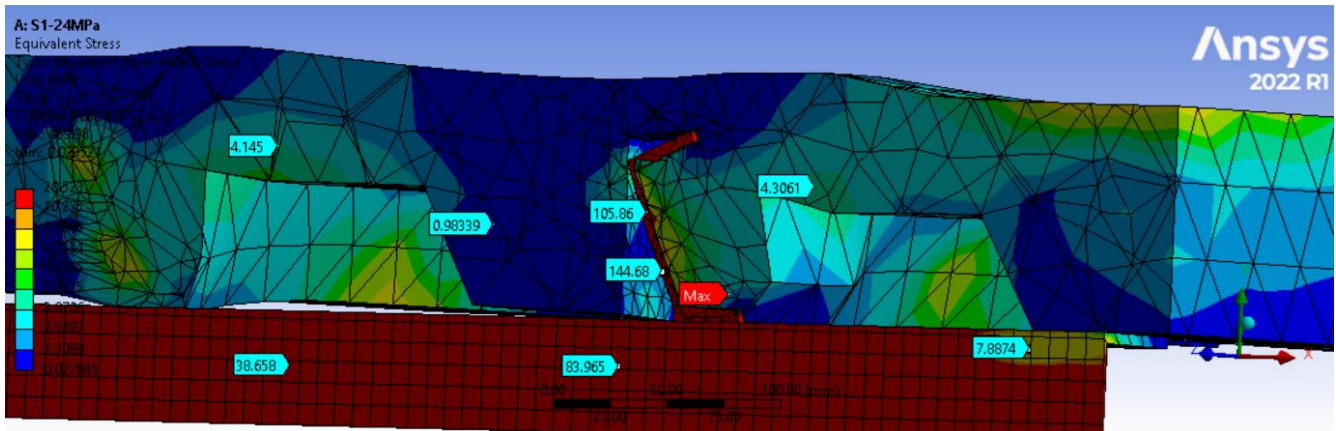


Figura 87. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1.

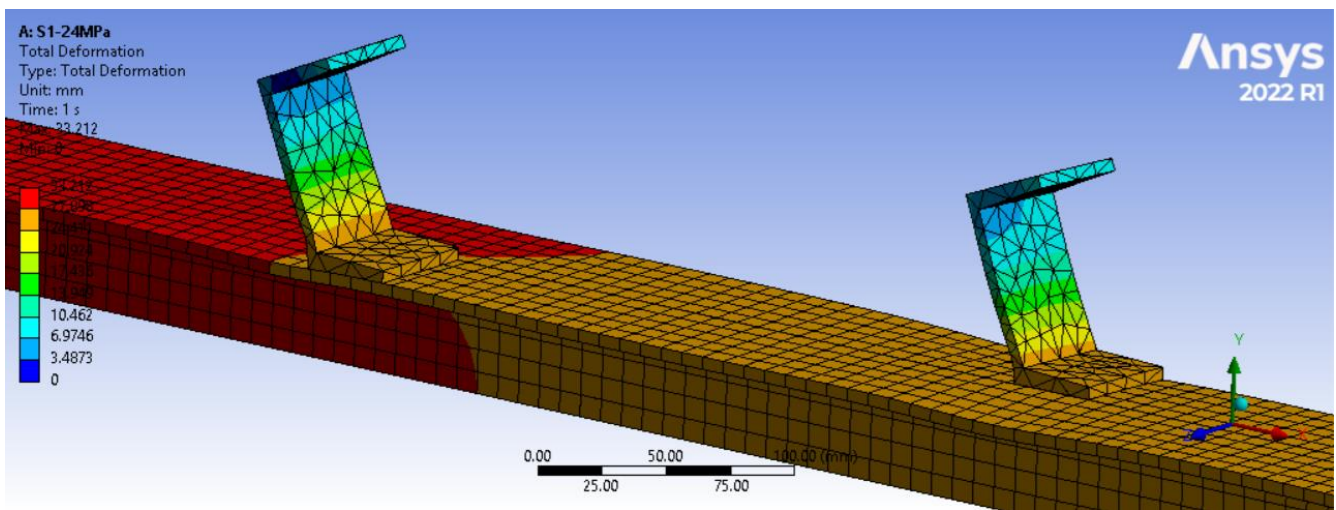


Figura 88. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1 (2).

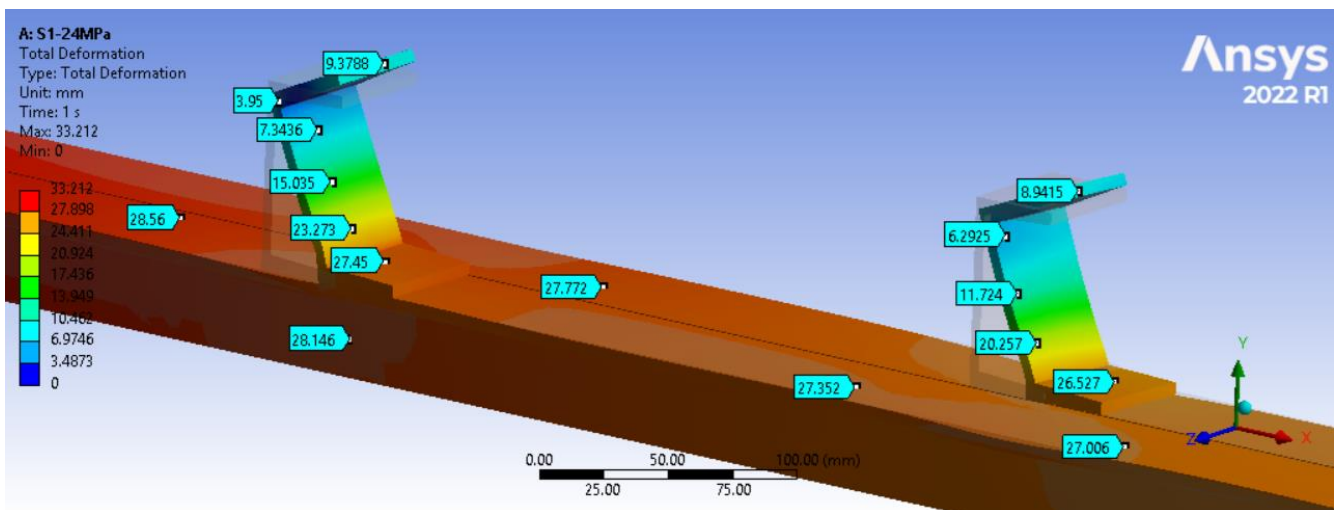


Figura 89. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 1 (3).

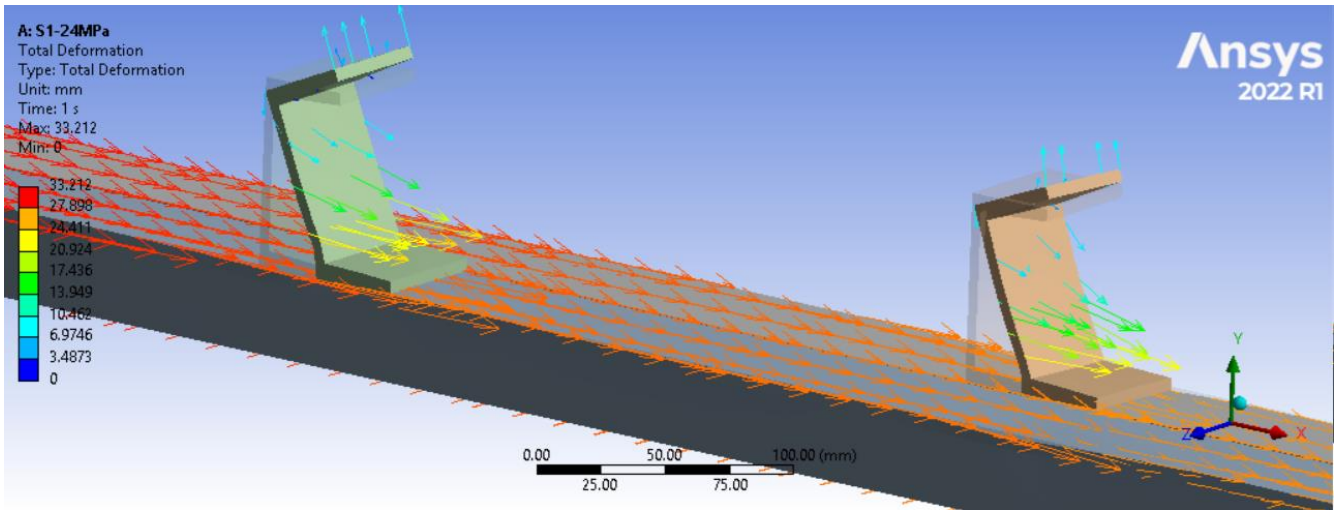


Figura 90. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 1.

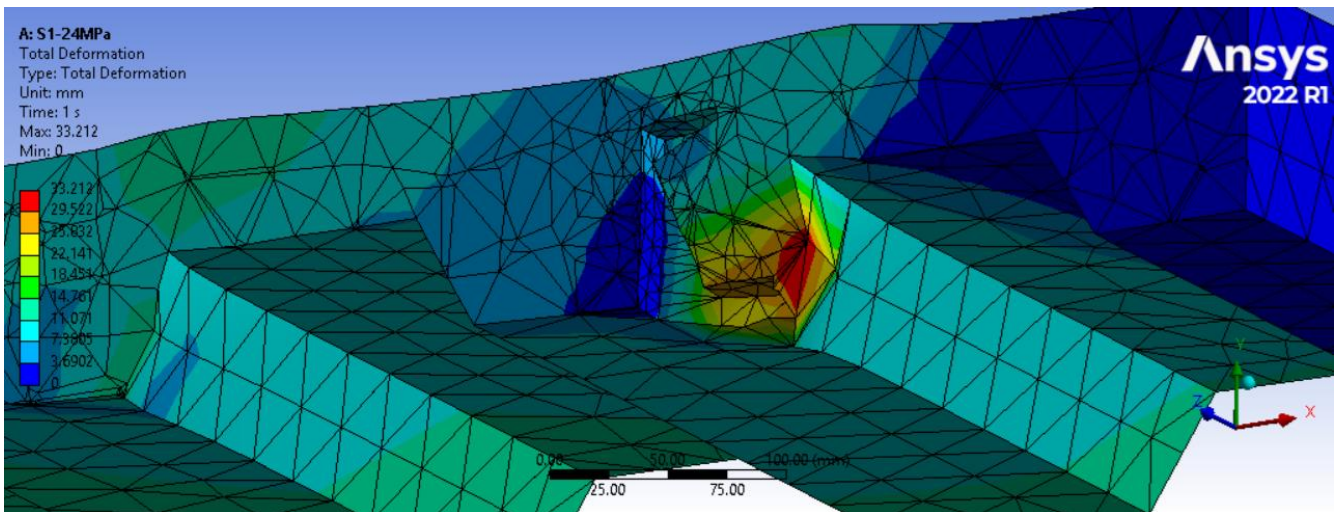


Figura 91. Deformación Total Interacción con Conectores de Cortante en la Serie 1.

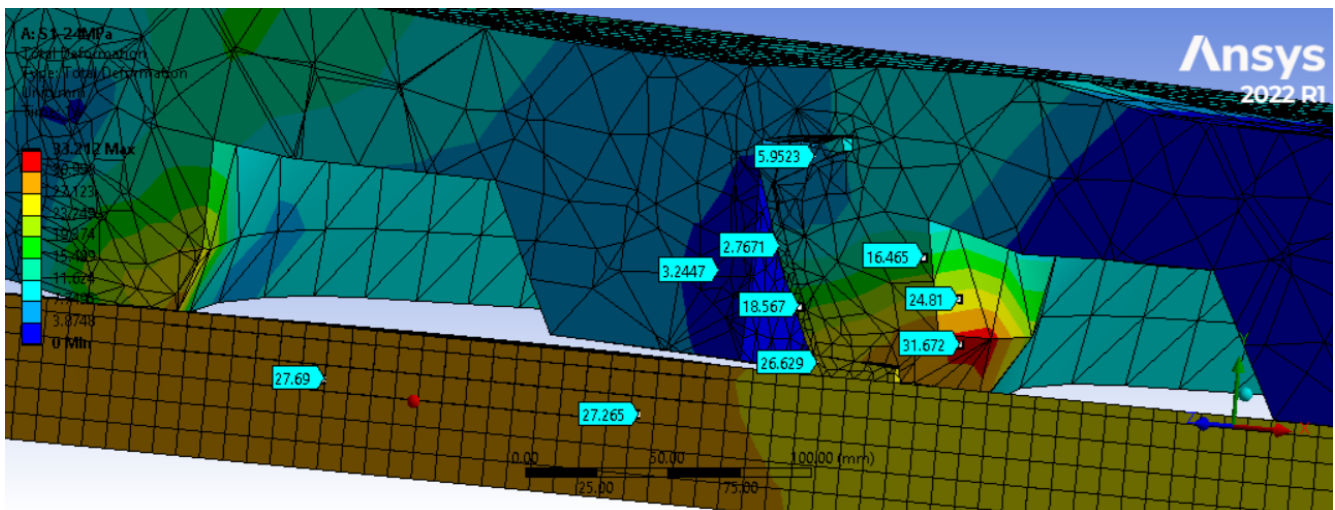


Figura 92. Deformación Total en la Probeta de la Serie 1.

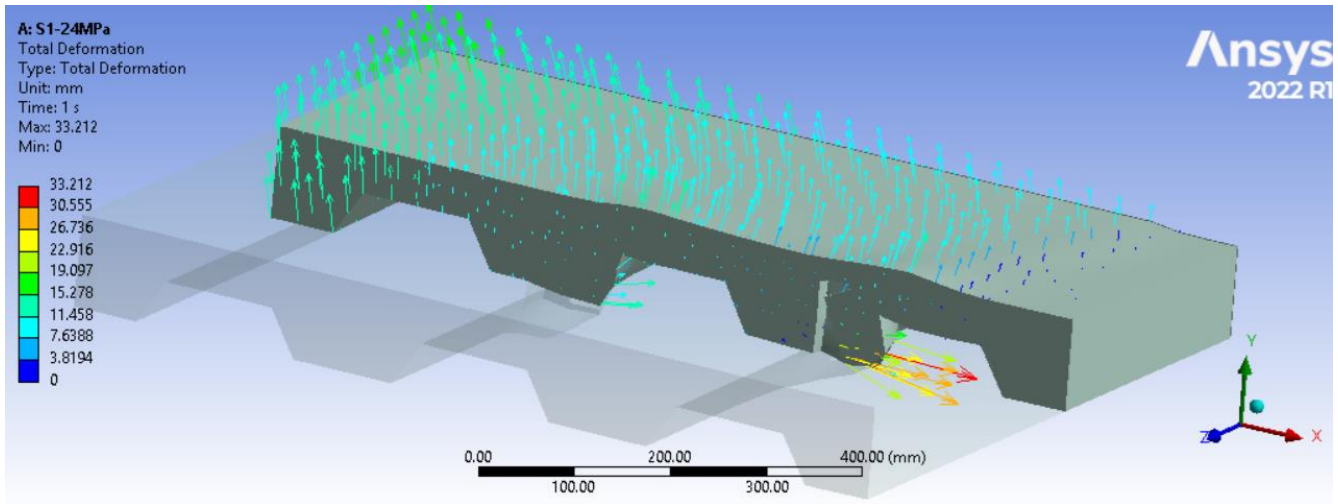


Figura 93. Deformación Total en la Probeta Vista Superior de la Serie 1.

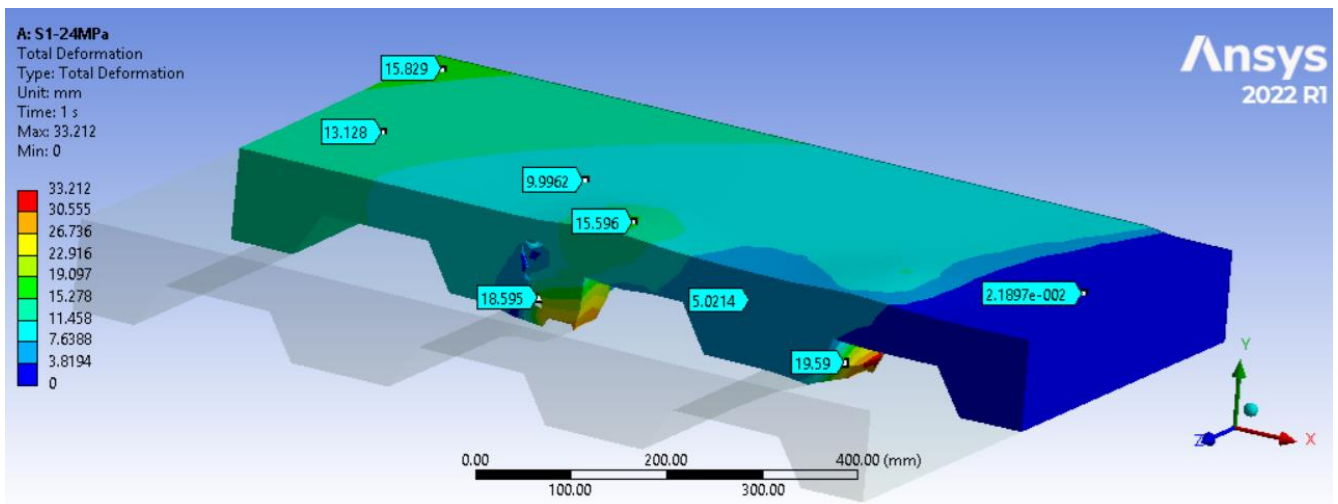


Figura 94. Deformación Total en la Probeta Vista Inferior de la Serie 1.

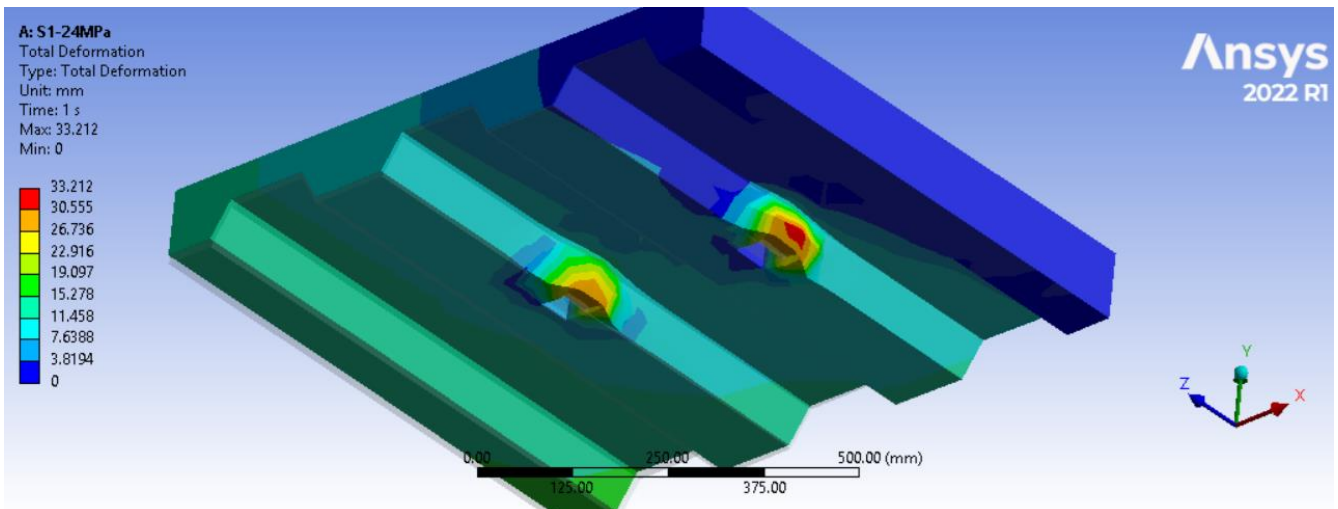


Figura 95. Curva Carga (kN) vs. Desplazamientos (mm) Para los dos Conectores – Serie 1 (Ansys).

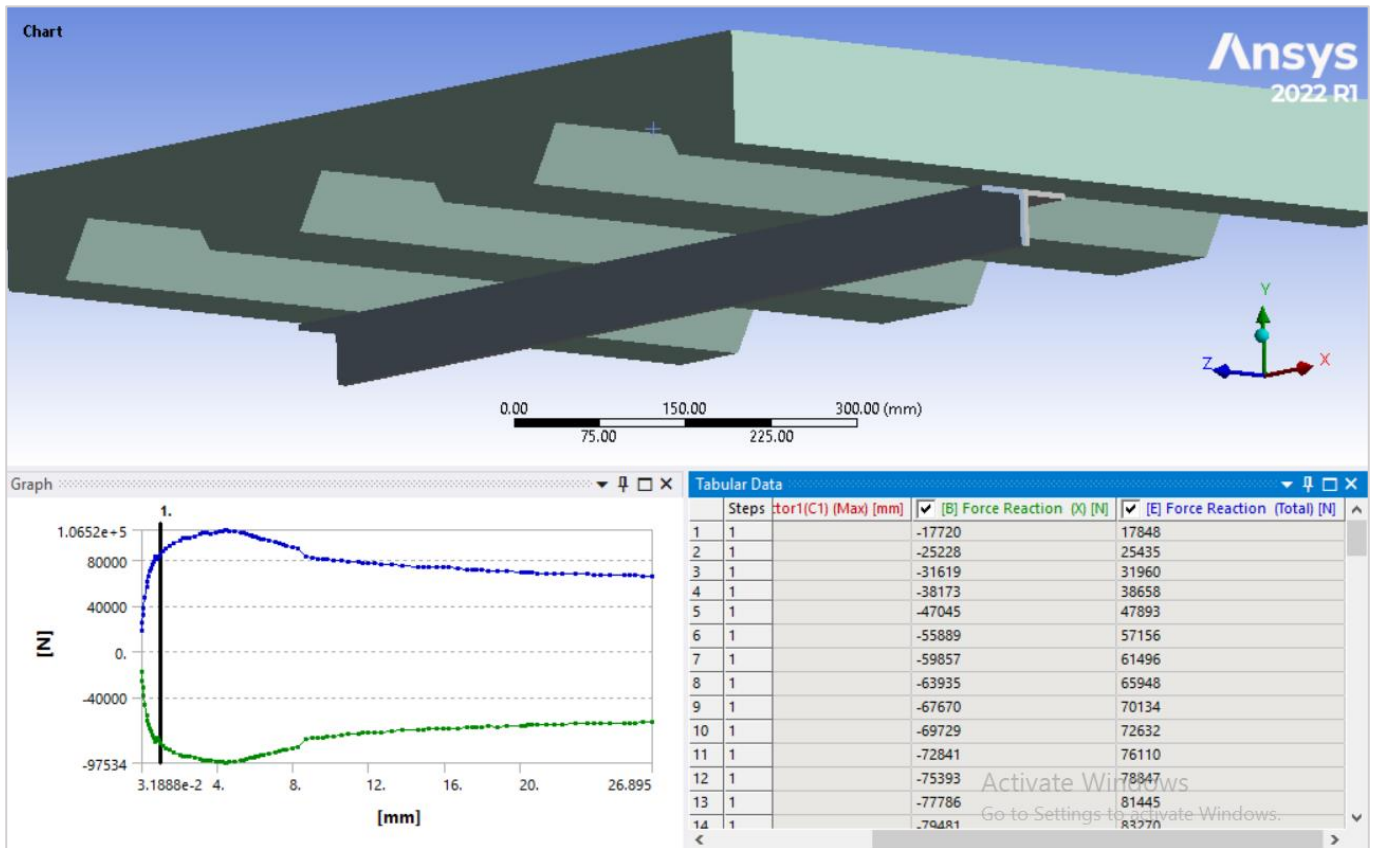
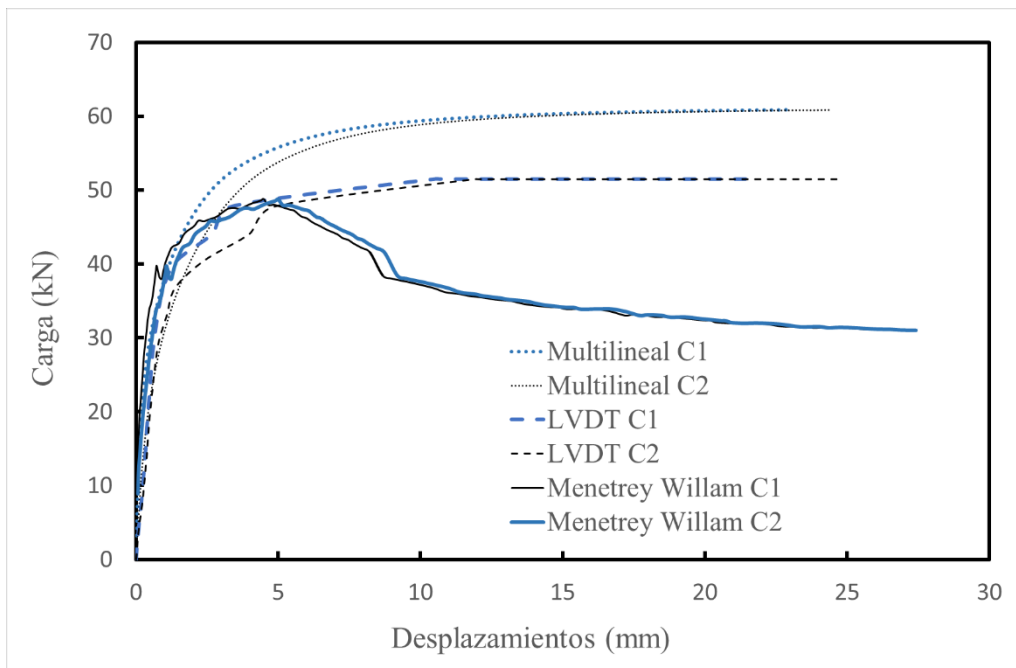


Figura 96. Curva Carga (kN) vs. Desplazamientos (mm) Para un Conector – Serie 1.



2.5.2. Serie 2

La configuración geométrica y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la probeta de la serie número dos son las siguientes:

Tabla 8. Datos de Entrada para la Serie 2.

Serie 2	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	113 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	100 mm
Resistencia a la Compresión Uniaxial	24 MPa
Resistencia a la Tensión Uniaxial	3,4 MPa
Resistencia a la Compresión biaxial	28 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam
	Isotrópico Multilineal

Figura 97. Geometría de la Serie 2.

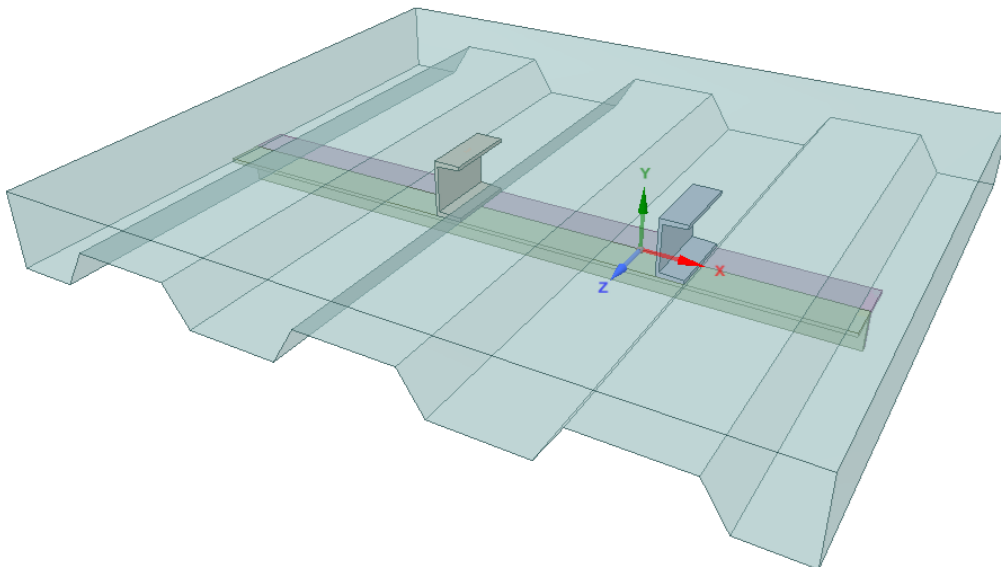


Figura 98. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 2.

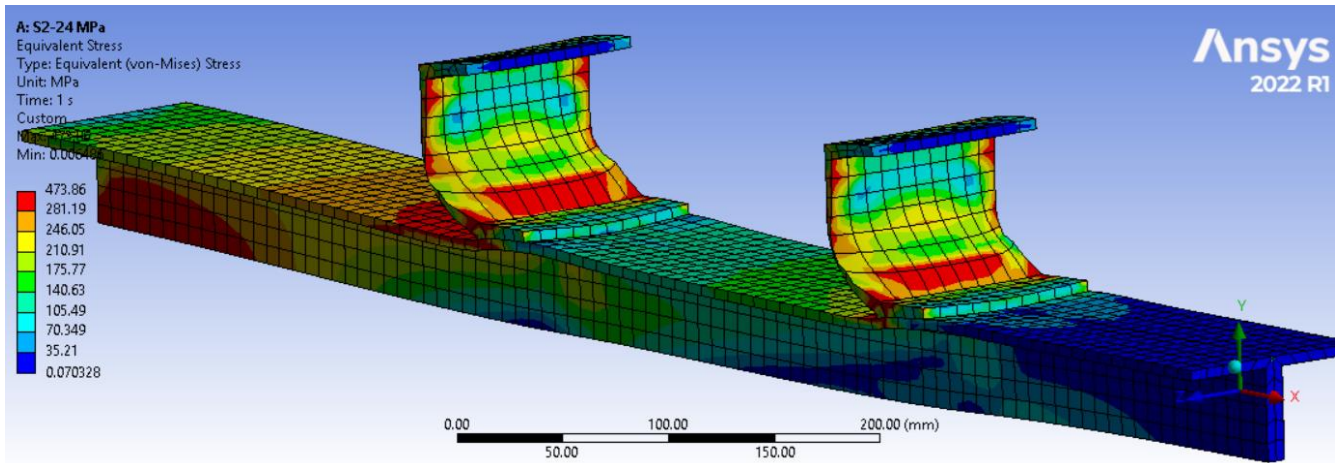


Figura 99. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 2.

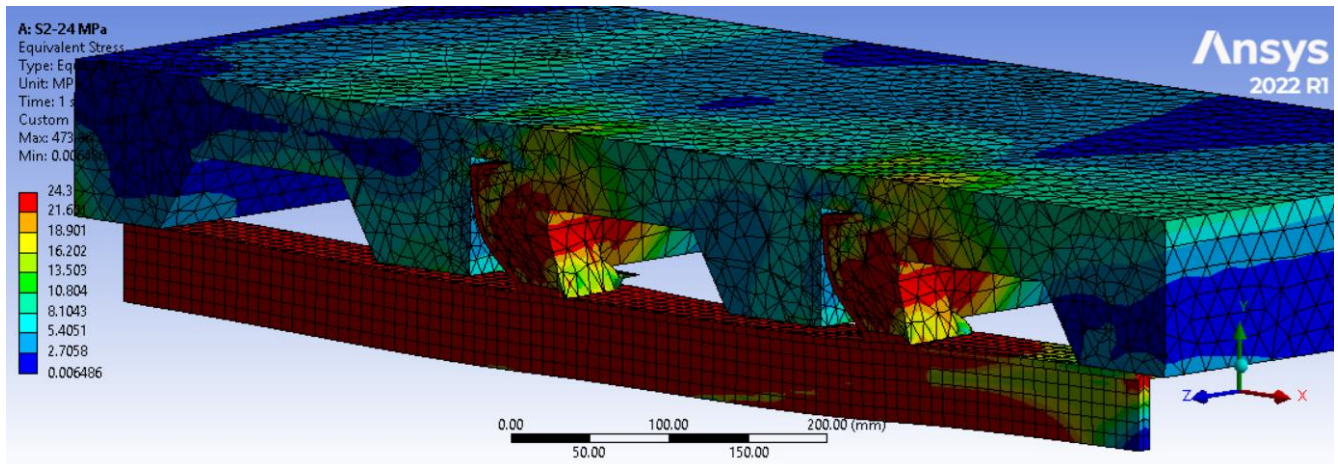


Figura 100. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 2.

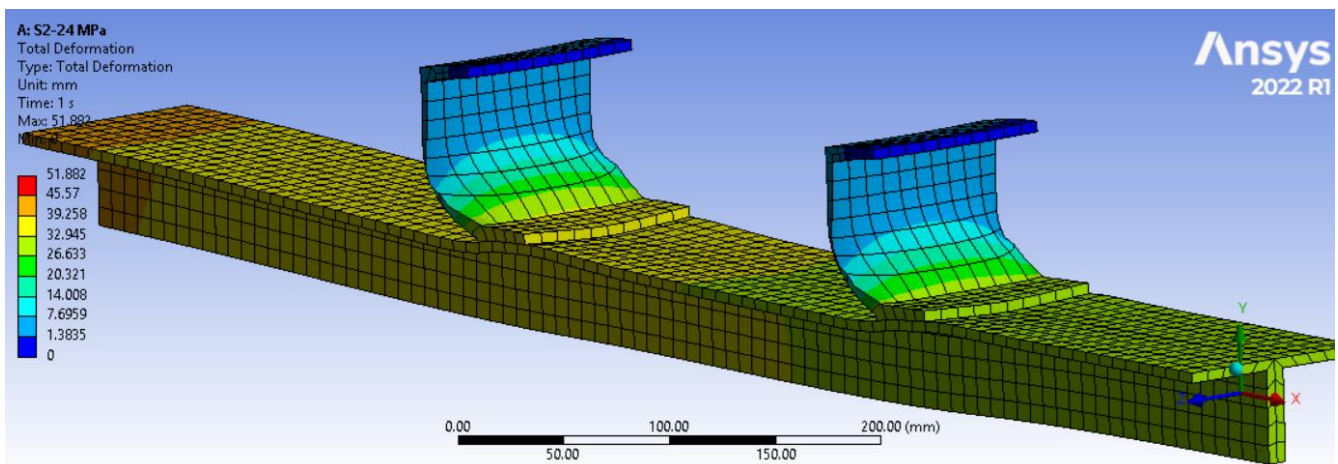


Figura 101. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 2.

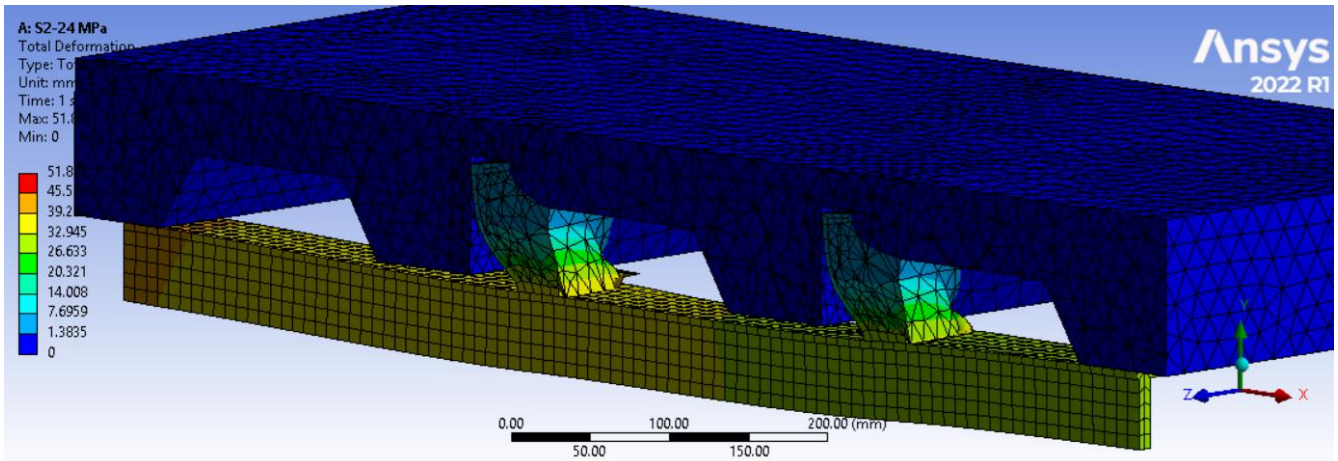
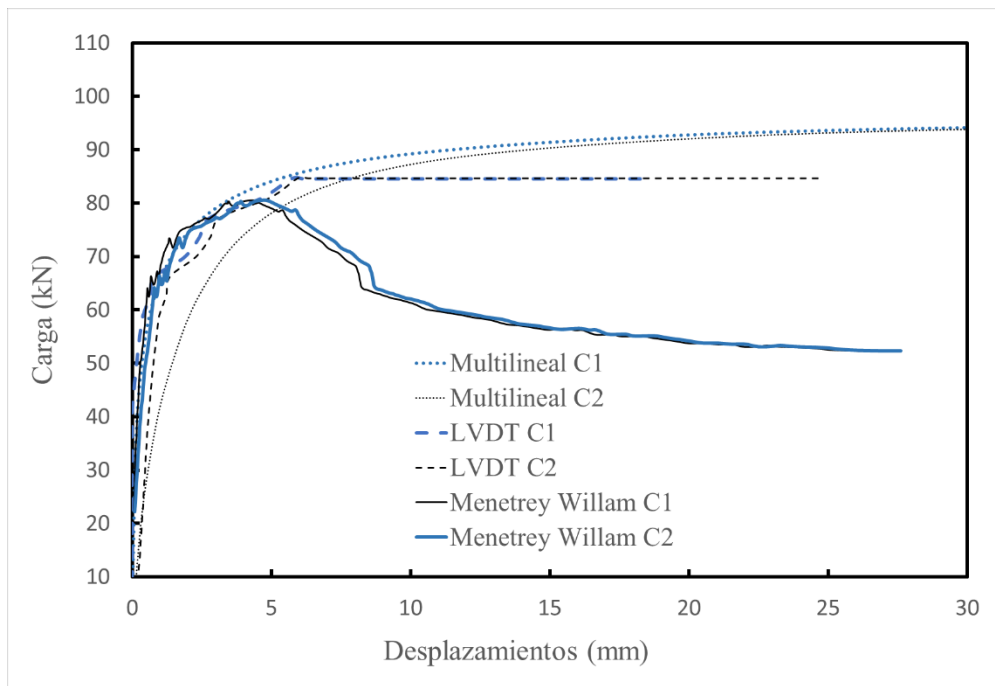


Figura 102. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 2.



2.5.3. Serie 3

La configuración geométrica y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la probeta de la serie número tres son las siguientes:

Tabla 9. Datos de Entrada para la Serie 3.

Serie 3	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	150 mm
Resistencia a la Compresión Uniaxial	24 MPa
Resistencia a la Tensión Uniaxial	3,4 MPa
Resistencia a la Compresión biaxial	28 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam
	Isotrópico Multilineal

Figura 103. Geometría de la Serie 3.

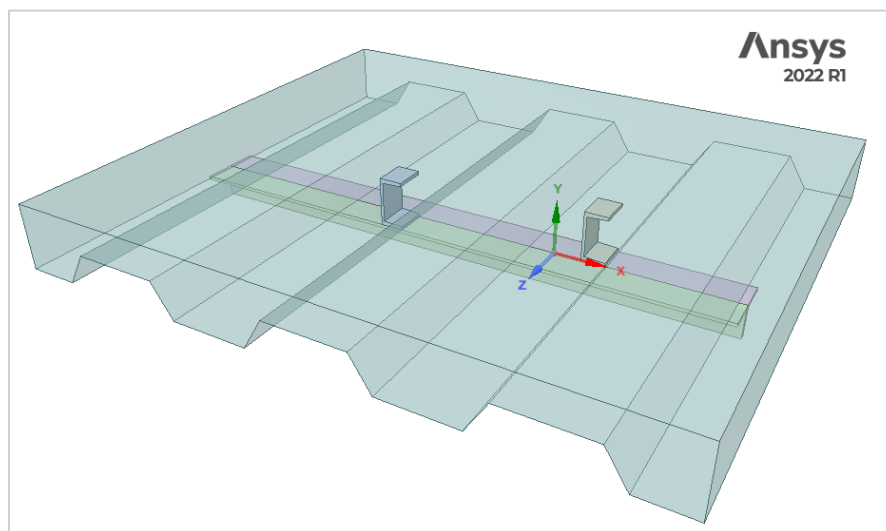


Figura 104. Esfuerzo Equivalente en la Losa en la Serie 3.

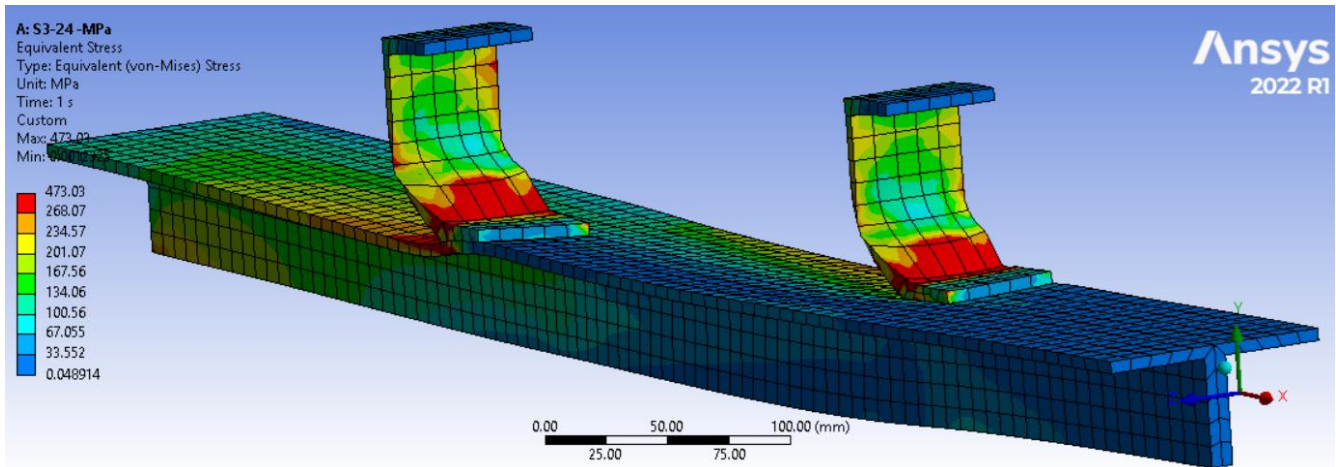


Figura 105. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 3.

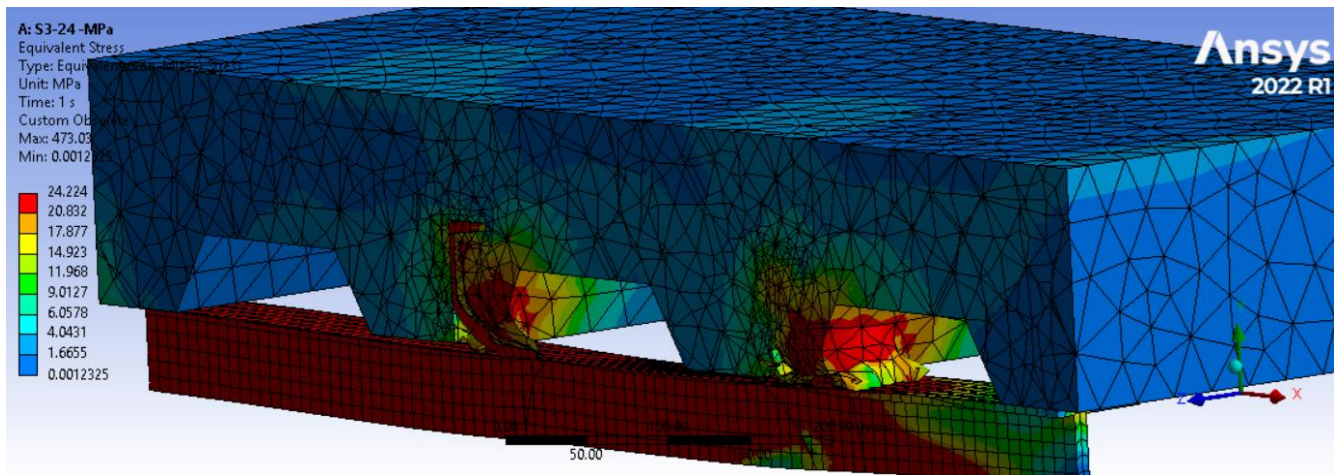


Figura 106. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 3.

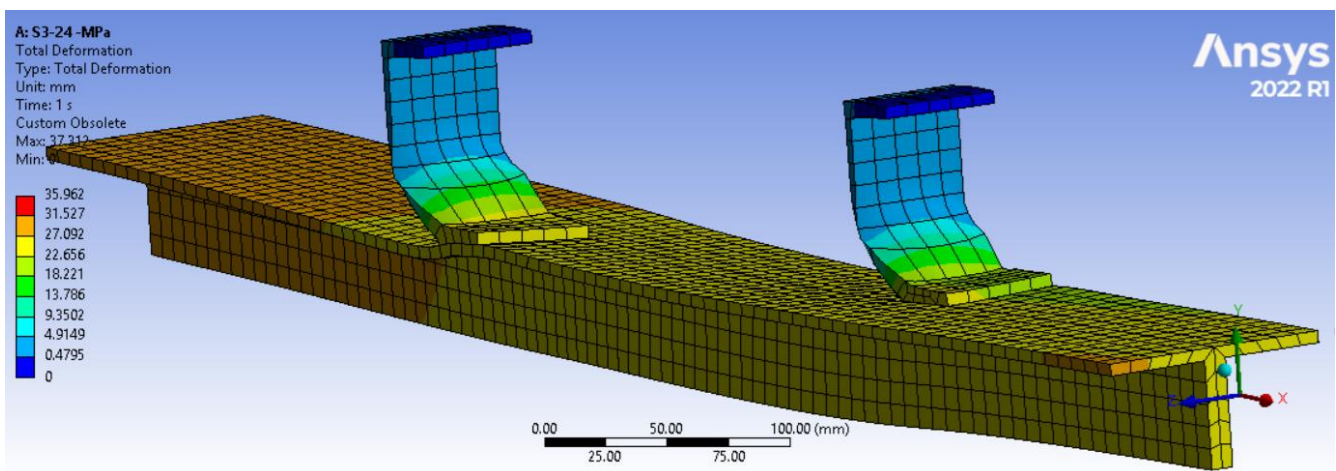


Figura 107. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 3.

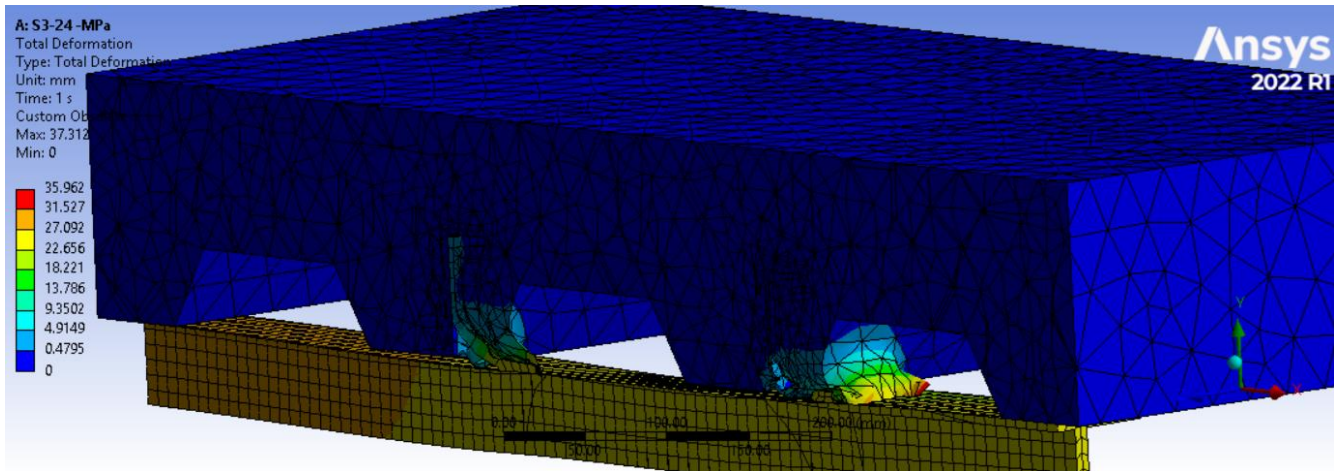
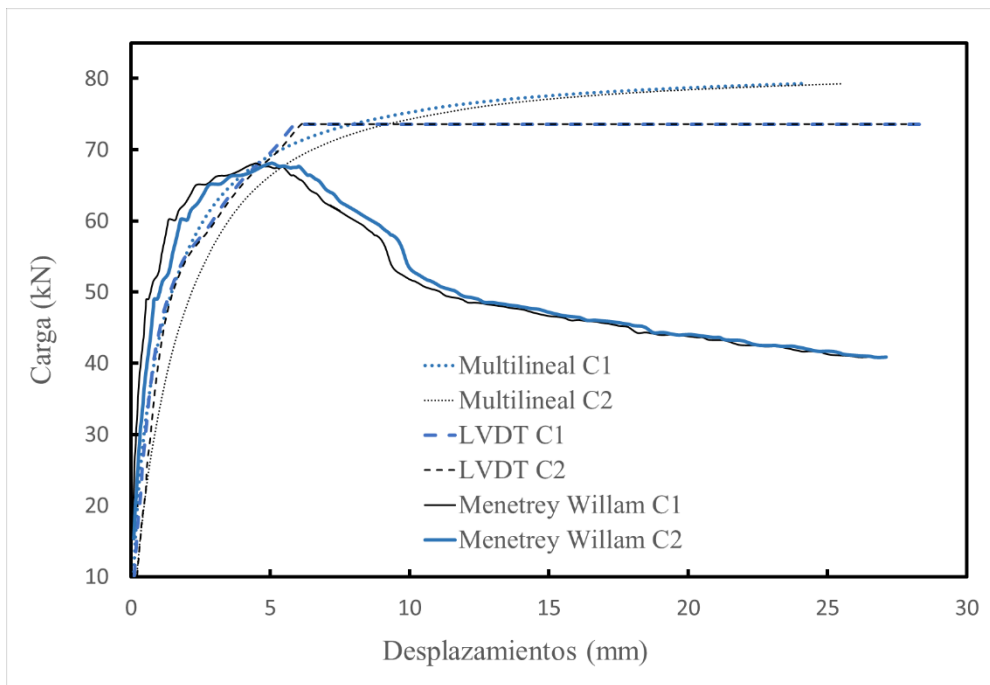


Figura 108. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 3.



2.5.4. Serie 4

La configuración geométrica y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la probeta de la serie número cuatro son las siguientes:

Tabla 10. Datos de Entrada para la Serie 4.

Serie 4	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	113 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	150 mm
Resistencia a la Compresión Uniaxial	24 MPa
Resistencia a la Tensión Uniaxial	3,4 MPa
Resistencia a la Compresión biaxial	28 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam
	Isotrópico Multilineal

Figura 109. Geometría de la Serie 4.

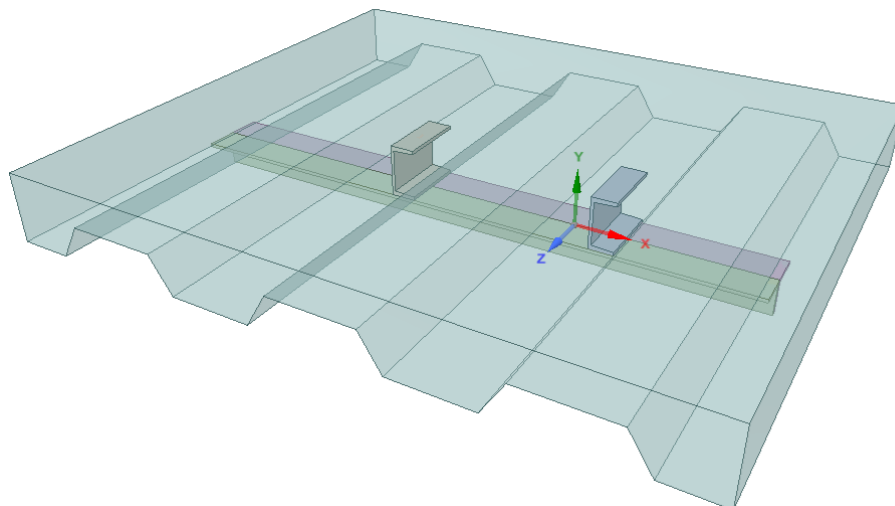


Figura 110. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 4.

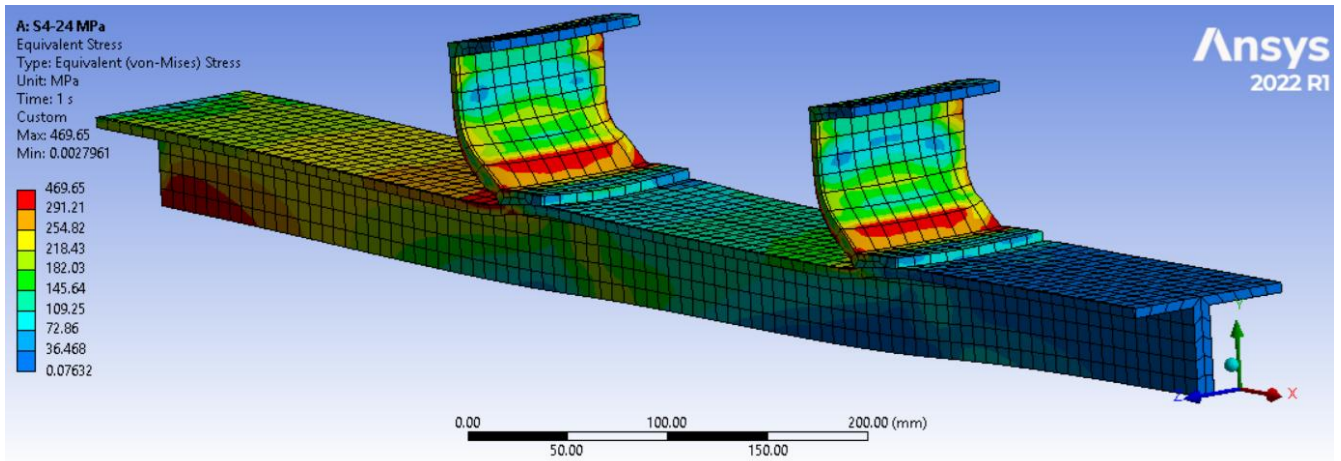


Figura 111. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 4.

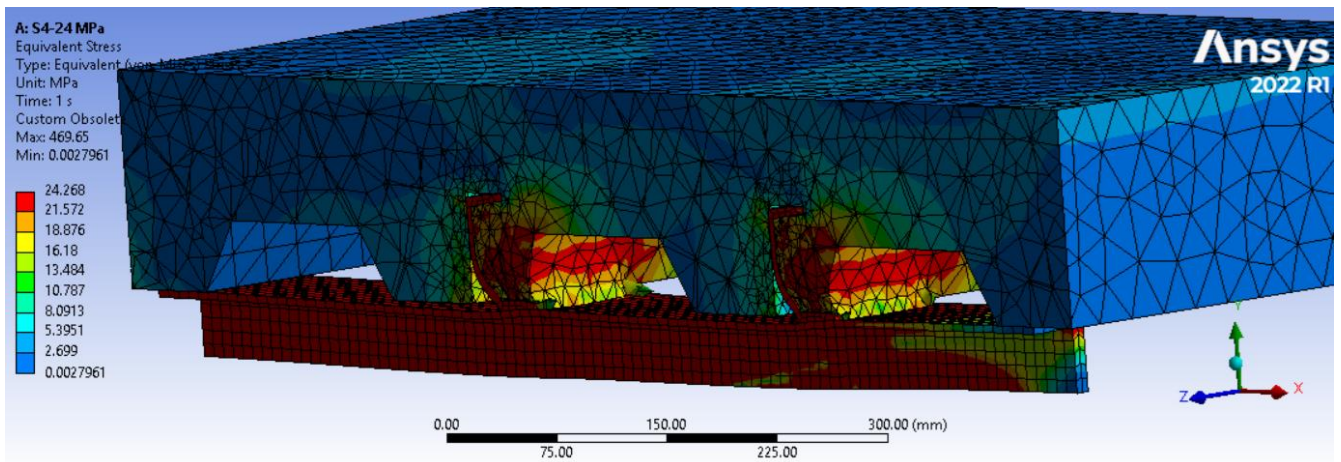


Figura 112. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 4.

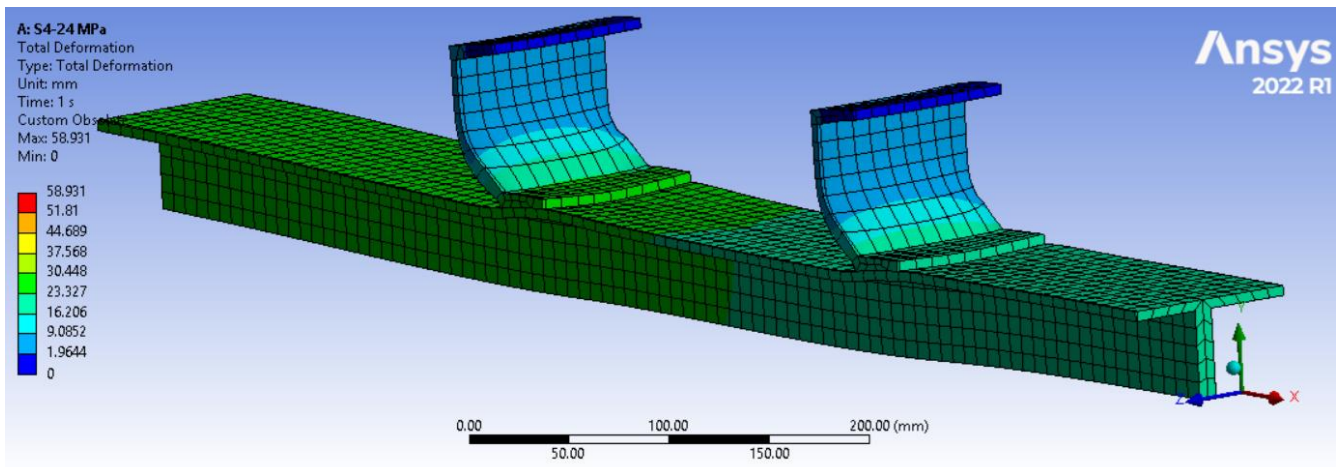


Figura 113. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 4.

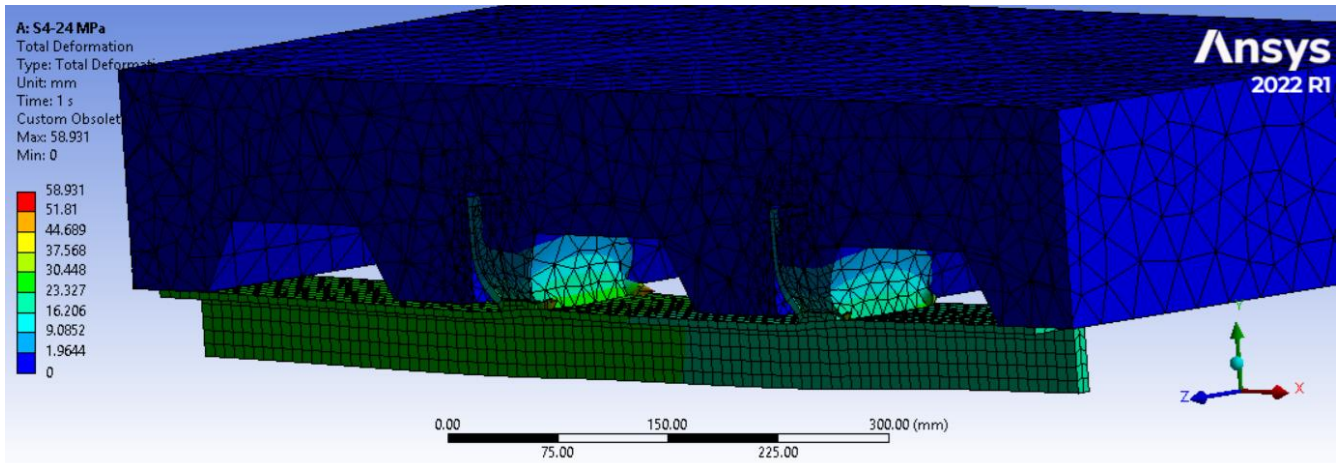
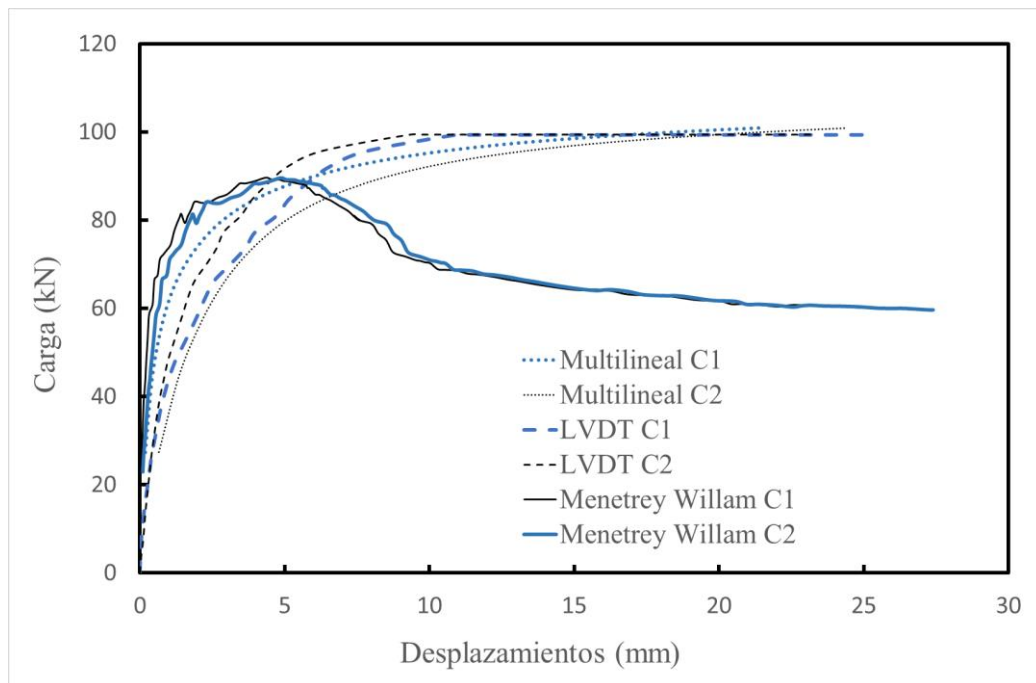


Figura 114. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 4.



2.5.5. Serie 5

La configuración geométrica y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la probeta de la serie número cinco son las siguientes:

Tabla 11. Datos de Entrada para la Serie 5.

Serie 5	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	4"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	130 mm
Resistencia a la Compresión Uniaxial	24 MPa
Resistencia a la Tensión Uniaxial	3,4 MPa
Resistencia a la Compresión biaxial	28 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam
	Isotrópico Multilineal

Figura 115. Geometría de la Serie 5.

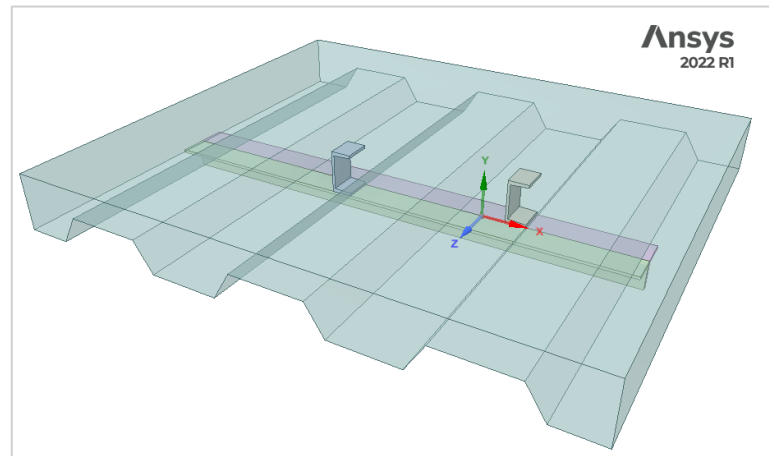


Figura 116. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 5.

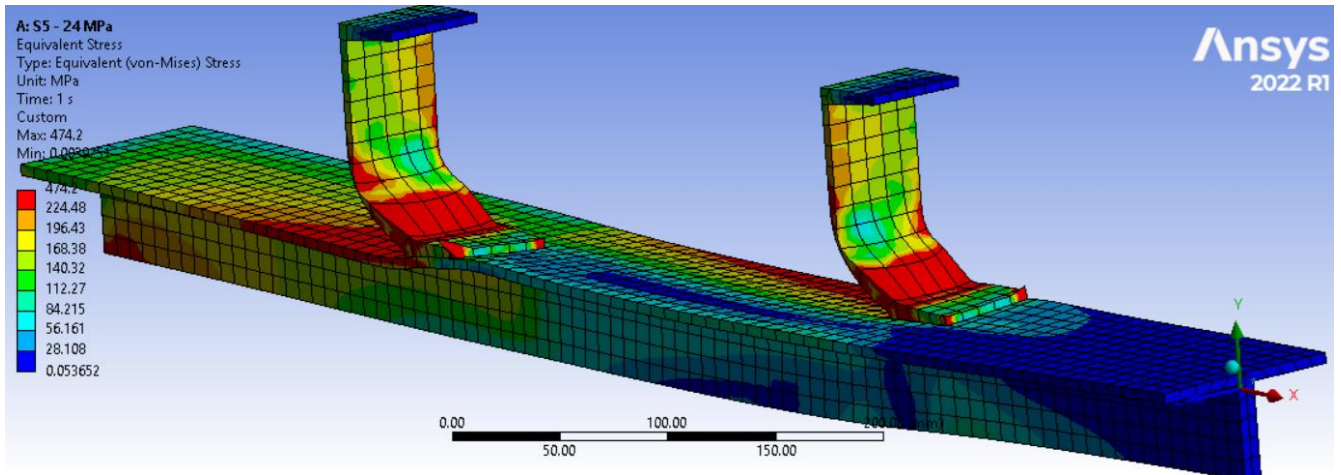


Figura 117. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 5.

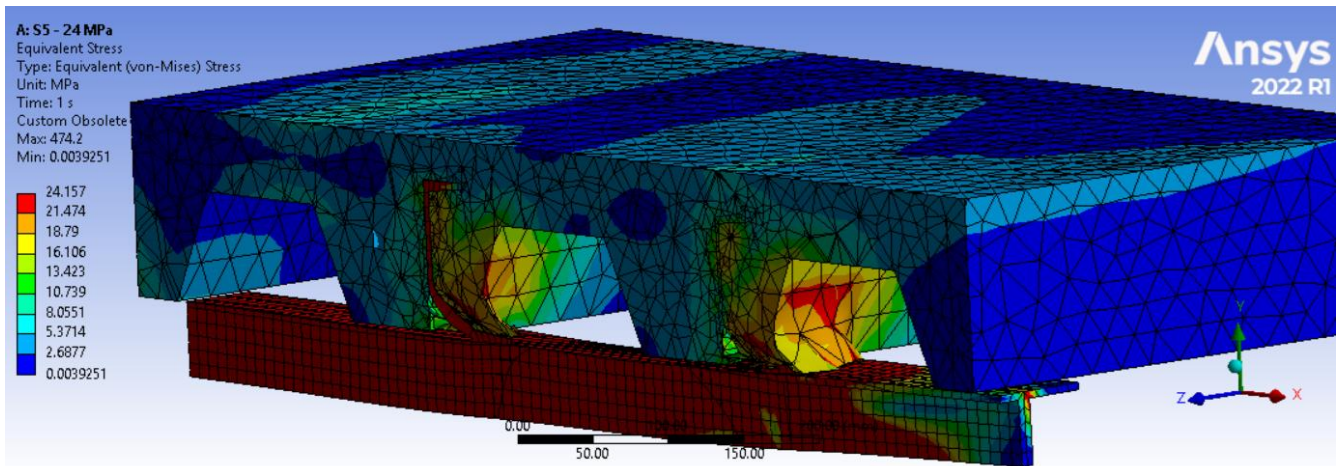


Figura 118. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 5.

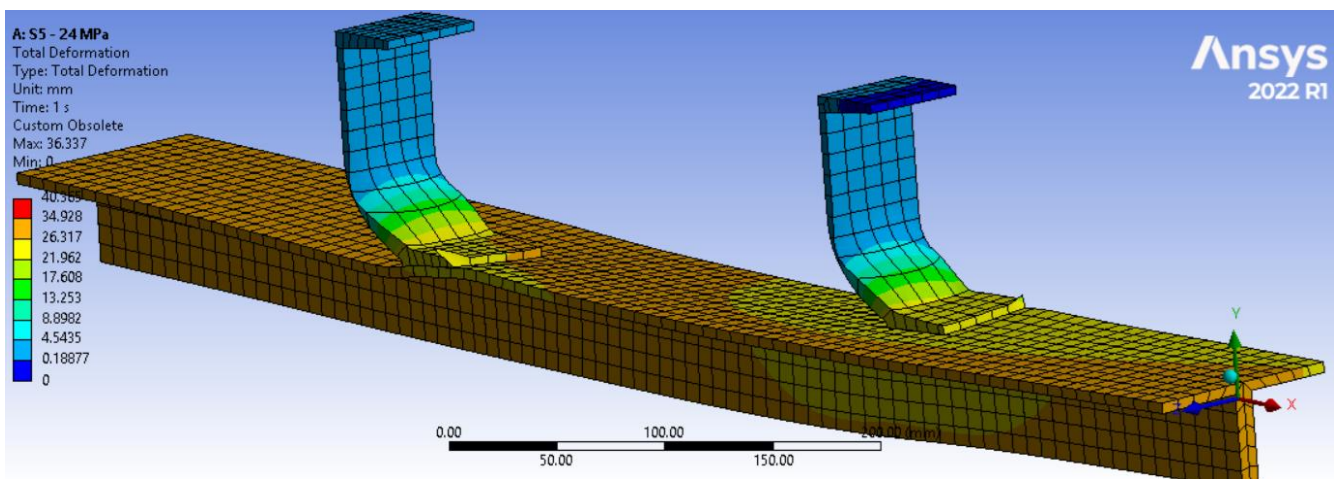


Figura 119. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 5.

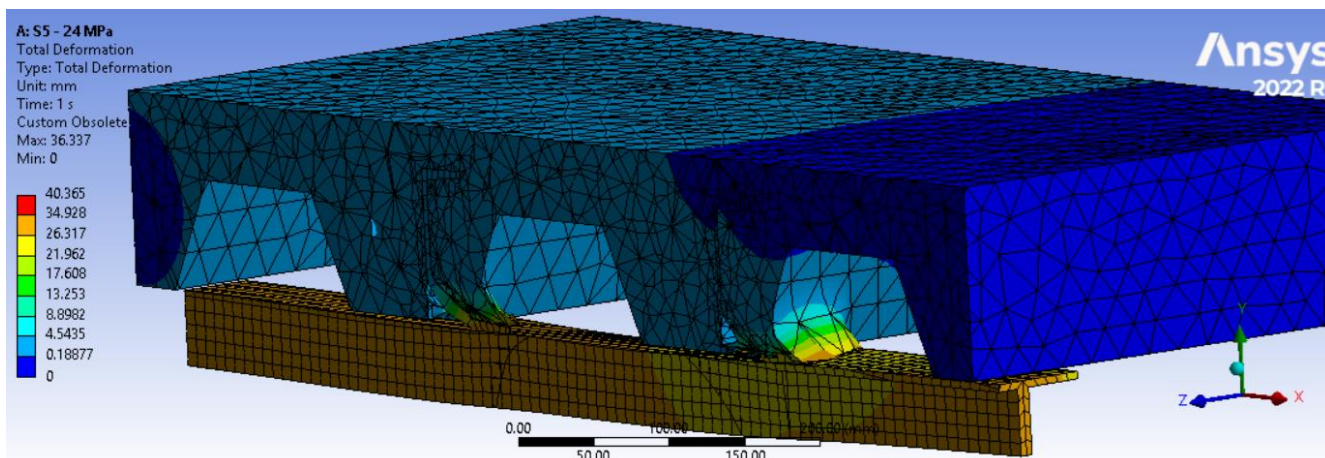
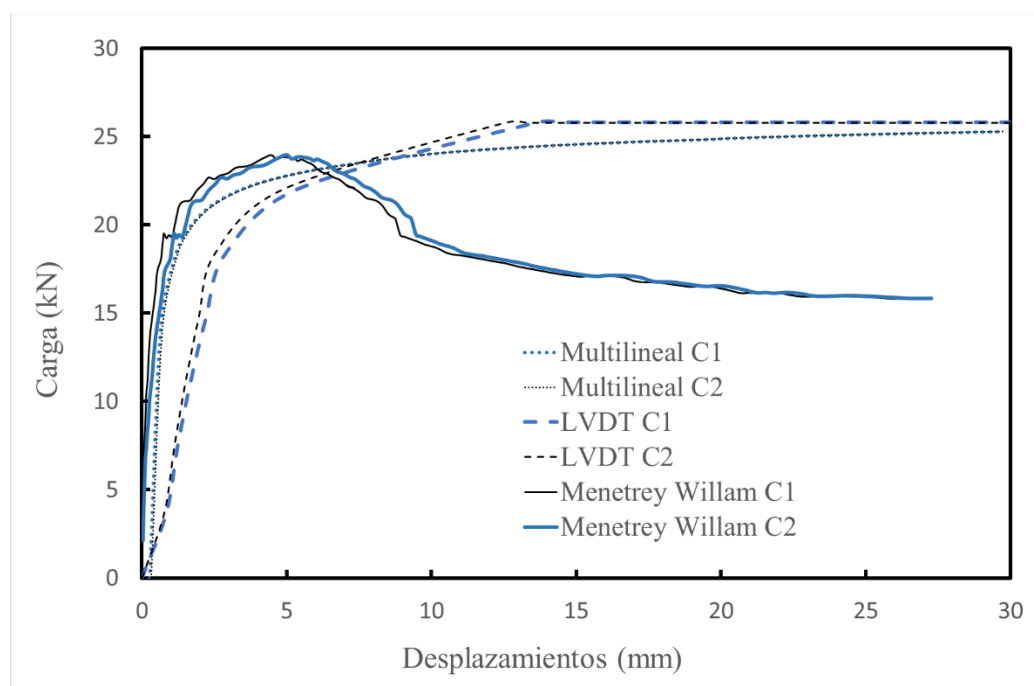


Figura 120. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 5.



2.5.6. Serie 6

La configuración geométrica y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la probeta de la serie número seis son las siguientes:

Tabla 12. Datos de Entrada para la Serie 6.

Serie 6	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	4"
Longitud del Conector	113 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	130 mm
Resistencia a la Compresión Uniaxial	24 MPa
Resistencia a la Tensión Uniaxial	3,4 MPa
Resistencia a la Compresión biaxial	28 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam
	Isotrópico Multilineal

Figura 121. Geometría de la Serie 6.

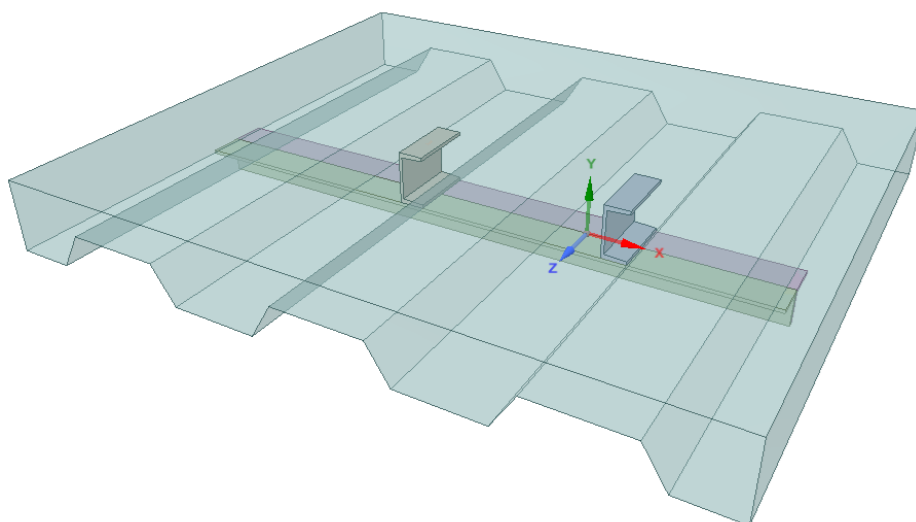


Figura 122. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 6.

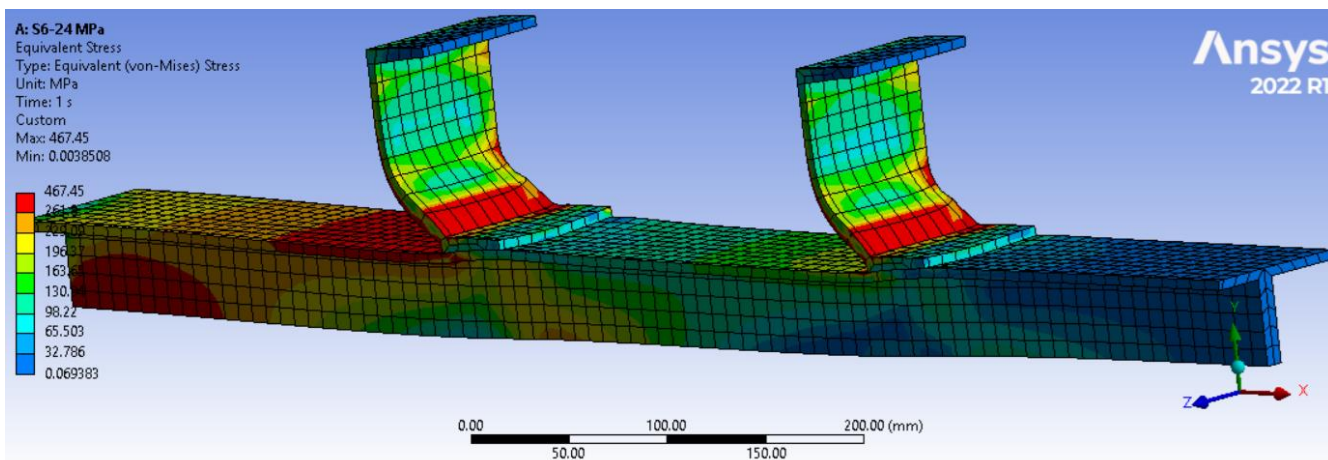


Figura 123. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 6.

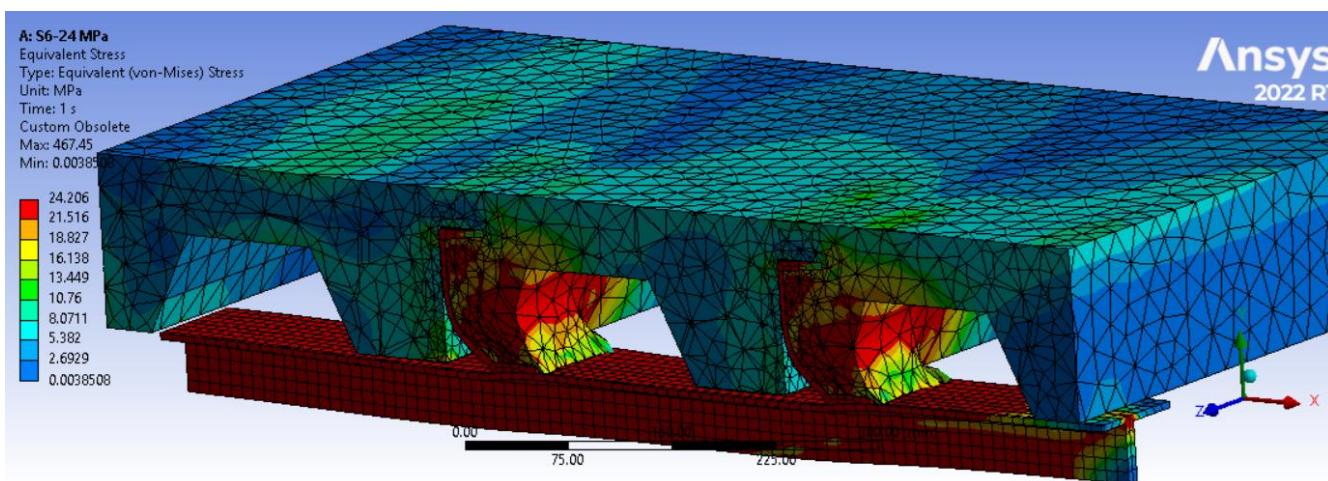


Figura 124. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 6.

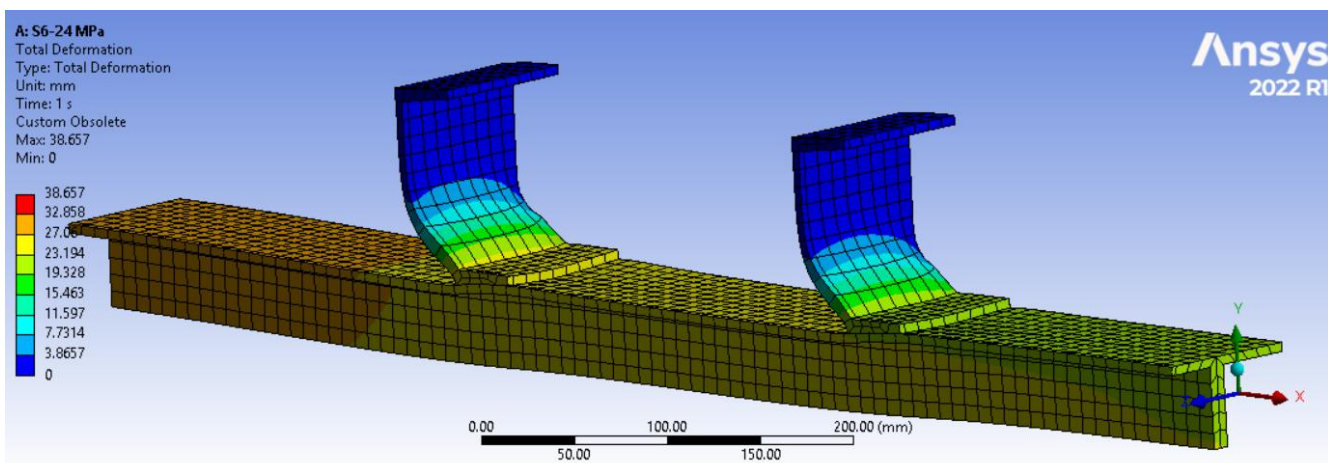


Figura 125. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 6.

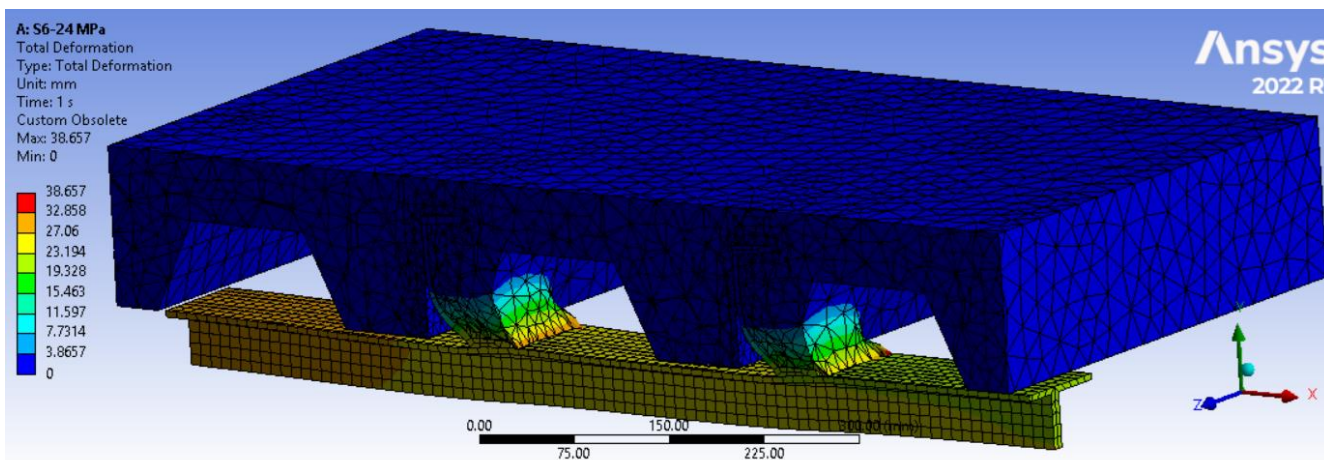
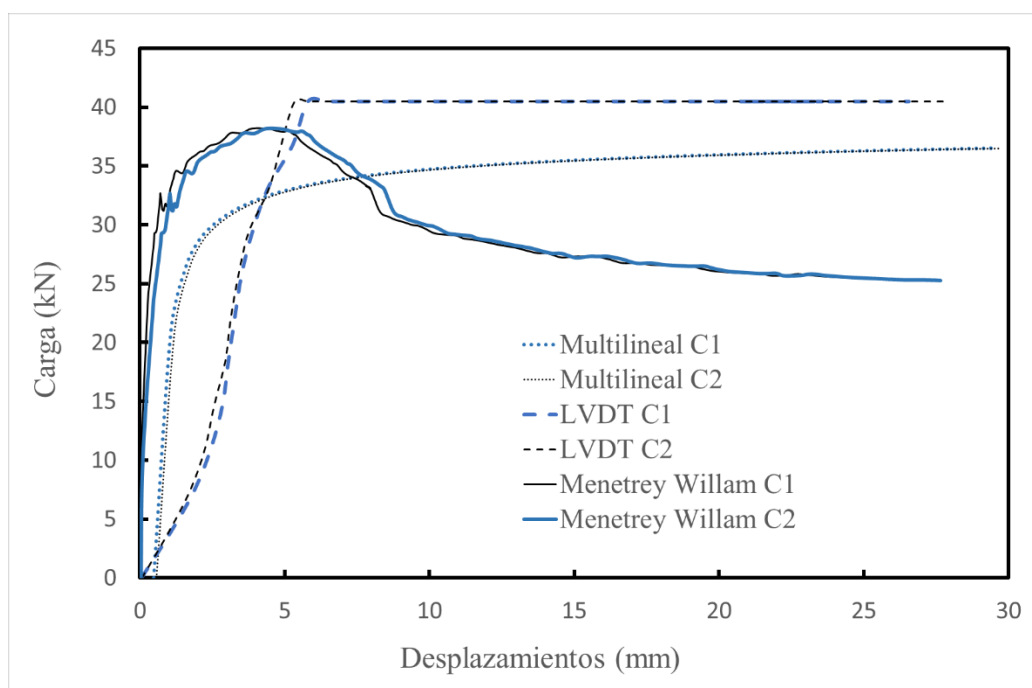


Figura 126. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 6.



2.5.7. Serie 7

La configuración geométrica y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la probeta de la serie número siete son las siguientes:

Tabla 13. Datos de Entrada para la Serie 7.

Serie 7	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	4"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	150 mm
Resistencia a la Compresión Uniaxial	24 MPa
Resistencia a la Tensión Uniaxial	3,4 MPa
Resistencia a la Compresión biaxial	28 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam
	Isotrópico Multilineal

Figura 127. Geometría de la Serie 7.

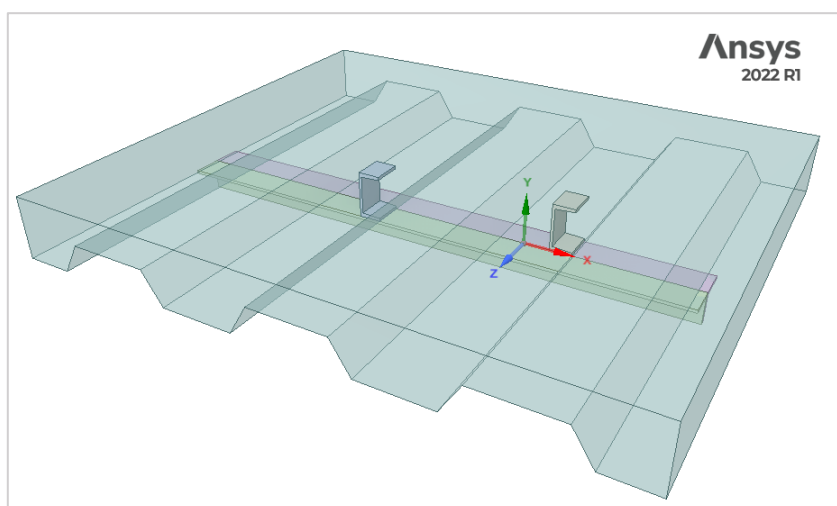


Figura 128. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 7.

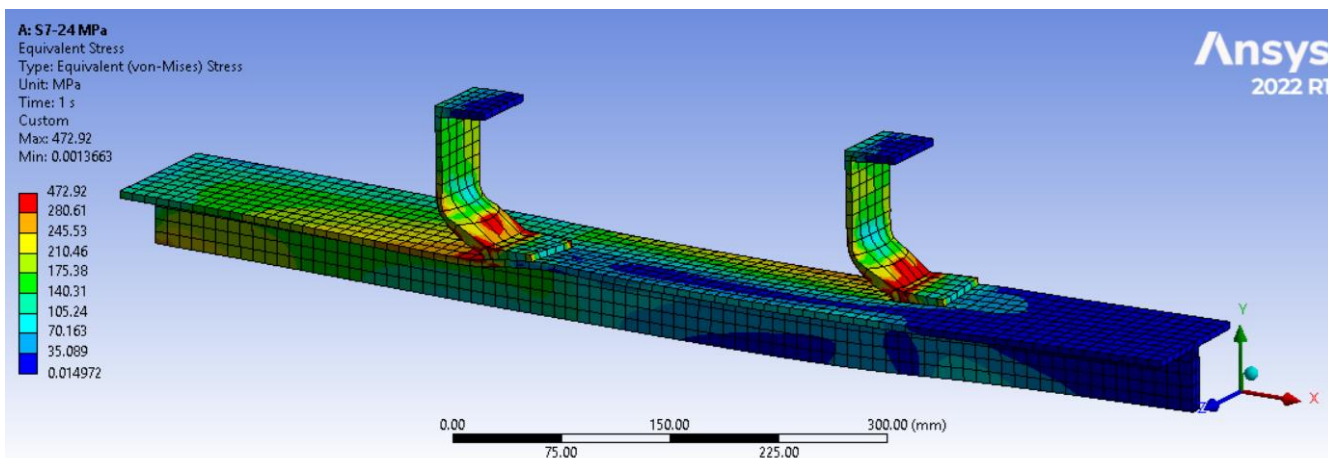


Figura 129. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 7.

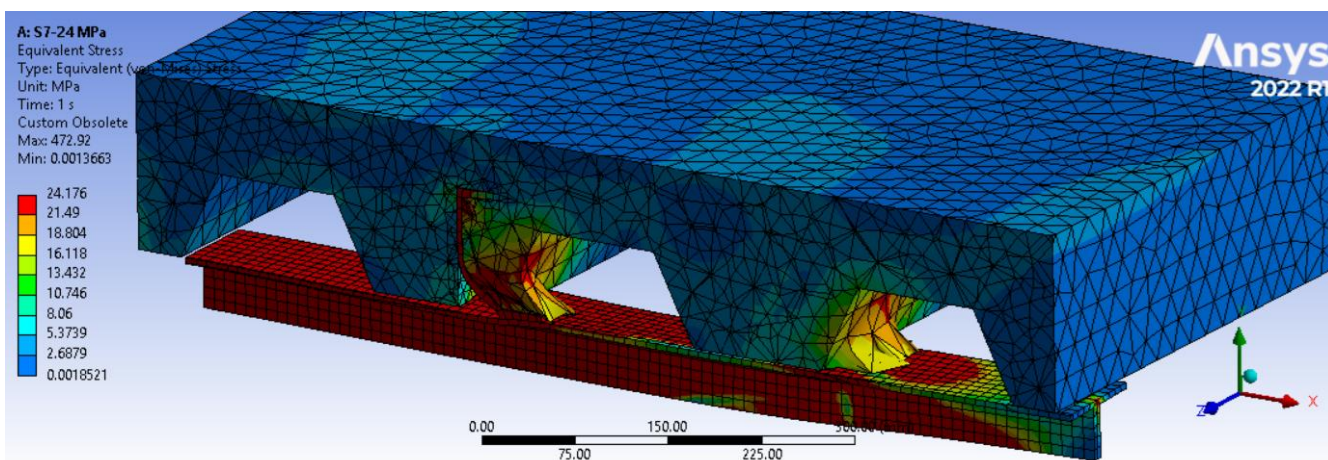


Figura 130. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 7.

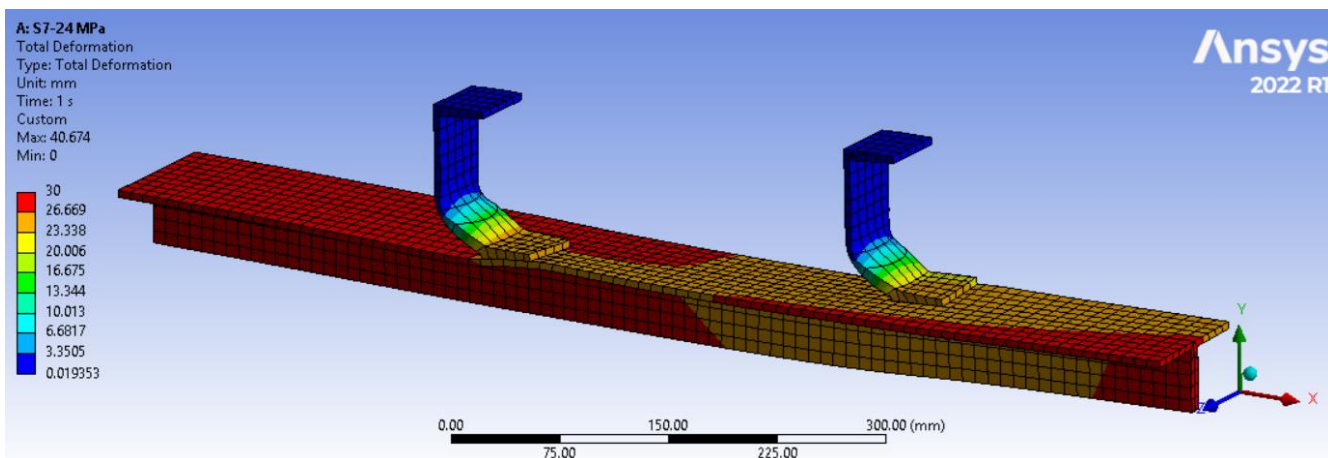


Figura 131. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 7.

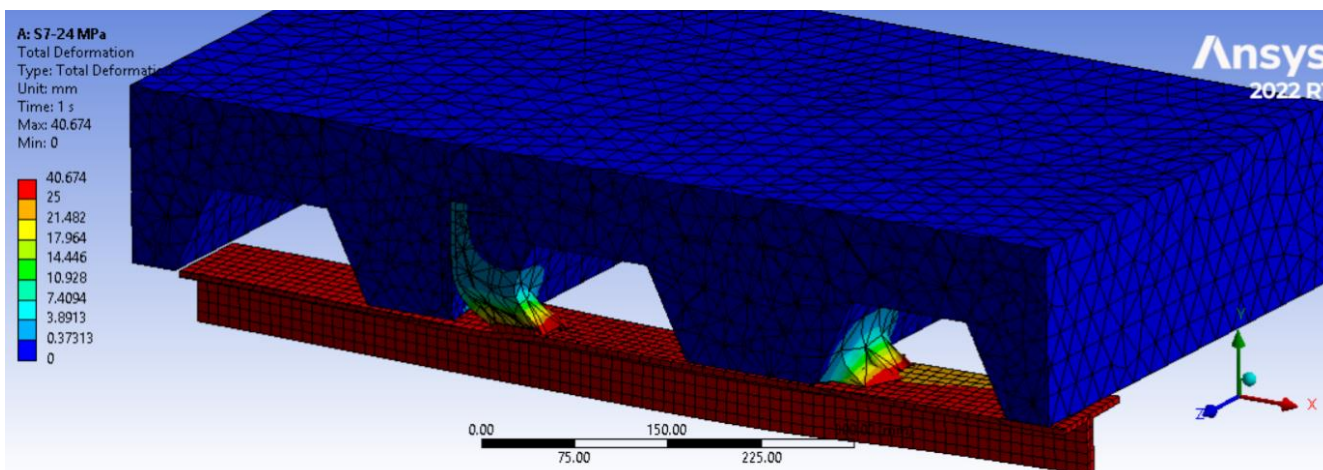
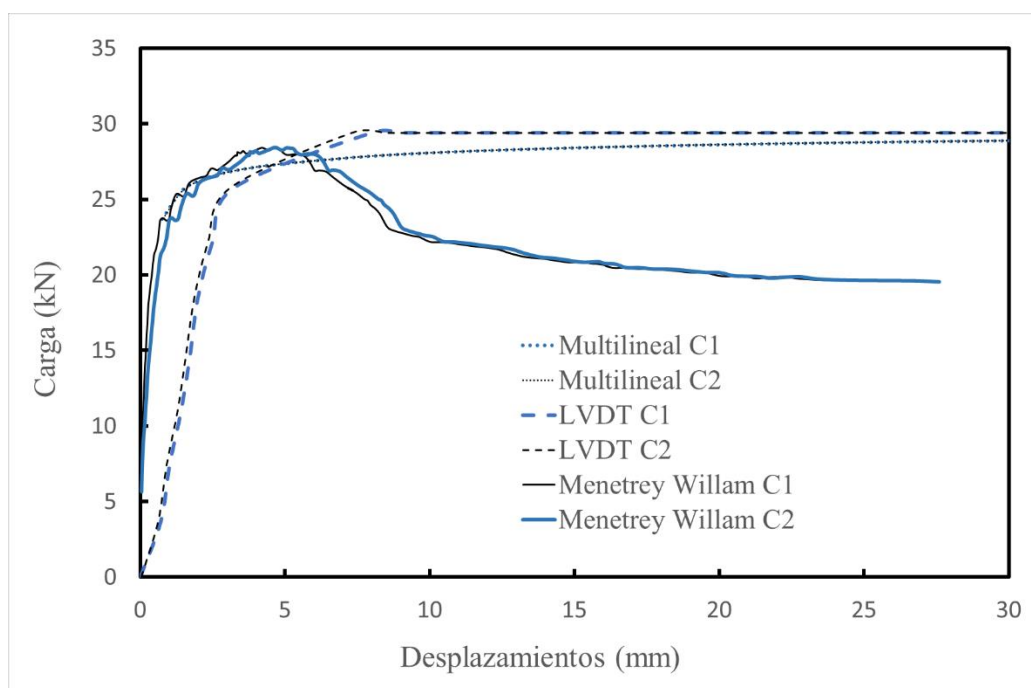


Figura 132. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 7.



2.5.8. Serie 8

La configuración geométrica y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la probeta de la serie número ocho son las siguientes:

Tabla 14. Datos de Entrada para la Serie 8.

Serie 8	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	4"
Longitud del Conector	113 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	150 mm
Resistencia a la Compresión Uniaxial	24 MPa
Resistencia a la Tensión Uniaxial	3,4 MPa
Resistencia a la Compresión biaxial	28 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam
	Isotrópico Multilineal

Figura 133. Geometría de la Serie 8.

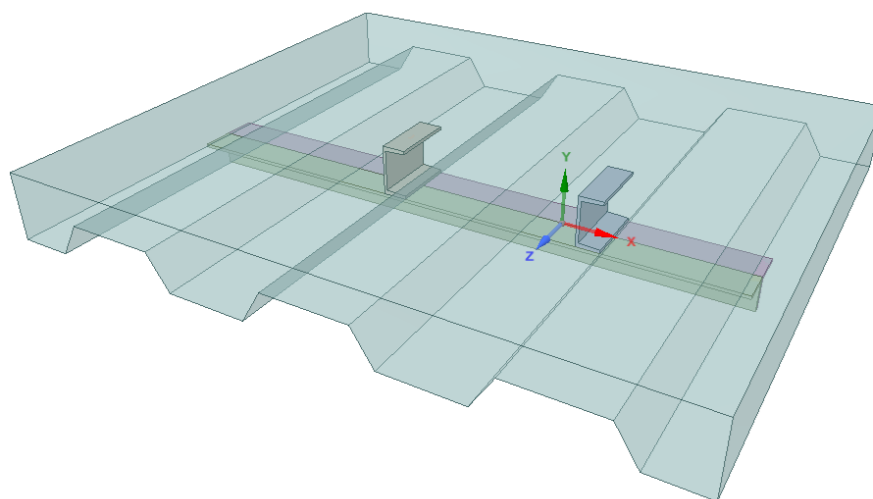


Figura 134. Esfuerzo Equivalente en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 8.

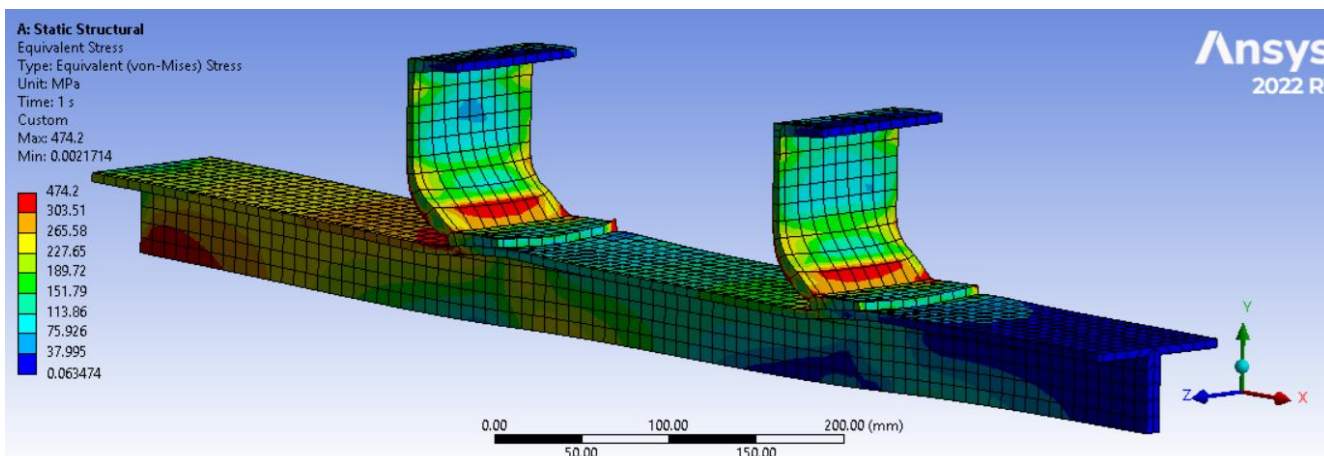


Figura 135. Esfuerzo Equivalente en la Losa de Concreto en la Serie 8.

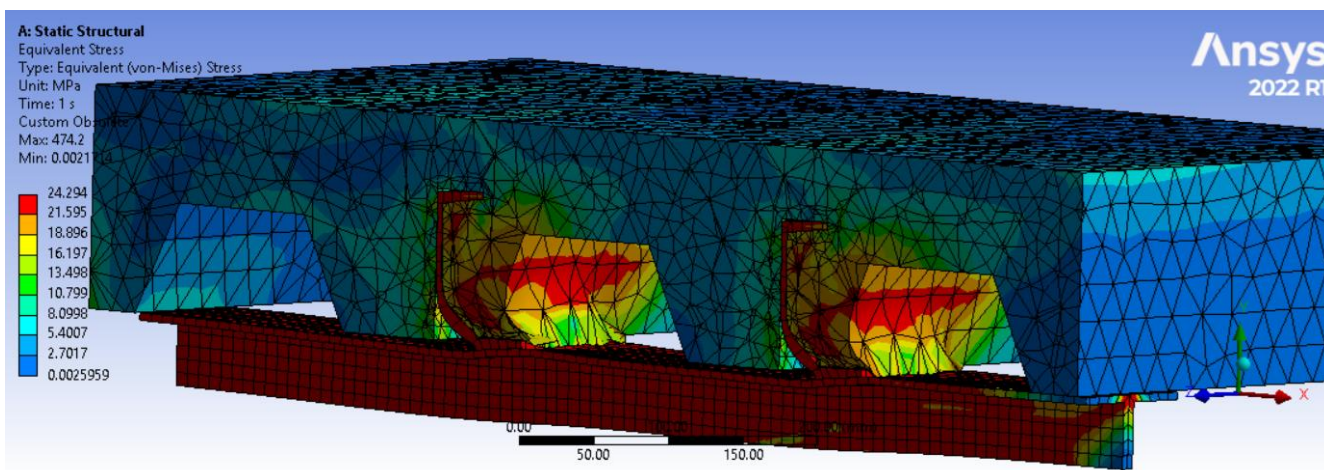


Figura 136. Deformación Total en los Conectores de Cortante Tipo Canal en la Serie 8.

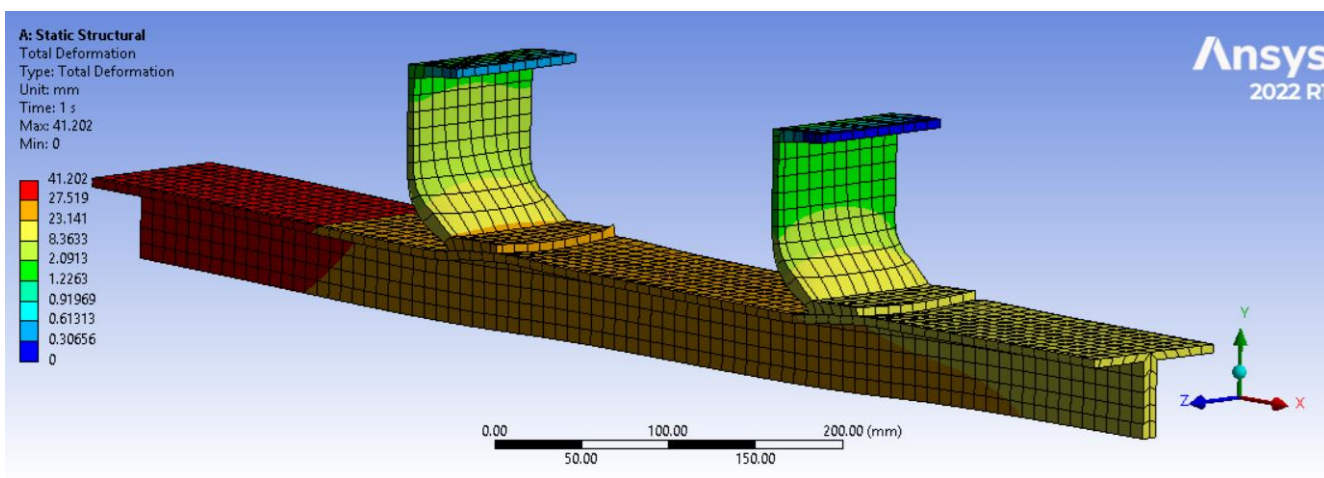


Figura 137. Deformación Total en la Losa de Concreto en la Serie 8.

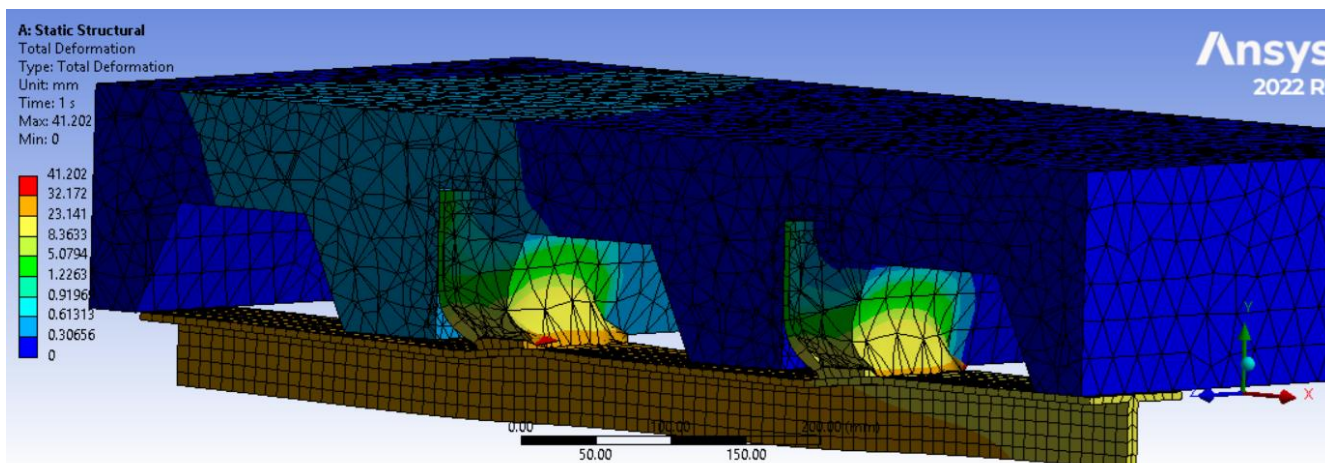
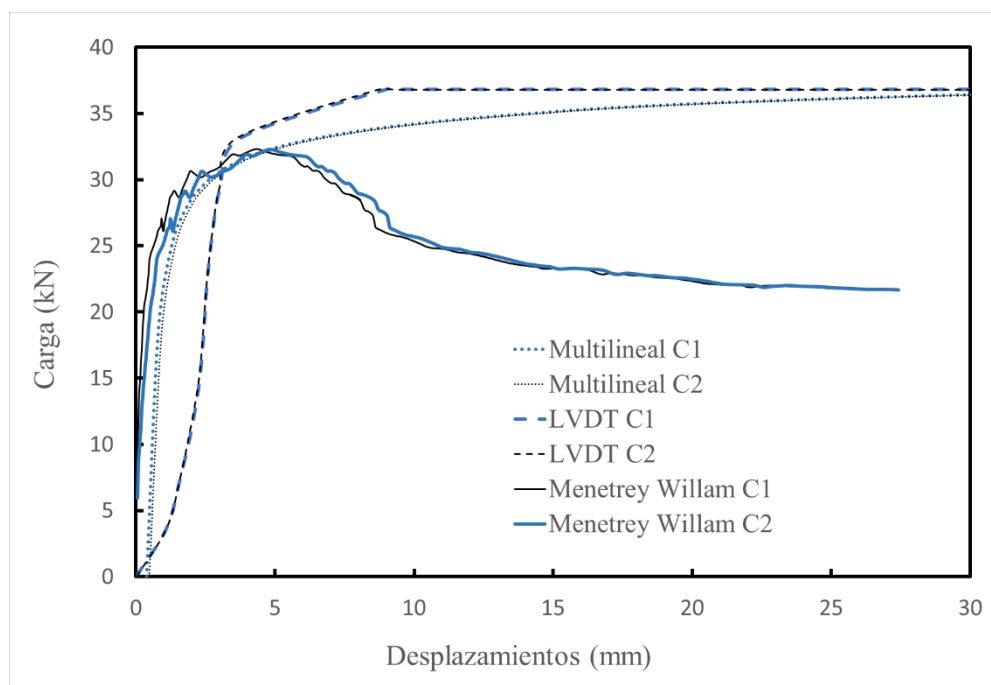


Figura 138. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Serie 8.



2.6. Análisis de Resultados

2.6.1. Reporte de Resultados

Se presentan los resultados de resistencia máxima de los conectores de cortante obtenidos en las simulaciones del modelo determinista, utilizando para el concreto los modelos constitutivos de Menetrey Willam y Endurecimiento Isotrópico Multilineal(EIM). Para el acero de los conectores y viguetas se utilizó Endurecimiento Isotrópico Multilineal.

Tabla 15. Comparación de Resultados obtenidos en la Simulación Numérica.

Serie	Carga máxima por Conector (kN)		Diferencia Menetrey Willam vs. Multilineal
	Simulación Menetrey Willam	Simulación Multilineal	
1	48,77	60,85	19,86 %
2	80,49	94,21	14,56 %
3	68,10	79,28	14,10 %
4	89,61	100,86	11,15 %
5	23,97	25,30	5,27 %
6	38,18	36,51	4,38 %
7	28,43	29,98	5,19 %
8	32,31	36,81	12,23 %

Figura 139. Gráfica Comparativa Resultados Modelo Determinista.

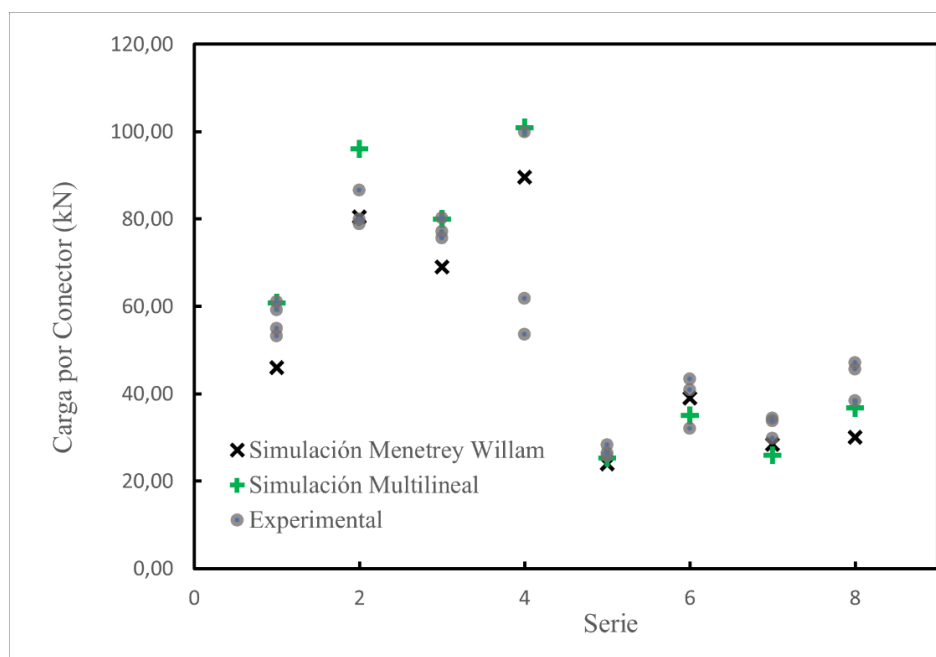


Tabla 16. Comparación de resultados Experimentales y los resultados de la Simulación con Modelo Multilineal en el Concreto.

Serie	Carga máxima por Conector (kN)		Diferencia Experimental vs. MEF Multilineal
	Experimental	Simulación MEF Multilineal	
1	53,16	60,85	12,64 %
	61,07		
	59,23		
2	55,00	94,21	16,24 %
	78,91		
	80,01		
3	86,63	79,28	4,64 %
	80,20		
	77,07		
4	75,60	100,86	46,93 %
	99,88		
	53,53		
5	25,75	25,30	10,70 %
	26,49		
	28,33		
6	40,83	36,51	12,33 %
	43,41		
	32,01		
7	34,40	29,98	12,85 %
	29,80		
	33,84		
8	45,62	36,81	21,83 %
	47,09		
	38,44		

Tabla 17. Comparación de resultados Experimentales y los resultados de la Simulación con Menetrey Willam en el Concreto.

Serie	Carga máxima por Conector (kN)		Diferencia Experimental vs. MEF Menetrey Willam
	Experimental	Simulación MEF Menetrey Willam	
1	53,16	48,77	8,26 %
	61,07		
	59,23		
	55,00		
2	78,91	80,49	0,60 %
	80,01		
	86,63		
	80,20		
3	77,07	68,10	9,91 %
	75,60		
	99,88		
4	53,53	89,61	10,28 %
	61,80		
	25,75		
5	26,49	23,97	6,92 %
	28,33		
	40,83		
6	43,41	38,18	6,49 %
	32,01		
	34,40		
7	29,80	28,43	4,61 %
	33,84		
	45,62		
8	47,09	32,31	15,95 %
	38,44		

2.6.2. Modos de Falla

Se presenta la comparación entre los modos de falla presentados experimentalmente y los obtenidos mediante la simulación numérica por elementos finitos, utilizando el modelo constitutivo de Menetrey Willam en el concreto y Endurecimiento Isotrópico Multilineal en el acero de los conectores y viga.

2.6.2.1. Plastificación del Conector

Figura 140. Plastificación del Conector – MEF Menetrey Willam.

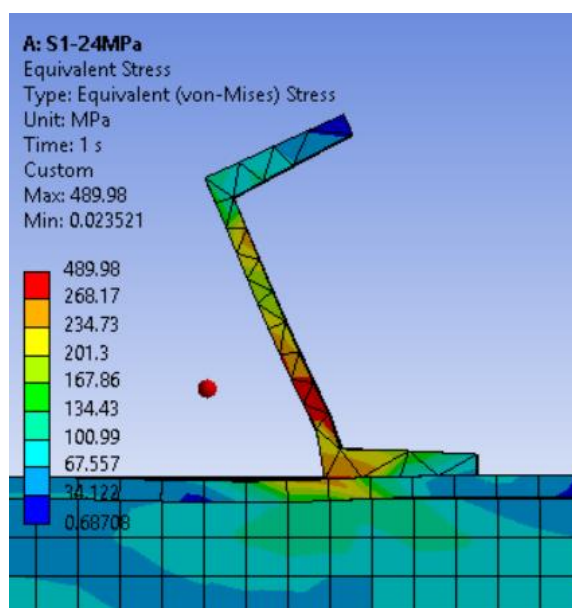


Figura 141. Plastificación del Conector – Experimental (Rodríguez R.M.,2019).



2.6.2.2. Fisuración en la Losa

Figura 142. Esfuerzos Equivalentes en la Losa de Concreto Reforzado– MEF Menetrey Willam.

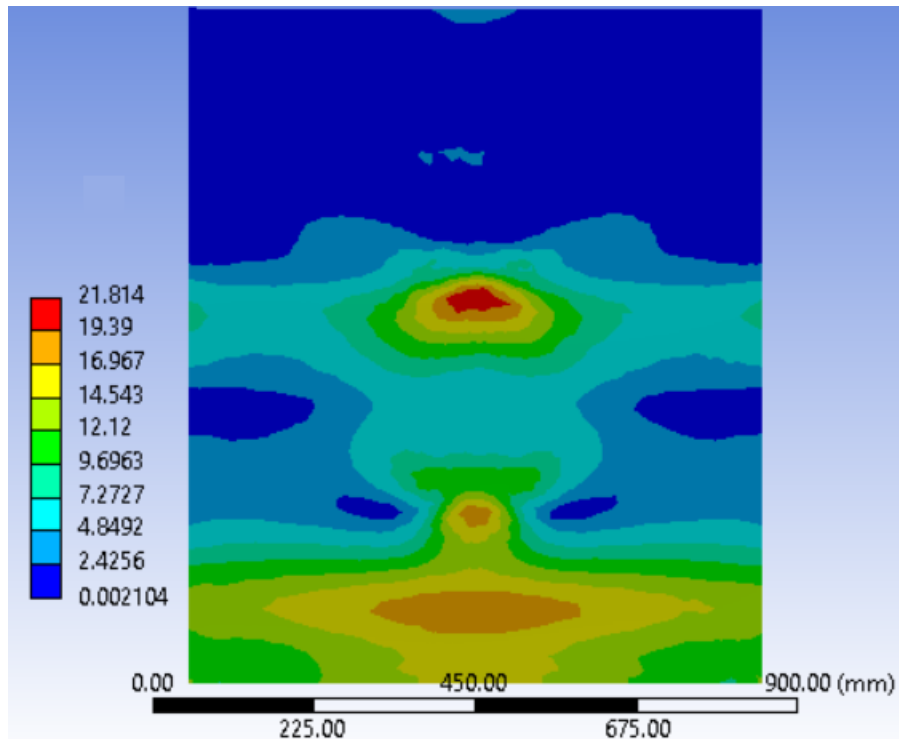


Figura 143. Fisuración de la Losa de Concreto Reforzado – (Rodríguez R.M.,2019).



Figura 144. Fisuración de la Losa de Concreto Reforzado (2) – (Rodríguez R.M.,2019).



2.6.2.3. Cizallamiento de la Losa de Concreto

Figura 145. Esfuerzos Equivalentes en la Losa de Concreto – MEF Menetrey Willam.

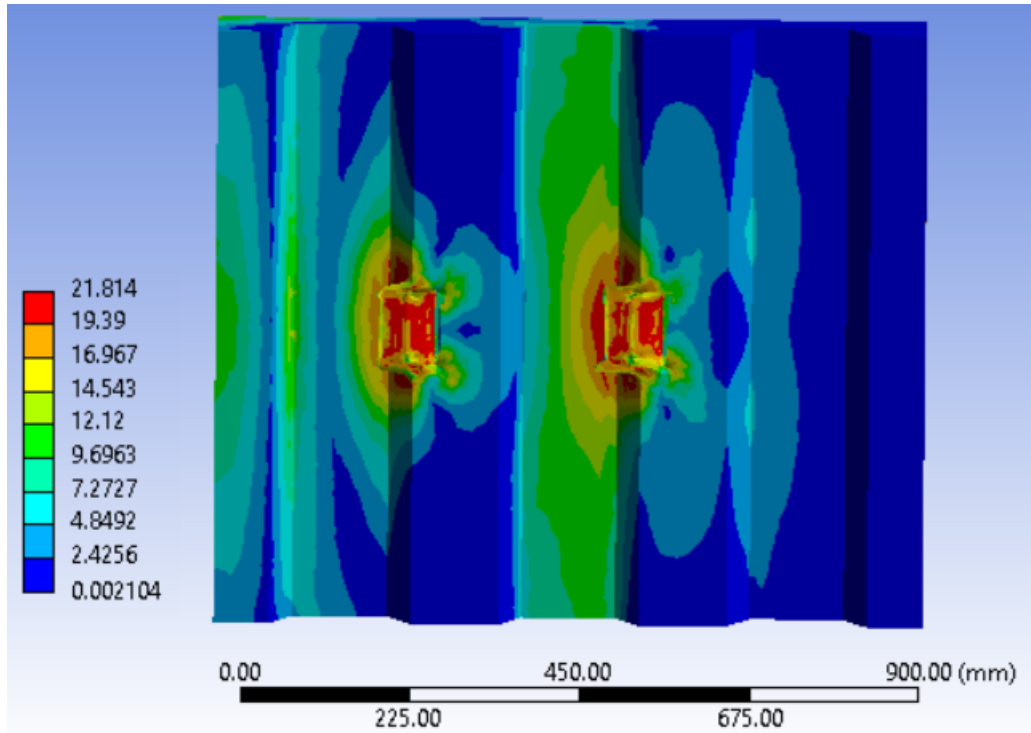


Figura 146. Cizallamiento de la Losa de Concreto – Experimental (Rodríguez R.M.,2019).



Capítulo 3

Modelo Estocástico

Se presenta la formulación del modelo estocástico, incorporando la incertidumbre asociada a las variables. Se identificaron las variables estocásticas presentes en el sistema compuesto. Luego, se asignó una distribución de probabilidad normal a cada variable para representar su comportamiento probabilístico. A continuación, se determinaron las probabilidades conjuntas y los valores aleatorios de las variables estocásticas para una muestra de 30 valores con ayuda de la herramienta de Monte Carlo. Finalmente, se llevó a cabo un análisis estocástico que incluyó la validación del modelo numérico y en la obtención de un intervalo de confianza para la respuesta del sistema.

2.7. Selección de las Variables Estocásticas

A continuación, se proporciona una descripción detallada de las variables que se mantuvieron constantes y aquellas que adquirieron una naturaleza estocástica, tomando valores aleatorios y estando sujetas a la incertidumbre en el contexto de este modelo numérico.

Tabla 18. Descripción de Variables en el Modelo Numérico Estocástico.

Componente del Sistema Compuesto	Variables	
	Definidas	Estocásticas
Conector de Cortante	Geometría/Perfil Ancho Separación	Resistencia a la Tensión
Losa de Concreto	Espesor/Altura	Resistencia a la Compresión
Viguetas	Resistencia a la Tensión Geometría/Perfil Orientación	Ninguna
Otras	Carga Dirección de la carga	Ninguna

2.8. Distribuciones de Probabilidad

Como se especificó en la tabla anterior, las variables estocásticas incluyen la resistencia a la compresión del concreto y la resistencia a la tensión del acero del perfil tipo canal utilizado para los conectores de cortante. Para describir el comportamiento de estas dos variables aleatorias se optó por asociarles la función de distribución de Gauss, ya que se ajusta de manera óptima.

La distribución de Gauss es la más importante de todas, es una distribución continua que es completamente especificada por su media (μ) y su desviación estándar (σ). La función de densidad de probabilidad $f(x)$ de una variable aleatoria (x) que sigue una distribución normal es dada por la fórmula:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

2.8.1. Distribución para la Resistencia a la Compresión del Concreto

Tabla 19. Frecuencia de la Resistencia a Compresión del Concreto.

No. Ensayos	Resistencia a los 46 días	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia Relativa Acumulada	Intervalos	
1	22,63	1	0,125	0,125	0	0,125
2	24,87	1	0,125	0,25	0,125	0,25
3	25,41	1	0,125	0,375	0,25	0,375
4	25,52	1	0,125	0,5	0,375	0,5
5	25,71	1	0,125	0,625	0,5	0,625
6	26,02	1	0,125	0,75	0,625	0,75
7	26,14	1	0,125	0,875	0,75	0,875
8	27,10	1	0,125	1	0,875	1

Media = 25,43
 Desviación Estándar = 1,30

Tabla 20. Distribución Gaussiana de la Resistencia a la Compresión del Concreto.

Resistencia a la compresión	Distribución Normal	Distribución Acumulada
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,01	0,00
23	0,05	0,03
24	0,17	0,14
25	0,29	0,37
26	0,28	0,67
27	0,15	0,89
28	0,04	0,98
29	0,01	1,00
30	0,00	1,00

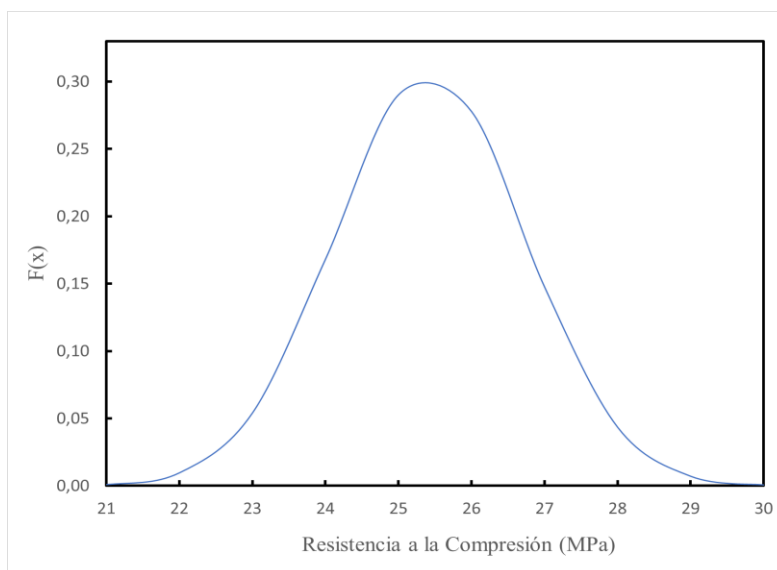


Figura 147. Distribución Gaussiana de la Resistencia a la Compresión del Concreto.

La distribución acumulativa de una variable aleatoria proporciona la probabilidad acumulativa de que dicha variable sea menor o igual a un valor particular. En el contexto de la distribución normal es útil para entender la probabilidad acumulativa asociada con ciertos valores. Se denota comúnmente como:

$$F(x) = P(X \leq x)$$

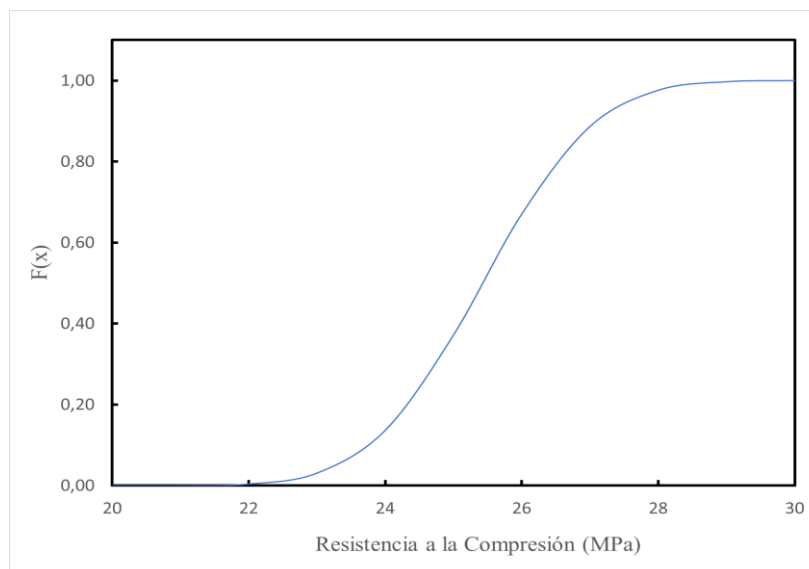


Figura 148. Distribución Acumulada de la Resistencia a la Compresión del Concreto.

2.8.2. Distribución para la Resistencia a la Tensión de los Conectores

Tabla 21. Distribución de Probabilidad Gaussiana para la Resistencia a la Tensión.

Resistencia a la Tensión	Distribución Normal	Distribución Acumulada
358	0,00	0,00
359	0,00	0,00
360	0,00	0,00
361	0,00	0,00
362	0,01	0,01
363	0,03	0,03
364	0,05	0,06
365	0,09	0,13
366	0,12	0,24
367	0,15	0,37
368	0,16	0,53
369	0,14	0,68
370	0,11	0,81
371	0,07	0,90
372	0,04	0,95
373	0,02	0,98
374	0,01	0,99
375	0,00	1,00
376	0,00	1,00
377	0,00	1,00

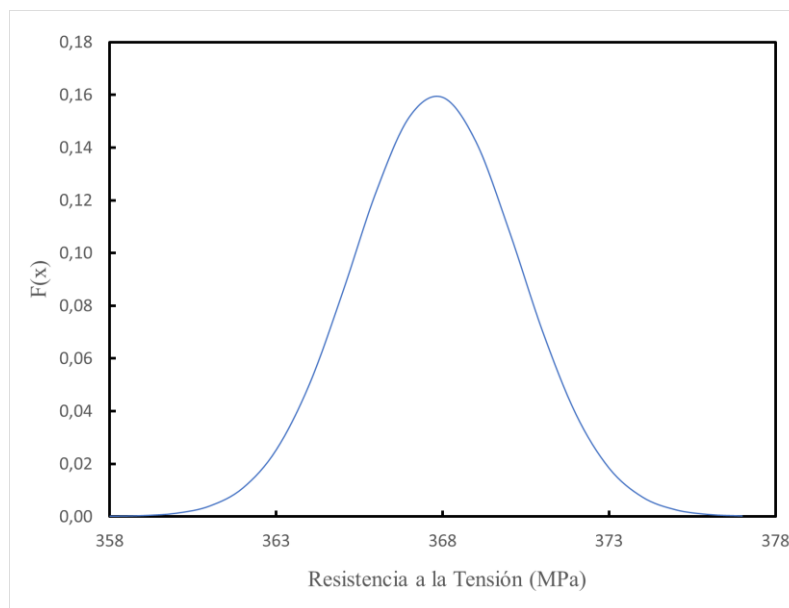


Figura 149. Distribución Gaussiana de la Resistencia a la Tensión de los Conectores.

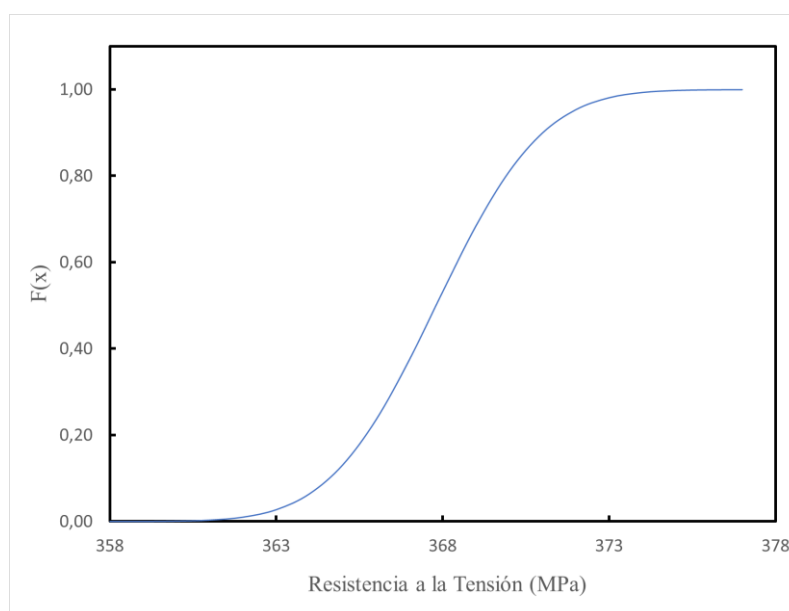


Figura 150. Distribución Acumulada de la Resistencia a la Tensión de los Conectores.

2.9. Reglas de Simulación Estocástica

En este modelo estocástico se empleó la herramienta de simulación de Monte Carlo para obtener una muestra de 30 valores aleatorios para las dos variables estocásticas, basándose en la distribución normal que las representa. Las variables estocásticas, que son la resistencia a la compresión del concreto y la resistencia a la tensión del acero, se relacionaron con probabilidades conjuntas para seleccionar el par de valores que se utilizarán en cada simulación.

La relación de dos variables con probabilidades conjuntas implica analizar la forma en que ambas variables están asociadas en términos de probabilidad. En estadísticas y probabilidad se utiliza este término para describir la probabilidad de que dos eventos ocurran simultáneamente.

Supongamos dos variables, A y B . La probabilidad conjunta de que ambas ocurran al mismo tiempo se puede expresar matemáticamente como:

$$P(A \cap B)$$

Simulación de Monte Carlo

Se utilizó la herramienta matemática de simulación para encontrar los valores aleatorios de las variables estocásticas. Se tomó una muestra de 30 valores y se modeló la probeta de la serie número uno con estos datos.

Tabla 22. Valor de las Variables Estocásticas con Probabilidades Conjuntas.

Muestra	Aleatorio	Resistencia a la Compresión	Resistencia a la Tensión
1	0,91	28,00	372
2	0,75	26,14	370
3	0,32	25,41	367
4	0,99	27,10	374
5	0,00	22,63	361
6	0,56	25,71	369
7	0,12	22,63	365
8	0,08	22,63	365
9	0,88	27,10	371
10	0,69	26,02	370
11	0,89	27,10	371
12	0,77	26,14	370
13	0,45	25,52	368
14	0,42	25,52	368
15	0,29	25,41	367
16	0,56	25,71	369
17	0,41	25,52	368
18	0,61	25,71	369
19	0,88	27,10	371
20	0,79	26,14	370
21	0,69	26,02	370
22	0,63	26,02	369
23	0,65	26,02	369
24	0,64	26,02	369
25	0,40	25,52	368
26	0,15	24,87	366
27	0,02	22,63	363
28	0,66	26,02	369
29	0,77	26,14	370
30	0,69	26,02	370
	Promedio	25,62	368,60

2.10. Preproceso

Se presentan los datos de entrada en el programa de análisis estructural Ansys Workbench que se utilizaron en el preprocesamiento del modelo estocástico.

2.10.1. Geometría y Datos de Entrada

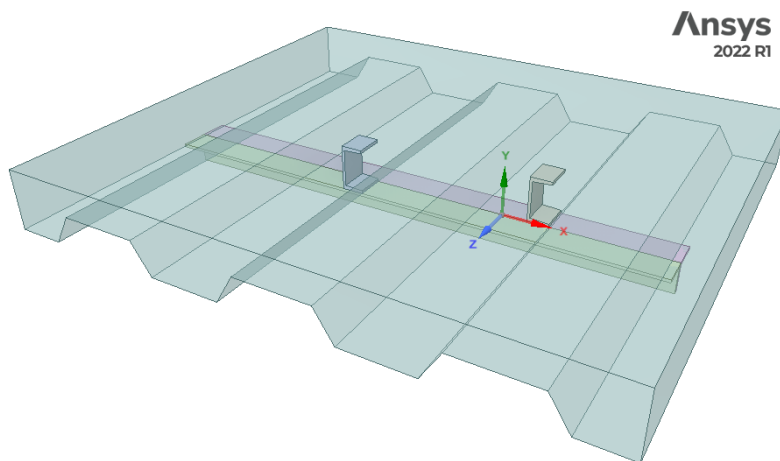


Figura 151. Geometría probeta – Modelo Estocástico.

Tabla 23. Características para las Series del Modelo Estocástico.

Series Modelo Estocástico	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	Variable aleatoria
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	100 mm
Resistencia a la Compresión Uniaxial	Variable aleatoria
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam

2.11. Postproceso

Se registran los resultados de las simulaciones en la siguiente gráfica:

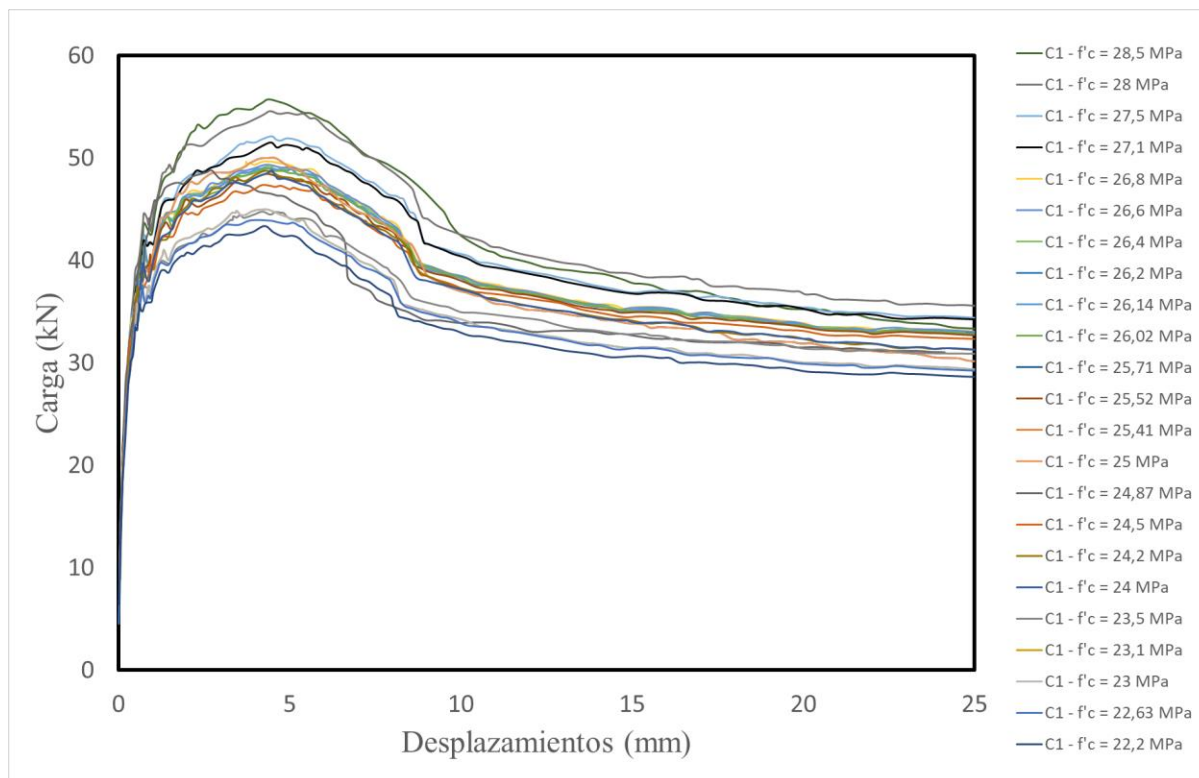


Figura 152. Gráfica Carga vs. Desplazamientos Series Modelo Estocástico.

2.12. Análisis de Resultados

Se presentan los resultados obtenidos de la resistencia máxima de los conectores de cortante en las series del modelo estocástico. Se modelaron treinta series de la probeta de entrepiso compuesto, manteniendo las características geométricas expuestas en la Tabla 23, se varió la resistencia a compresión de la losa y la resistencia a tensión de los conectores utilizando los valores de la Tabla 24, obtenidos con ayuda de la herramienta estadística de Monte Carlo. Se utilizó el modelo constitutivo de Menetrey Willam para el concreto y el Endurecimiento Isotrópico Multilineal para los conectores y viguetas.

Tabla 24. Resultados del Modelo Numérico Estocástico.

Muestra	Aleatorio	Resistencia a la Compresión	Resistencia a la Tensión	Carga Máxima por Conector (kN)
1	0,91	28,00	372	54,59
2	0,75	26,14	370	48,98
3	0,32	25,41	367	50,39
4	0,99	27,10	374	51,53
5	0,00	22,63	361	43,91
6	0,56	25,71	369	50,01
7	0,12	22,63	365	43,91
8	0,08	22,63	365	43,91
9	0,88	27,10	371	51,53
10	0,69	26,02	370	48,95
11	0,89	27,10	371	51,53
12	0,77	26,14	370	48,98
13	0,45	25,52	368	48,63
14	0,42	25,52	368	48,63
15	0,29	25,41	367	50,39
16	0,56	25,71	369	50,01
17	0,41	25,52	368	48,63
18	0,61	25,71	369	50,01
19	0,88	27,10	371	51,53
20	0,79	26,14	370	48,98
21	0,69	26,02	370	48,95
22	0,63	26,02	369	48,95
23	0,65	26,02	369	48,95
24	0,64	26,02	369	48,95
25	0,40	25,52	368	48,63
26	0,15	24,87	366	48,77
27	0,02	22,63	363	43,91
28	0,66	26,02	369	48,95
29	0,77	26,14	370	48,98
30	0,69	26,02	370	48,95
	Promedio	25,62	368,60	48,97

Se calculo un intervalo de confianza para estimar un rango del valor esperado de la resistencia máxima de los conectores. Se calculó un intervalo de confianza con un nivel del 95% de probabilidad, lo que significó que existe un 95% de confianza de que este intervalo contenga el valor de la resistencia.

$$\bar{p} \pm Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$$

Tamaño de la muestra = 30

Nivel de Confianza = 95 %

Desviación Estándar, $S = 3.50$

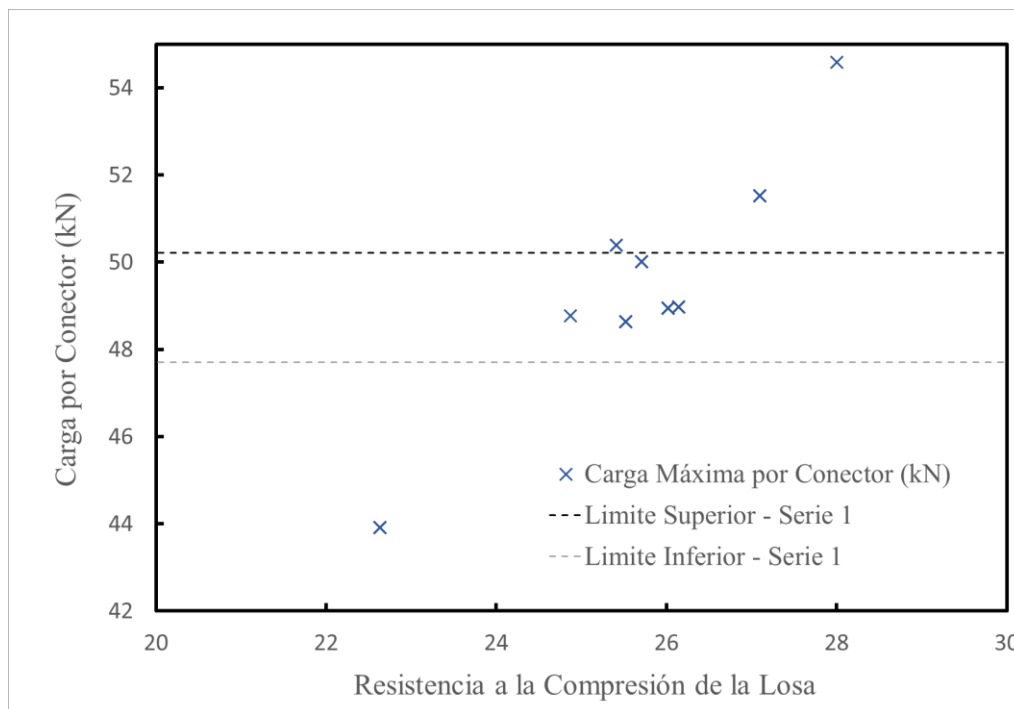
Media = 48.97

$Z = 1.960$

$\alpha = 5\%$

Intervalo de Confianza [47.71 – 50.22]

Figura 153. Gráfica del Intervalo de Confianza para la Serie 1.



Capítulo 4

Ejemplos de Aplicación

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al emplear el modelo matemático propuesto para predecir el valor esperado de las resistencias máximas en los conectores de cortante en nuevas configuraciones del sistema compuesto de entrepiso. Se llevaron a cabo cuatro ejemplos de aplicación, donde se varió la resistencia a compresión del concreto, la altura de la losa, y finalmente, se modificó el esfuerzo de fluencia y la longitud de los conectores.

2.13. Ejemplo de Aplicación No. 1

Se simuló una serie de probetas variando la resistencia a compresión del concreto en valores de 21 MPa, 24 MPa, 28 MPa, 35 MPa y 42 MPa. Se utilizó el modelo constitutivo de Menetrey Willam para el concreto y Endurecimiento Isotrópico Multilineal para el acero. Las demás variables se mantuvieron constantes, las cuales se describen a continuación:

Tabla 25. Datos de Entrada para el Ejemplo de Aplicación No. 1.

Ejemplo de Aplicación No. 1	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	100 mm
Resistencia a la Compresión	Variable
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam

Figura 154. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - Ejemplo de Aplicación No. 1.

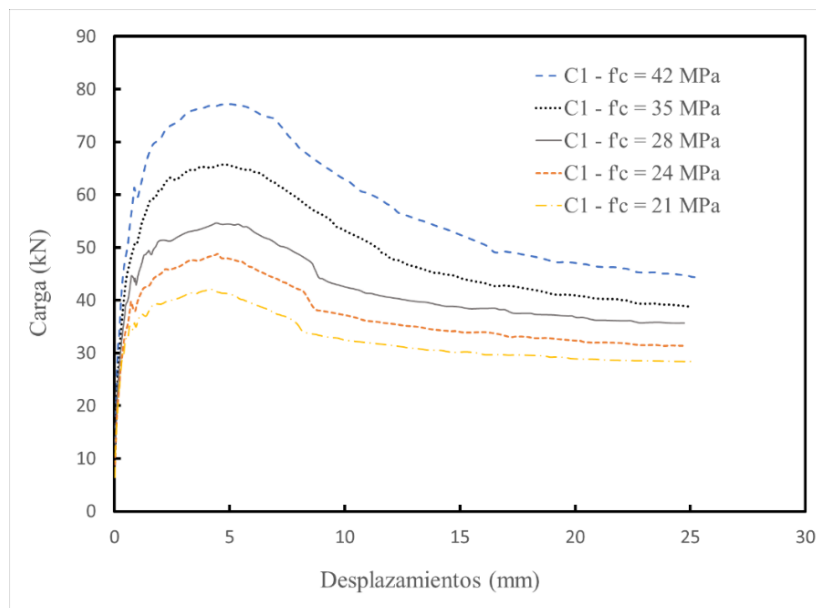
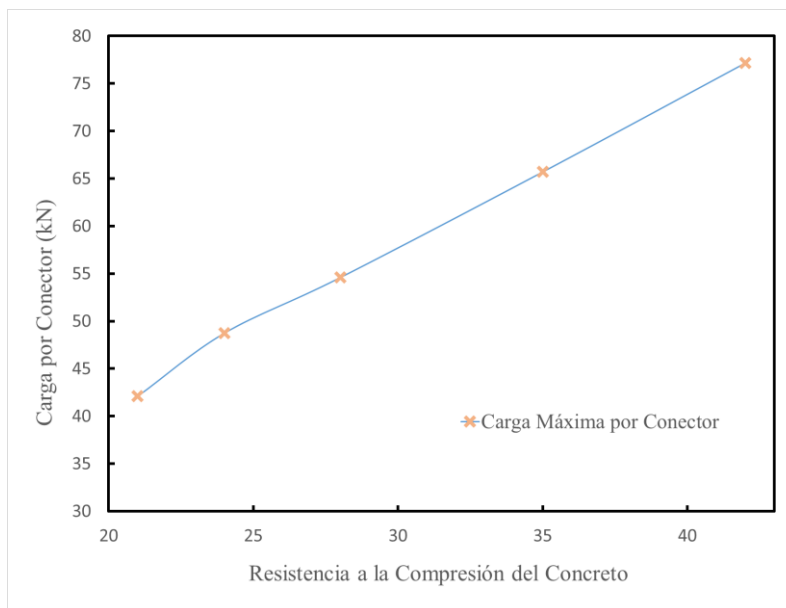


Figura 155. Gráfica Comparativa - Ejemplo de Aplicación No. 1.



Con base en los resultados obtenidos mediante la simulación numérica propuesta en esta investigación, los resultados muestran un comportamiento creciente, con un aumento en la resistencia de los conectores de aproximadamente un 15% en cada incremento.

Influencia de la Resistencia a la Compresión del Concreto

Figura 156. Zona de Influencia de la Resistencia a la Compresión del Concreto - $f_c = 21$ MPa.

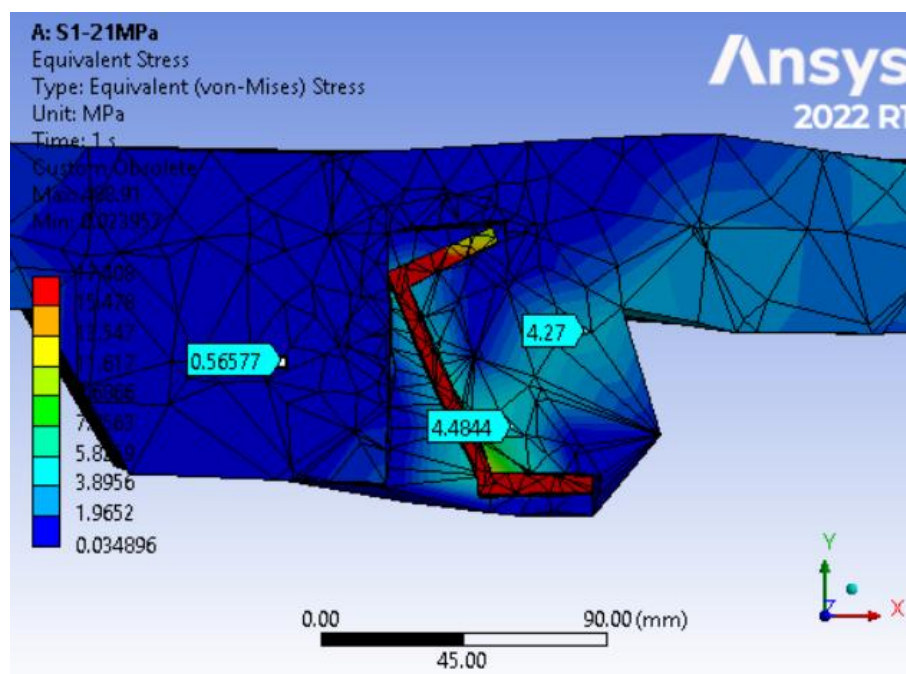


Figura 157. Zona de Influencia de la Resistencia a Compresión del Concreto - $f'_c = 24$ MPa.

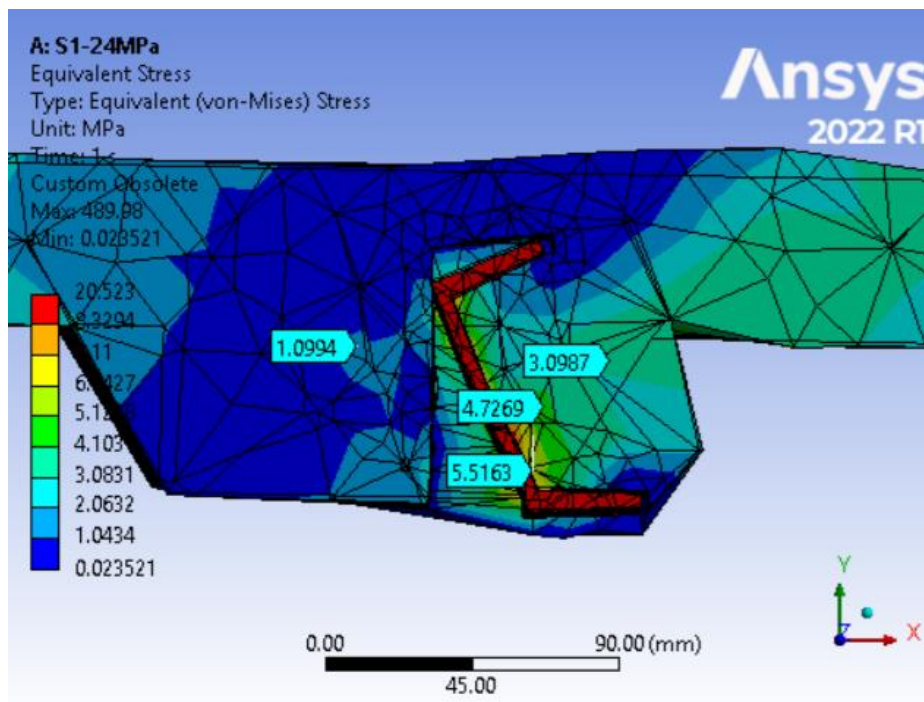


Figura 158. Zona de Influencia de la Resistencia a Compresión del Concreto - $f'_c = 28$ MPa.

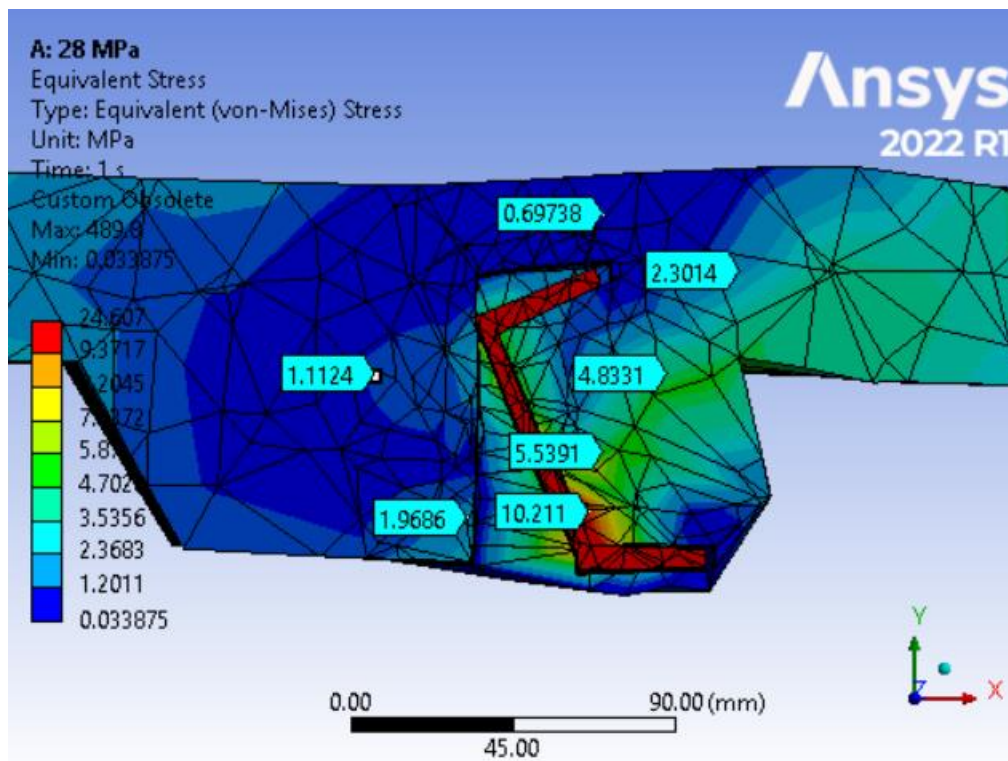


Figura 159. Zona de Influencia de la Resistencia a Compresión del Concreto - $f'_c = 35$ MPa.

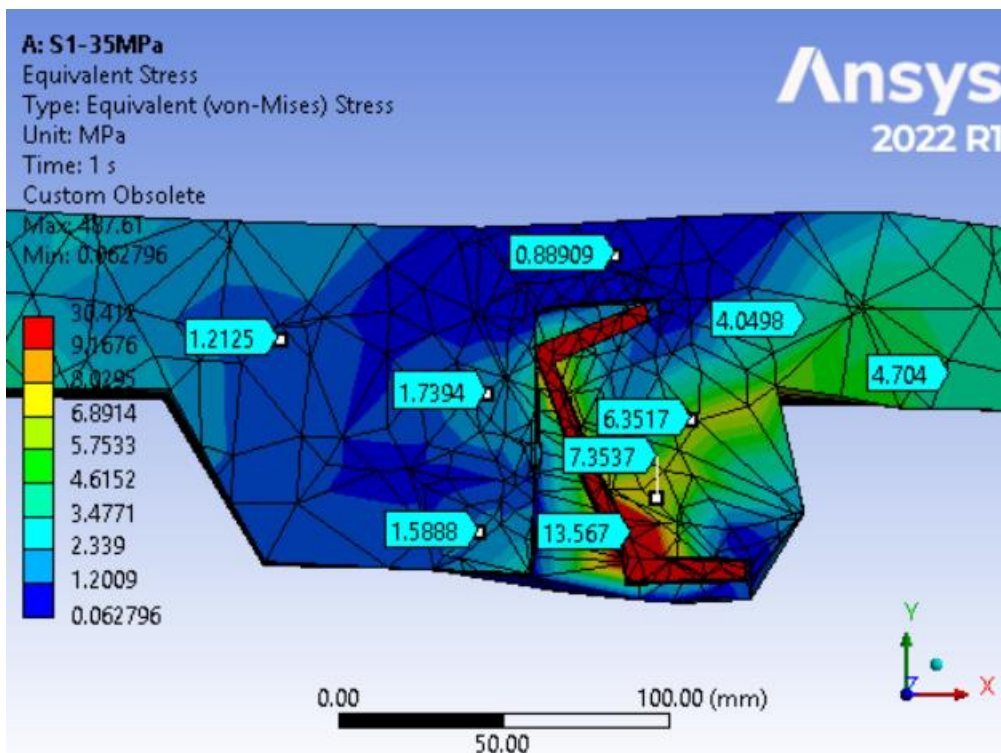
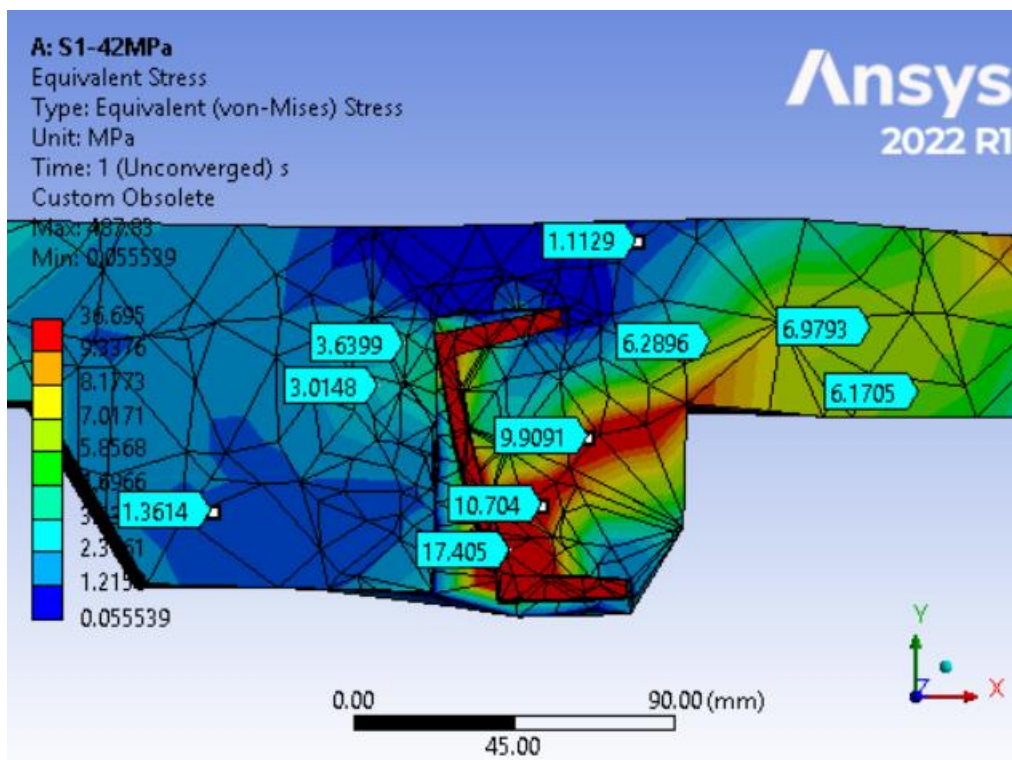


Figura 160. Zona de Influencia de la Resistencia a Compresión del Concreto - $f'_c = 42$ MPa.



2.14. Ejemplo de Aplicación No. 2

Se hizo una serie de probetas, donde se varió la altura de la losa de concreto de 100 mm a 150 mm. Las demás variables se mantuvieron constantes, las cuales se describen a continuación:

Tabla 26. Datos de Entrada para el Ejemplo de Aplicación No. 2.

Ejemplo de Aplicación No. 2	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	Variable
Resistencia a la Compresión	21 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam

Figura 161. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) - Ejemplo de Aplicación No. 2.

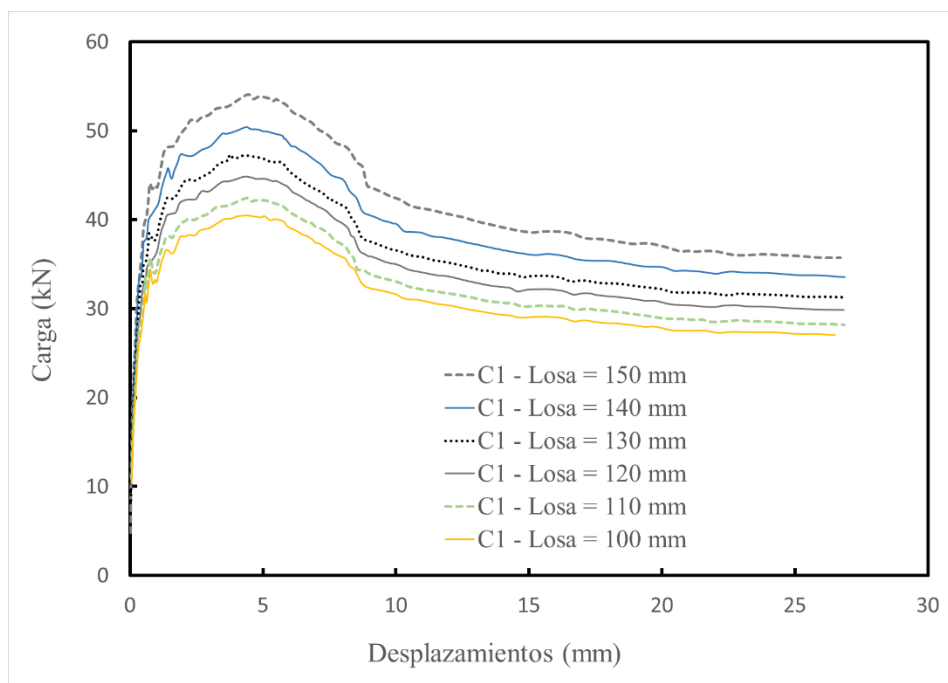
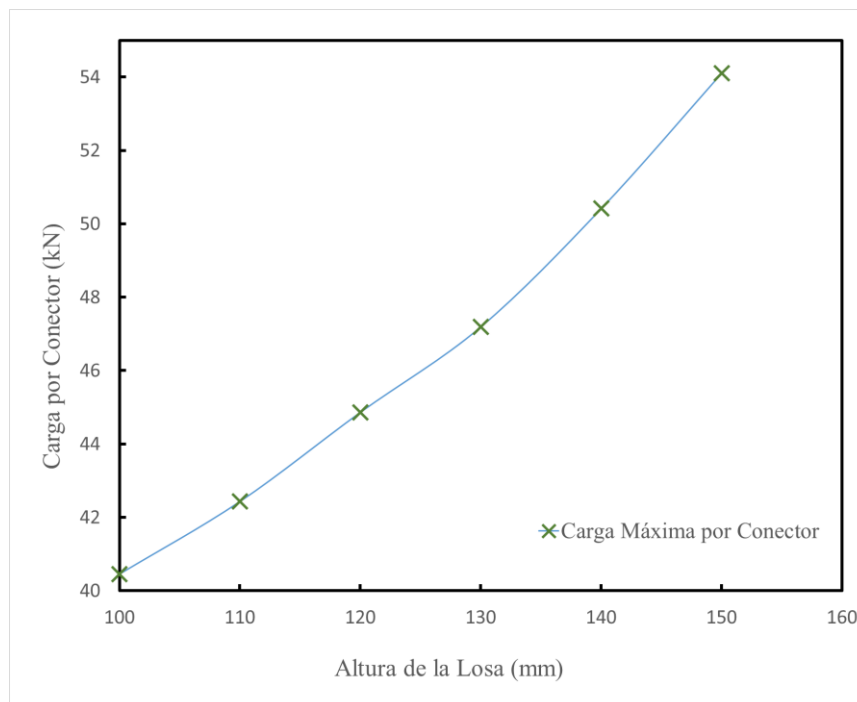


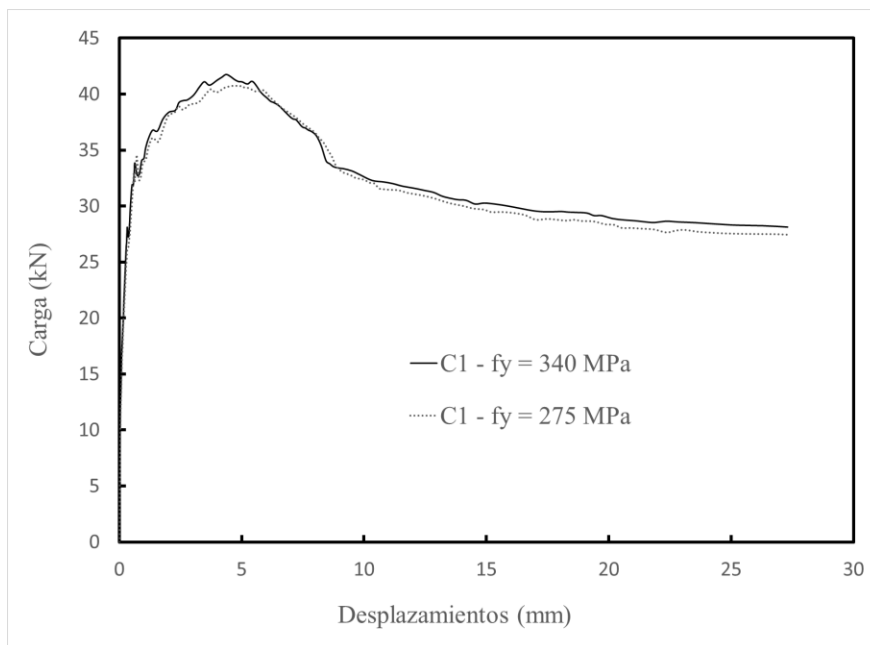
Figura 162. Gráfica Comparativa - Ejemplo de Aplicación No. 2.

2.15. Ejemplo de Aplicación No. 3

Se hizo un par de probetas, donde se varía el esfuerzo de fluencia del conector tipo canal 275 MPa y 340 MPa. Las demás variables se mantuvieron constantes, las cuales se describen a continuación:

Tabla 27. Datos de Entrada para el Ejemplo de Aplicación No. 3.

Ejemplo de Aplicación No. 3	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	50 mm
Esfuerzo de Fluencia	Variable
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	100 mm
Resistencia a la Compresión	21 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam

Figura 163. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Ejemplo de Aplicación No. 3.

2.16. Ejemplo de Aplicación No. 4

Se realizó una serie de simulaciones donde se varió la longitud del conector de cortante tipo canal. Las demás variables se mantuvieron constantes, las cuales se describen a continuación:

Tabla 28. Datos de Entrada para el Ejemplo de Aplicación No. 4.

<u>Ejemplo de Aplicación No. 4</u>	
<u>Conector de Cortante</u>	
Tipo Canal	3"
Longitud del Conector	Variable
Esfuerzo de Fluencia	368 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Vigueta en celosía</u>	
Esfuerzo de Fluencia	428 MPa
Modelo Constitutivo	Isotrópico Multilineal
<u>Losa de Concreto</u>	
Altura de la Losa	100 mm
Resistencia a la Compresión	21 MPa
Modelo Constitutivo	Menetrey Willam

Figura 164. Curva Carga (kN) vs. Desplazamiento (mm) – Ejemplo de Aplicación No. 4.

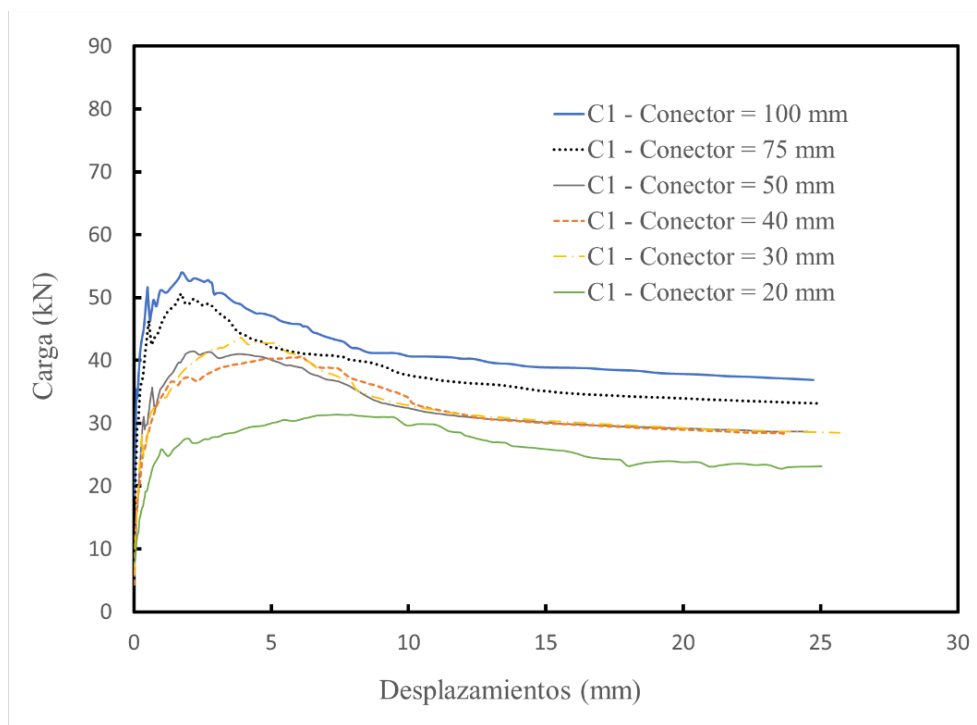


Figura 165. Gráfica Comparativa - Ejemplo de Aplicación No. 4.

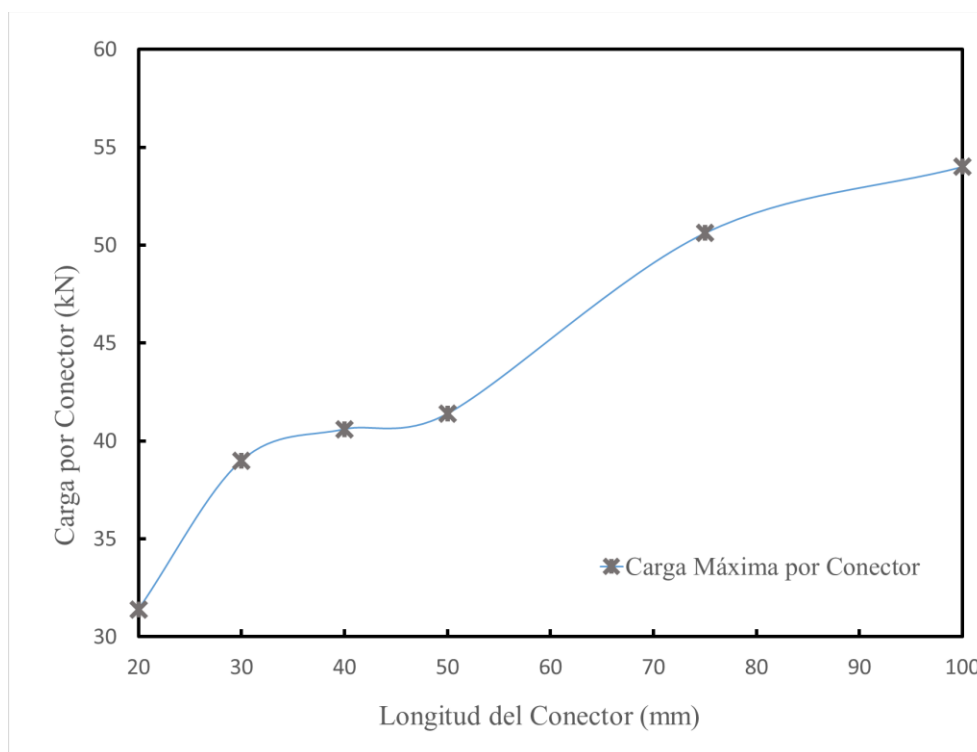
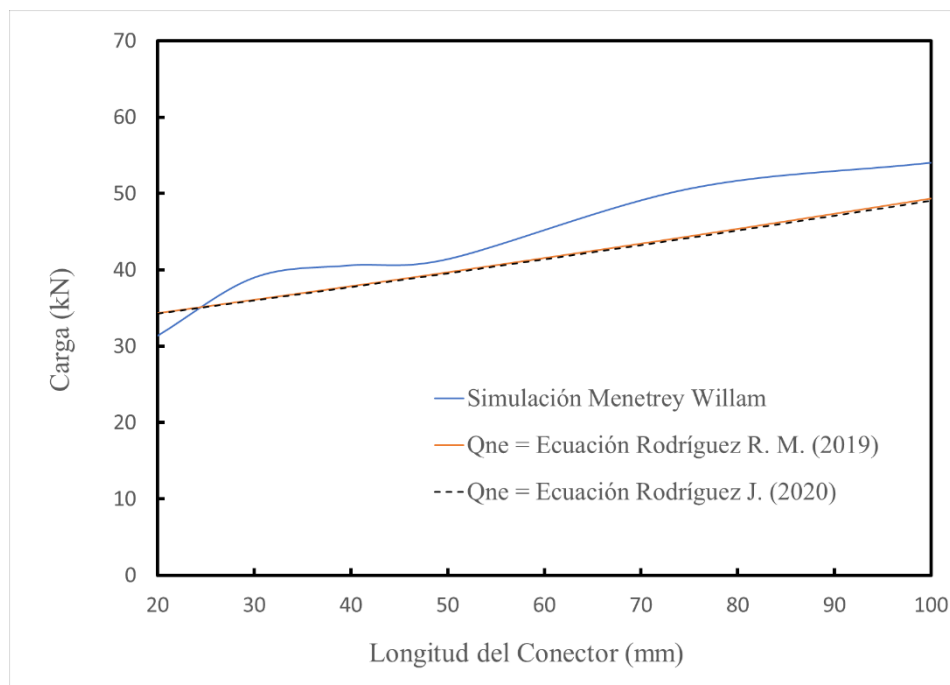


Tabla 29. Comparación de Resultados de la Simulación vs. Ecuación de Rodríguez R. M (2019).

Ejemplo de Aplicación No. 4 - Comparación 1			
Longitud Conector (mm)	Carga máxima por Conector (kN)		Diferencia Ecuación Rodríguez R. M. (2019) vs. MEF
	Simulación Menetrey Willam	Qne = Ecuación Rodríguez R. M. (2019)	
20	31,39	34,37	9,50 %
30	43,62	36,11	17,21 %
40	40,60	37,89	6,68 %
50	41,40	39,70	4,10 %
75	50,62	44,40	12,29 %
100	54,01	49,33	8,67 %

Tabla 30. Comparación de Resultados de la Simulación vs. Ecuación de Rodríguez. J (2020).

Ejemplo de Aplicación No. 4 - Comparación 2			
Longitud Conector (mm)	Carga máxima por Conector (kN)		Diferencia Ecuación Rodríguez J. (2020) vs. MEF
	Simulación Menetrey Willam	Qne = Ecuación Rodríguez J. (2020)	
20	31,39	34,30	9,26 %
30	43,62	36,02	17,43 %
40	40,60	37,77	6,96 %
50	41,40	39,56	4,44 %
75	50,62	44,20	12,69 %
100	54,01	49,05	9,18 %

Figura 166. Gráfica Comparativa 2 - Ejemplo de Aplicación No. 4.

De acuerdo con los resultados del Ejemplo de Aplicación No. 4 las resistencias máximas calculadas con las formulaciones de (Rodríguez R. M., 2019) y (Rodríguez L. J., 2020) mostraron un aumento proporcional al incremento de la longitud de los conectores con un promedio del 5%. Este comportamiento creciente de la resistencia en los conectores es similar al realizar el mismo análisis mediante la simulación numérica propuesta en esta investigación.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos del modelo numérico determinista presentados en la Tabla 15, se observa que las cargas máximas de los conectores de cortante calculadas mediante el modelo constitutivo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal en el concreto, tienden a ser superiores a los valores experimentales. Por el contrario, al emplear el modelo de Menetrey Willam, se evidencian resultados inferiores. Esta variación entre los dos modelos se sitúa en un rango porcentual que oscila entre el 4% y el 20%.

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 16, que resume los resultados de carga máxima de los conectores de cortante a 5 mm de desplazamiento obtenidos mediante simulaciones numéricas utilizando el modelo constitutivo de Endurecimiento Isotrópico Multilineal para el concreto y el acero, las resistencias exhiben valores superiores a los experimentales, con diferencias que oscilan entre el 5% y el 50%.

Según la información presentada en la Tabla 17, que reporta los resultados de carga máxima de los conectores de cortante registrados a los 5 mm de desplazamiento obtenidos a través de las simulaciones numéricas utilizando el modelo constitutivo de Menetrey Willam para el concreto y Multilineal para el acero, se evidencia que las resistencias máximas son inferiores en comparación con los resultados experimentales en un porcentaje hasta el 16%.

Según el análisis de resultados obtenido para el modelo numérico estocástico se calculó el intervalo de confianza [47.71 – 50.22] con un 95% de probabilidad de que este intervalo contenga el valor de la resistencia máxima de los conectores en un entrepiso compuesto que cumple con las características consignadas en la Tabla 23. Es importante destacar que, aunque en esta ocasión se analizó

únicamente la incertidumbre de dos variables aleatorias (Resistencia a la Compresión del Concreto y Resistencia a la Tensión de los Conectores), se debe tener presente que existen otros factores variables que influyen en la respuesta. En futuras investigaciones, será necesario explorar diferentes funciones de dependencia que establezcan la probabilidad de que todas las variables aleatorias ocurran simultáneamente.

En el ejemplo de aplicación donde se varió la resistencia a la compresión de la losa de concreto se evidenció un aumento proporcional, registrando un incremento aproximado del 15% en la resistencia de los conectores por cada intervalo de aumento en la resistencia a compresión. Estos hallazgos destacan la influencia que tiene f'_c en el rendimiento de los conectores.

En el segundo ejemplo de aplicación, al modificar la altura de la losa en incrementos de 10 cm, se notó un incremento en la resistencia de los conectores de alrededor del 5% con cada ajuste. Según el tercer ejemplo de aplicación al variar la resistencia a tensión del conector de cortante, se observó que no hubo un cambio significativo en la respuesta de resistencia máxima.

Por último, en el cuarto ejemplo de aplicación donde se varió la longitud del conector, se observó una respuesta constante para longitudes de 20 a 50 mm. No obstante, se registró un incremento de aproximadamente el 20% en la resistencia de los conectores para longitudes mayores de 75 mm a 100 mm. De esta manera, se concluyó que la losa de concreto y la longitud de los conectores de cortante después de 75 mm son las variables con mayor influencia en el sistema compuesto.

En el cuarto ejemplo de aplicación donde se varió la longitud del conector, se llevó a cabo una comparación con los resultados obtenidos a través de las formulaciones propuestas por (Rodríguez R. M., 2019) y (Rodríguez L. J., 2020). Estos datos se encuentran registrados en las tablas 29 y 30. Tanto las ecuaciones como la simulación numérica reportan un comportamiento creciente de la resistencia máxima de los conectores a medida que aumenta la longitud del conector, mostrando una diferencia que oscila entre el 4% y el 17% entre las formulaciones y el método numérico.

Adicional se concluye, que los modelos constitutivos de Menetrey Willam, Drucker Prager y Microplanos describen de manera adecuada la etapa de ablandamiento del concreto, reflejando la disminución de resistencia debida al inicio de la fisuración. Cualquiera de los tres modelos es válido. En esta investigación, se optó por utilizar el modelo constitutivo de Menetrey Willam para representar el

Jenny Navarrete Chaparro—Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2023

comportamiento del concreto debido a su ventaja en la convergencia de los resultados al no presentar bordes afilados en su superficie de fluencia, sin embargo, se puede ampliar la investigación haciendo uso de los otros dos modelos constitutivos para ofrecer más alternativas de análisis numérico.

Para futuras investigaciones similares se sugiere incluir en el programa experimental la variación de la resistencia a la compresión del concreto, así como ampliar la modificación de la longitud y separación de los conectores de cortante. Esto se hace con el objetivo de que las formulaciones resultantes incluyan la influencia de todas las variables pertinentes. Asimismo, se propone investigar el comportamiento de los conectores cuando la falla no está en el concreto sino en el propio conector. Adicionalmente se recomienda variar el modo de carga, junto con el estudio de carga monótona, sería valioso implementar modelos de carga cíclica, como sugiere la investigación de Deng (2019), que abordó ciclos de carga y descarga.

Bibliografía

- Aguirre, J. I. (2012). *Simulación numérica del comportamiento de conectores de cortante tipo tornillo en un sistema de sección compuesta ante sollicitación de corte directo*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Anju, T., & Smitha, K. (2016). *Finite Element Analysis of Composite Beam with Shear Connectors*. Department of Civil Engineering KMEA Engineering College, India.
- ANSYS. (2022). *ANSYS Workbench Documentation*. ANSYS, Inc. and ANSYS Europe Ltd.
- Clement, G. V. (2010). *DISEÑO BÁSICO DE ESTRUCTURAS DE ACERO DE ACUERDO CON NSR-10*. Colombia: ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA.
- Deng, W. (2019). *Static and fatigue behavior of shear connectors for a steel-concrete composite girder*. School of Civil Engineering, Nanjing Tech University, China.
- Hernández, L. E. (2017). *Comportamiento de Conectores de Cortante Tipo Tornillo en Secciones Compuestas con Lámina Colaborante*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Hurtado, X. F. (2021). *Behavior of CSC-Type Shear Connectors Under Pry-Out Shear Test: Analytical Study*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Lee, H.-H. (2020). *Finite Element Simulations With ANSYS Workbench*. USA: SDC Publications.
- McCormac, J. C. (2012). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO*. New Jersey, USA.: Alfaomega.
- Muñoz, J. C. (2013). *Comportamiento de canales como conectores de cortante para un sistema de sección compuesta usando lamina colaborante*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Rodríguez, L. J. (2020). *Comportamiento de conectores de cortante tipo canal en sistemas de entrepiso conformados por viguetas en celosía, lámina colaborante y concreto reforzado*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.

- Rodríguez, R. M. (2019). *Comportamiento de conectores de cortante tipo canal en sistemas de entrepiso conformados por viguetas en celosía, concreto reforzado y lámina colaborante*. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Tahmasbi, F. (2016). *Capacidad de corte de conectores de corte en ángulo en forma de C y en forma de L*. Department of Civil Engineering, Iran.