

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE ARQUITECTURA

**MODELADO ETABS DE ESTRUCTURAS DE VIVIENDAS
CON ELEMENTOS DE MADERA DE PINO (PINUS
RADIATA)**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE ARQUITECTA**

AUTOR: LIZBETH CAROLINA NEIRA BANEGAS

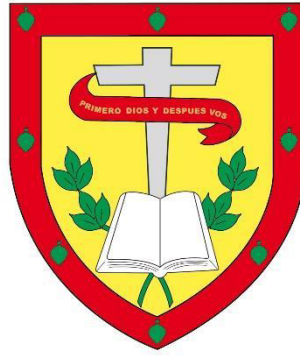
MARIA JOSE SOTO CARDENAS

DIRECTOR: ARQ. PHD. JUAN FELIPE QUESADA MOLINA

CUENCA - ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE ARQUITECTURA

**MODELADO ETABS DE ESTRUCTURAS DE VIVIENDAS CON
ELEMENTOS DE MADERA DE PINO (PINUS RADIATA)**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE ARQUITECTA**

AUTOR: LIZBETH CAROLINA NEIRA BANEGAS

MARIA JOSE SOTO CARDENAS

DIRECTOR: ARQ. PHD. JUAN FELIPE QUESADA MOLINA

CUENCA - ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Lizbeth Carolina Neira Banegas y María José Soto Cárdenas portadores de la cédula de ciudadanía N° 0107621617 y N° 0106449721. Declaramos ser autores de la obra: “Modelado ETABS de Estructuras de Viviendas con Elementos de Madera de Pino (Pinus Radiata)”, sobre la cual nos hacemos responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 14 de abril de 2025



F:

Lizbeth Carolina Neira Banegas

0107621617



F:

María José Soto Cárdenas

0106449721

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Lizbeth Carolina Neira Banegas y María José Soto Cárdenas, bajo mi supervisión.



Arq. Felipe Quesada Molina

DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres y hermanos, por ser mi mayor inspiración, por su amor incondicional y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mi familia, por su apoyo inquebrantable en cada paso de este camino, por su paciencia y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Y a cada persona que, de una u otra forma, ha sido parte de este logro, mi más sincero agradecimiento.

Lizbeth Carolina Neira Banegas

A mis padres, José y Olga, por ser mi mayor ejemplo de amor, esfuerzo y perseverancia. Su apoyo incondicional y sus consejos han sido la base sobre la que he construido cada uno de mis logros. A mi hermana, Emilia, por ser mi cómplice, mi refugio y mi mejor amiga. Gracias por alentarme en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada pequeña victoria. Y a mi fiel compañero de desvelos, Bobby, que con su ternura y lealtad me acompañó en tantas noches largas.

María José Soto Cárdenas

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarnos en cada paso de este camino, darnos la fortaleza para superar los desafíos y la sabiduría para seguir adelante con determinación y confianza.

A la Universidad Católica de Cuenca por brindarnos la oportunidad de formarnos profesionalmente en un ambiente de aprendizaje enriquecedor, donde cada experiencia ha contribuido a nuestro crecimiento académico y personal.

A los docentes, cuyo compromiso y dedicación han sido fundamentales en nuestra formación. Agradecemos sus enseñanzas, su paciencia y el conocimiento compartido, que han sido clave en nuestro desarrollo como futuros profesionales.

En especial, a nuestro tutor, Arq. Felipe Quesada, por su paciencia, apoyo, conocimiento y carisma durante este proceso. Su orientación y dedicación han sido esenciales para la realización de este trabajo, brindándonos no solo guía académica, sino también motivación y confianza.

Asimismo, extendemos nuestra gratitud a: Arq. María del Cisne Aguirre, Arq. Pedro Angumba, Arq. Julio Pintado, Ing. Paola Delgado e Ing. Juan Avilés. Docentes que dedicaron su tiempo y su pasión por la enseñanza y su disposición para compartir su experiencia que han sido una fuente de inspiración y motivación constante.

A nuestros compañeros y amigos de la universidad, por ser parte de esta etapa, por las experiencias compartidas y por el apoyo mutuo en cada reto académico.

Finalmente, a nosotras mismas, las autoras de este trabajo, por la dedicación, el esfuerzo y la perseverancia demostrada a lo largo de este proceso. Por las largas horas de estudio, las noches de trabajo y la determinación de alcanzar esta meta. Este logro es el resultado de nuestro compromiso y dedicación, lo cual es un reflejo de todo el aprendizaje y crecimiento que hemos adquirido en el camino.

RESUMEN

La madera ha evolucionado a través de los años en diversos sectores de la construcción, pero su aplicación estructural se ha visto limitada debido al desconocimiento técnico. Este estudio tiene como objetivo caracterizar las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Pinus radiata* e integrarlas en el software estructural ETABS, a fin de evaluar su comportamiento bajo cargas. Se realizaron ensayos en cuatro muestras para obtener parámetros como módulos de elasticidad y resistencias. Estos datos se incorporaron en modelos digitales con propiedades ortotrópicas e isotrópicas dentro de ETABS. Por lo que, el estudio es de tipo experimental y comparativo, ya que contrastó los resultados simulados con los datos reales obtenidos en laboratorio. Los resultados mostraron una alta concordancia entre ambos métodos, con un margen de error máximo de 0,85mm. Además, no se observaron diferencias significativas entre modelos ortotrópicos e isotrópicos. El estudio aporta evidencia científica sobre la viabilidad del uso estructural del *Pinus radiata*, promoviendo su aplicación en el diseño estructural. Lo que representa un beneficio económico al fomentar el uso de materiales locales, y un impacto social al impulsar soluciones constructivas sostenibles y técnicamente validadas.

Palabras clave: madera, *Pinus radiata*, ETABS, isotrópico, ortotrópico

ABSTRACT

Wood has evolved over the years in several construction sectors, but its structural application has been limited due to a lack of technical knowledge. This study aims to characterize the physical and mechanical properties of *Pinus radiata* wood and integrate them into the structural software ETABS [Extended Three-Dimensional Analysis of Building System.] to evaluate its performance under load conditions. Tests were conducted on four samples to obtain parameters such as modulus of elasticity and strength. These data were incorporated into digital models with orthotropic and isotropic properties within ETABS. Therefore, the study is experimental and comparative, as it contrasted simulated results with real data obtained in the laboratory. The results showed high agreement between the two methods, with a maximum margin of error of 0.85 mm. Furthermore, no significant differences were observed between the orthotropic and isotropic models. The study provides scientific evidence on the viability of using *Pinus radiata* for structural purposes, promoting its application in structural design. This represents an economic benefit by promoting the use of local materials and a social impact by promoting sustainable and technically validated construction solutions.

Keywords: wood, *Pinus radiata*, ETABS, isotropic, orthotropic

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
ÍNDICE DE CONTENIDOS	8
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABLAS	14
LISTA DE ECUACIONES	15
LISTA DE ANEXOS.....	16
CAPÍTULO I.....	17
1. INTRODUCCIÓN	17
1.2. ANTECEDENTES.....	17
1.2. PROBLEMA.....	19
1.3. JUSTIFICACIÓN	21
1.4. OBJETIVOS.....	21
1.4.1. <i>General.....</i>	<i>21</i>
1.4.2. <i>Específicos</i>	<i>21</i>
1.5. METODOLOGÍA	22
<i>Fase 1: Recopilación bibliográfica (Normativas).....</i>	<i>22</i>
<i>Fase 2: Aplicación de datos y pruebas de laboratorio</i>	<i>22</i>
<i>Fase 3: Aplicación de datos, diseño de elementos estructurales y corroboración de datos obtenidos.</i>	<i>23</i>
CAPÍTULO II.....	24
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1. MADERA	24
2.1.1. <i>Uso en la actualidad.....</i>	<i>24</i>
2.1.2. <i>Características y propiedades de la madera</i>	<i>24</i>
2.1.2.1. <i>Clasificación por densidad básica</i>	<i>25</i>
2.1.2.2. <i>Módulo de elasticidad (E)</i>	<i>26</i>

2.1.2.3. Módulo de Poissón.....	27
2.1.2.4. Módulo de Corte o Rigidez (G).....	27
2.1.2.5. Peso específico de la madera	28
2.1.2.6. Conductividad térmica de la madera.....	28
2.2. ESPECIES DE MADERA	28
2.4. PINUS RADIATA	29
a. Partes del Pinus Radiata.....	29
b. Propiedades mecánicas.....	31
2.5. NORMATIVAS.....	32
2.5.1. Clasificación de la madera	33
2.5.2. Cálculo de elementos estructurales (vigas) de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC).....	34
2.5.2.1 Consideraciones para el diseño	34
2.5.2.2 Requisitos de diseño	35
2.5.2.3. Requisitos de resistencia	35
2.5.2.4. Requisitos de rigidez	36
2.5.3. Predimensionamiento de vigas	37
2.6. INVESTIGACIONES EN EL ÁREA	38
2.6.1. Caracterización Físico – Mecánica de la Madera Aserrada Pinus Radiata Comercializada en Cuenca	38
2.6.2.1. Metodología	39
2.6.2. Caracterización Mecánica de Vigas de Madera Laminada Encolada (MLE) de Pino Producido en Ecuador.....	40
2.6.2.1. Metodología	40
2.6.1.2. Procedimiento	40
2.7. ETABS	43
2.7.1. Datos necesarios para dimensionar elementos de madera en ETABS.....	44
2.7.2. Procedimiento en ETABS	45
2.7.3. Limitaciones en el Diseño de Madera en ETABS.....	45
CAPÍTULO III.....	46
3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	46
3.1. ENSAYO EXPERIMENTAL	46
3.1.1. Metodologías.....	46
3.1.1.1. Equipo	46
3.1.1.2. Adaptación del equipo.....	47
3.1.2. Selección de probetas.....	48
3.1.3. Registro fotográfico	51
3.1.4. Cálculos.....	51
3.1.4.1. Cálculo del Esfuerzo unitario en el límite de proporcionalidad y factores de reducción. ...	51
3.1.4.2. Cálculo del Módulo de Elasticidad (MOE)	52
a. Viga A01	52

b. Viga A02	53
c. Viga A03	53
d. Viga A04	53
3.1.4.3. Cálculo del Módulo de Rotura (MOR)	53
a. Viga A01	54
b. Viga A02	54
c. Viga A03	54
d. Viga A04	54
3.1.4.4. Cálculo del esfuerzo admisible	54
3.1.4.5. Cálculo del peso específico	55
3.1.4.6. Cálculo del contenido de Humedad	57
3.2.5. <i>Análisis de resultados</i>	58
a. Viga A01	58
b. Viga A02	58
c. Viga A03	59
d. Viga A04	59
3.2.6. <i>Comparación de datos experimentales propios y datos extraídos de investigaciones previas</i>	61
3.2. INGRESO DE DATOS AL PROGRAMA ETABS	62
3.2.1. <i>Datos obtenidos de los ensayos a flexión</i>	62
3.2.1.1. Propiedades Isotrópicas	63
a. Proceso	64
3.2.1.2. Propiedades Ortotrópicas	67
3.1.2. <i>Configuración de sección de la viga</i>	71
a. Proceso	71
3.1.3. <i>Modelado de viga</i>	73
3.1.4. <i>Aplicación de Cargas</i>	74
a. Proceso	74
3.1.5. <i>Resultados obtenidos en ETABS</i>	76
a. Proceso	76
CAPÍTULO IV	79
4. DISCUSIÓN	79
4.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	79
CAPÍTULO V	82
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
5.1. CONCLUSIONES	82
5.2. RECOMENDACIONES	82
CAPÍTULO VI	84
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

ANEXOS.....	86
ANEXO 1: RESULTADOS DE DEFLEXIONES ISOTRÓPICAS.....	86
1.1. <i>Probeta A01 con carga de 1050kgf/cm².....</i>	86
1.2. <i>Probeta A01.1 con carga de 525 kgf/cm².....</i>	87
1.3. <i>Probeta A01.1 con carga de 262,5 kgf/cm².....</i>	88
1.4. <i>Probeta A02 con carga de 1190,2 kgf/cm².....</i>	89
1.5. <i>Probeta A02.1. con carga de 595,1 kgf/cm².....</i>	90
1.6. <i>Probeta A02.2. con carga de 297,55 kgf/cm².....</i>	91
1.7. <i>Probeta A03 con carga de 900 kgf/cm².....</i>	92
1.8. <i>Probeta A03.1 con carga de 450 kgf/cm².....</i>	93
1.9. <i>Probeta A03.2 con carga de 225 kgf/cm².....</i>	94
1.10. <i>Probeta A04 con carga de 1000 kgf/cm².....</i>	95
1.11. <i>Probeta A04.1 con carga de 500 kgf/cm².....</i>	96
1.12. <i>Probeta A04.2 con carga de 250 kgf/cm².....</i>	97
ANEXO 2: RESULTADOS DE DEFLEXIONES ORTOTRÓPICAS.....	98
2.1. <i>Probeta A01 con carga de 1050 kgf/cm².....</i>	98
2.2. <i>Probeta A01.1 con carga de 525 kgf/cm².....</i>	99
2.3. <i>Probeta A01.2 con carga de 262,5 kgf/cm².....</i>	100
2.4. <i>Probeta A02 con carga de 1190,2 kgf/cm².....</i>	101
2.5. <i>Probeta A02.1 con carga de 595,1 kgf/cm².....</i>	102
2.6. <i>Probeta A02.2 con carga de 297,55 kgf/cm².....</i>	103
2.7. <i>Probeta A03 con carga de 900 kgf/cm².....</i>	104
2.8. <i>Probeta A03.1 con carga de 450 kgf/cm².....</i>	105
2.9. <i>Probeta A03.2 con carga de 225 kgf/cm².....</i>	106
2.10. <i>Probeta A04 con carga de 1000 kgf/cm².....</i>	107
2.11. <i>Probeta A04.1 con carga de 500 kgf/cm².....</i>	108
2.12. <i>Probeta A04.2 con carga de 250 kgf/cm².....</i>	109

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Software ETABS</i>	18
<i>Figura 2: Fallo estructural de la Sala de exposiciones Jyväskylä, Finlandia</i>	20
<i>Figura 3: Estructura de la madera</i>	24
<i>Figura 5: Viga simplemente apoyada</i>	37
<i>Figura 6: Marcación de nodos</i>	41
<i>Figura 7: Medición de contenido de humedad</i>	41
<i>Figura 8: Colocación de viga MLE en posición de ensayo a flexión</i>	42
<i>Figura 9: Programa ETABS (Ventana de trabajo)</i>	43
<i>Figura 10: Datos requeridos</i>	44
<i>Figura 11: Prensa de compresión</i>	47
<i>Figura 12: Adaptación del equipo</i>	47
<i>Figura 13: Guía de Movilización de la madera Pinus Radiata</i>	48
<i>Figura 14: Muestras obtenidas (duramen)</i>	48
<i>Figura 15: Viga simplemente apoyada con cargas a los tercios de la viga</i>	49
<i>Figura 16: Muestras codificadas</i>	50
<i>Figura 17: Datos de viga simplemente apoyada</i>	50
<i>Figura 18: Identificación de ojos/nudos</i>	50
<i>Figura 19: Fotografías realizadas durante y después del ensayo a flexión</i>	51
<i>Figura 20: Deformación de probetas</i>	60
<i>Figura 21: Propiedades Isotrópicas</i>	64
<i>Figura 22: Cambio de unidades</i>	64
<i>Figura 23: Cambio de grillas</i>	65
<i>Figura 24: Definición de material</i>	65
<i>Figura 25: Selección del nuevo material</i>	66
<i>Figura 26: Ingreso de datos</i>	66
<i>Figura 27: Material ortotrópico en sus tres planos</i>	67
<i>Figura 28: Material Ortotrópico</i>	68
<i>Figura 29: Requerimientos para propiedades ortotrópicas</i>	69
<i>Figura 30: Ingreso de datos - Ortotrópico</i>	70
<i>Figura 31: Ingreso de datos - Ortotrópico</i>	71
<i>Figura 32: Definición de la sección</i>	72
<i>Figura 33: Creación de la nueva propiedad de la sección</i>	72
<i>Figura 34: Establecimiento de dimensiones</i>	73
<i>Figura 35: Propiedades que va a tener la viga</i>	73
<i>Figura 36: Viga modelada</i>	74
<i>Figura 37: Selección de cargas</i>	75
<i>Figura 38: Aplicación de cargas</i>	75

<i>Figura 39: Cargas puntuales</i>	76
<i>Figura 40: Selección del plano de análisis</i>	76
<i>Figura 41: Comportamiento final de la viga</i>	77
<i>Figura 42: Resultados obtenidos de la prueba en ETABS</i>	77
<i>Figura 43: Diagrama de resultados en P1</i>	80
<i>Figura 44: Diagrama de resultados en P2</i>	81
<i>Figura 45: Diagrama de resultados en P3</i>	81

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1: Análisis comparativo de maderas coníferas y latifoliadas.</i>	25
<i>Tabla 2: Resistencias y rigidez dependiendo de la densidad básica.</i>	26
<i>Tabla 3: Módulo de elasticidad para madera (kgf/cm²).</i>	27
<i>Tabla 4: Análisis comparativo de maderas coníferas y latifoliadas.</i>	29
<i>Tabla 5: Estructura de la madera.</i>	29
<i>Tabla 6: Pinus Radiata en Ecuador</i>	31
<i>Tabla 7: Propiedades mecánicas del Pinus radiata.</i>	31
<i>Tabla 8: Esfuerzos admisibles de la madera acerrada del Pinus radiata.</i>	32
<i>Tabla 9: Cuadro comparativo de normativas (NEC, ASTM, JUNAC)</i>	32
<i>Tabla 10: Resultados de ensayos a flexión</i>	39
<i>Tabla 11: Dimensiones de probetas de MLE.</i>	40
<i>Tabla 12: Dimensiones de probetas</i>	49
<i>Tabla 13: Esfuerzo unitario</i>	52
<i>Tabla 14: Cálculo del MOE A01</i>	52
<i>Tabla 15: Cálculo del MOE A02</i>	53
<i>Tabla 16: Cálculo del MOE A03.</i>	53
<i>Tabla 17: Cálculo del MOE A04.</i>	53
<i>Tabla 18: Cálculo del MOR A01.</i>	54
<i>Tabla 19: Cálculo del MOR A02.</i>	54
<i>Tabla 20: Cálculo del MOR A03.</i>	54
<i>Tabla 21: Cálculo del MOR A04.</i>	54
<i>Tabla 22: Factores de reducción.</i>	55
<i>Tabla 23: Esfuerzos admisibles</i>	55
<i>Tabla 24: Probetas antes del secado.</i>	56
<i>Tabla 25: Probetas después del secado.</i>	56
<i>Tabla 26: Datos de Densidad húmeda y seca</i>	56
<i>Tabla 27: Contenido de humedad.</i>	57
<i>Tabla 28: Gráfico Fuerza – Deformación de la viga A01</i>	58
<i>Tabla 29: Gráfico Fuerza – Deformación de la viga A02</i>	58
<i>Tabla 30: Gráfico Fuerza – Deformación de la viga A03</i>	59
<i>Tabla 31: Gráfico Fuerza – Deformación de la viga A04</i>	59
<i>Tabla 32: Resultados de los ensayos a flexión.</i>	60
<i>Tabla 33: Resultados datos experimentales obtenidos y datos extraídos de investigaciones previas</i>	62
<i>Tabla 34: Datos necesarios - Isotrópico.</i>	63
<i>Tabla 35: Datos requeridos</i>	69
<i>Tabla 36: Cargas a aplicar</i>	74
<i>Tabla 37: Cuadro de resultados</i>	78
<i>Tabla 38: Resultados de deflexión obtenidos</i>	79

LISTA DE ECUACIONES

(1).....	26
(2).....	27
(3).....	28
(4).....	28
(5).....	28
(6).....	35
(7).....	36
(8).....	36
(9).....	36
(10).....	37
(11).....	38
(12).....	38
(13).....	42
(14).....	52
(15).....	52
(16).....	53
(17).....	54
(18).....	57

LISTA DE ANEXOS

<i>Anexo 1: Resultados de deflexiones Isotrópicas</i>	86
1.1. <i>Probeta A01 con carga de 1050kgf/cm²</i>	86
1.2. <i>Probeta A01.1 con carga de 525 kgf/cm²</i>	87
1.3. <i>Probeta A01.1 con carga de 262,5 kgf/cm²</i>	88
1.4. <i>Probeta A02 con carga de 1190,2 kgf/cm²</i>	89
1.5. <i>Probeta A02.1. con carga de 595,1 kgf/cm²</i>	90
1.6. <i>Probeta A02.2. con carga de 297,55 kgf/cm²</i>	91
1.7. <i>Probeta A03 con carga de 900 kgf/cm²</i>	92
1.8. <i>Probeta A03.1 con carga de 450 kgf/cm²</i>	93
1.9. <i>Probeta A03.2 con carga de 225 kgf/cm²</i>	94
1.10. <i>Probeta A04 con carga de 1000 kgf/cm²</i>	95
1.11. <i>Probeta A04.1 con carga de 500 kgf/cm²</i>	96
1.12. <i>Probeta A04.2 con carga de 250 kgf/cm²</i>	97
<i>Anexo 2: Resultados de deflexiones Ortotrópicas</i>	98
2.1. <i>Probeta A01 con carga de 1050 kgf/cm²</i>	98
2.2. <i>Probeta A01.1 con carga de 525 kgf/cm²</i>	99
2.3. <i>Probeta A01.2 con carga de 262,5 kgf/cm²</i>	100
2.4. <i>Probeta A02 con carga de 1190,2 kgf/cm²</i>	101
2.5. <i>Probeta A02.1 con carga de 595,1 kgf/cm²</i>	102
2.6. <i>Probeta A02.2 con carga de 297,55 kgf/cm²</i>	103
2.7. <i>Probeta A03 con carga de 900 kgf/cm²</i>	104
2.8. <i>Probeta A03.1 con carga de 450 kgf/cm²</i>	105
2.9. <i>Probeta A03.2 con carga de 225 kgf/cm²</i>	106
2.10. <i>Probeta A04 con carga de 1000 kgf/cm²</i>	107
2.11. <i>Probeta A04.1 con carga de 500 kgf/cm²</i>	108
2.12. <i>Probeta A04.2 con carga de 250 kgf/cm²</i>	109

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la madera en la construcción ha evolucionado a lo largo de los años, destacándose por sus propiedades mecánicas, sostenibilidad y bajo impacto ambiental. Sin embargo, en muchos países, especialmente en América Latina, su aplicación sigue siendo limitada debido a la falta de conocimiento técnico y herramientas adecuadas para su análisis estructural.

En este contexto, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de softwares especializados para el análisis estructural, como ETABS, que facilita el diseño de estructuras de acero y concreto. Sin embargo, la integración de la madera en estos sistemas aún presenta incógnitas debido a la falta de modelos específicos que representen adecuadamente su comportamiento físico - mecánico. A pesar de estas limitaciones, el software ETABS sigue siendo una herramienta clave en el diseño estructural y su integración de datos puede abrir nuevas oportunidades para el uso de la madera en la construcción.

Este estudio busca mejorar la aplicabilidad de la madera en el diseño estructural mediante la integración de sus propiedades mecánicas en el software ETABS, utilizando datos experimentales de la madera de *Pinus radiata*. Al incorporar estas propiedades en el software, se busca optimizar el proceso de diseño y promover el uso sostenible de la madera como material estructural, verificando la precisión en el análisis y reduciendo la dependencia de materiales no renovables en la construcción.

1.2. Antecedentes

El desarrollo de técnicas de construcción y análisis estructural ha sido fundamental en la evolución de la arquitectura e ingeniería civil, mismo que se ha visto influenciada por la tecnología, con el uso de softwares para la solución del sistema estructural de un proyecto. En la década de 1970, el Dr. Edward L. Wilson introdujo en los Estados Unidos el primer programa integral de análisis estructural, conocido como SAP, sin embargo, su uso estaba limitado a organizaciones gubernamentales y grandes empresas debido a que se requerían computadoras de gran tamaño.

A finales de los años 70, el surgimiento de las computadoras personales democratizó el acceso a los programas de análisis estructural, volviéndose popular incluso entre pequeñas empresas y usuarios individuales. Posteriormente aparecieron más programas similares como el ETABS (Taboada, 2009). Este avance representó un cambio trascendental en la práctica profesional, al posibilitar que los especialistas llevaran a cabo análisis complejos de forma autónoma, sin depender de otros profesionales o grandes oficinas de cálculo, optimizando el tiempo de ejecución.

Actualmente, en el ámbito de la ingeniería y arquitectura, el uso del software ETABS es el más utilizado, por su capacidad de modelar, analizar y diseñar edificaciones de manera eficiente. ETABS, fue desarrollado por Computers and Structures, Inc. (CSI), mismo que se convirtió en una pieza clave para el análisis de sistemas estructurales tridimensionales, especialmente para edificios (CSI, 2024). Su enfoque específico en edificaciones lo diferencia de otros softwares con enfoques más genéricos, permitiendo además la integración de normativas internacionales, lo que facilita su aplicación en diversos contextos geográficos.

Dentro de este programa, se puede implementar diferentes materiales como estructuras metálicas y de hormigón armado con optimización automatizada, para el dimensionamiento de vigas, pilares mixtos, muros de hormigón con mampostería, además de la comprobación de seguridad de conexiones y elementos de madera. Sin embargo, el software posee una base de datos limitada sobre la madera, con menos modelos de comportamiento, además de detalles específicos para el diseño y análisis, lo que genera un punto negativo (Breyer,2010). Esta limitación representa una desventaja considerable en proyectos donde la madera es el material predominante, debido a que reduce la precisión del análisis y puede requerir cálculos complementarios manuales para garantizar el cumplimiento normativo.



Figura 1: Software ETABS

Elaboración: Autores

Por otro lado, ETABS ofrece múltiples beneficios para el diseño de estructuras de madera, destacando su precisión en el proceso al considerar todas las variables relevantes que afectan su comportamiento estructural, incluyendo no solo las propiedades de los materiales y las cargas aplicadas, sino también los efectos a largo plazo como la humedad (Breyer,2010). Gracias a esta capacidad, los ingenieros pueden evaluar con mayor exactitud el desempeño de las estructuras de madera a lo largo del tiempo, minimizando el riesgo de deterioro y fallas estructurales debido a factores ambientales.

Si bien, ETABS es un software ingenieril, los arquitectos pueden emplearlo para su beneficio evaluando la viabilidad estructural de sus diseños, además de comprender las restricciones y posibilidades que ofrece la ingeniería en el desarrollo de proyectos arquitectónicos.

La eficiencia y optimización de ETABS permite a los ingenieros reducir el uso de materiales, aspecto importante en proyectos que buscan sostenibilidad y eficiencia en costos. Su capacidad de integración con otros programas de diseño, favorece la colaboración interdisciplinaria, permitiendo que arquitectos, ingenieros estructurales al igual que otros profesionales trabajen de manera conjunta en un entorno digital unificado. (Breyer,2010). Esta interoperabilidad no solo mejora la coordinación entre disciplinas, sino que también agiliza el desarrollo del proyecto minimizando errores en el diseño.

Por otro lado, las diversas normativas internacionales de ETABS aseguran que los diseños cumplan con los estándares locales e internacionales, facilitando la aprobación y la ejecución de proyectos. Sin embargo, aunque el software ofrece herramientas avanzadas para el diseño de hormigón y acero, sus funcionalidades específicas para estructuras de madera son limitadas (Breyer,2010). Esta restricción representa un inconveniente para los profesionales que requieren análisis detallados de estructuras de madera, obligándolos a complementar su trabajo con software especializado o métodos adicionales de verificación estructural.

1.2. Problema

La madera ha evolucionado a través de los años, donde se emplea para la edificación de viviendas, tanto en la estructura como en los acabados y el mobiliario. El uso de la madera en construcción es significativo a nivel internacional como: Escocia con el 70%, en comparación con Estados Unidos y Canadá con el 90%; en contraste con los países latinoamericanos como Chile o Colombia, en donde el uso es relativamente bajo con el 14% (Gysling et al., 2021). Este panorama evidencia la preferencia por la madera en regiones con una tradición constructiva y normativas avanzadas, mientras que en Latinoamérica su uso sigue siendo limitado, posiblemente por factores culturales, normativos o la disponibilidad de materiales.

En Ecuador y otros países, el uso de la madera en la construcción se ha visto limitada a causa de la insuficiencia de conocimientos técnicos, lo que genera un impacto negativo en la consideración de la madera como material de construcción (Tanguila, 2023). La deficiencia en la formación técnica impide un aprovechamiento adecuado de las propiedades de la madera en torno a su uso, por lo que es necesario promover la investigación que favorezca la adopción de la madera como una opción viable y sostenible de construcción.

La presencia de fallos estructurales por la falta de características de las propiedades mecánicas de la madera se ha evidenciado en la NEC SE MD, misma que toma como referencia las normativas internacionales como la UNEN EN 338 (normativa europea) que determina el comportamiento físico – mecánico de la madera estructural (Cada et al., 2023). Para reducir estos fallos estructurales, es importante implementar procesos de clasificación mecánica y visual antes de su uso en la construcción.

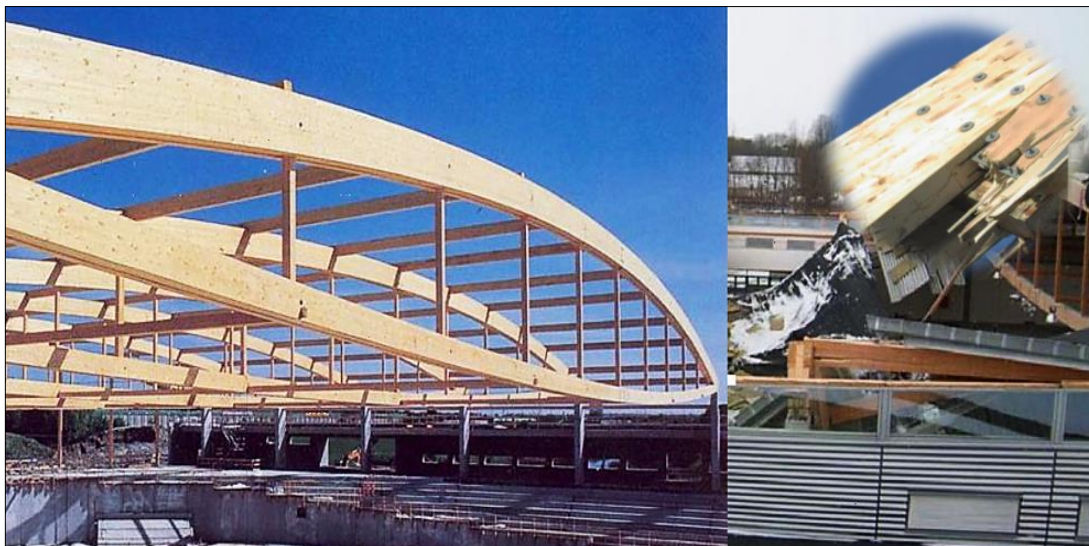


Figura 2: Fallo estructural de la Sala de exposiciones Jyväskylä, Finlandia.

Fuente: Oriol Palou, 2023.

De la misma manera, el bajo uso de la madera en la construcción, también se debe a la deficiencia del conocimiento para el uso de softwares de arquitectura e ingeniería en el ámbito estructural. Según Betancur (2022), ETABS es un software que ha sido ampliamente utilizado en el diseño estructural enfocándose principalmente en el acero y concreto.

No obstante, carece de un módulo especializado para la madera, lo cual se complica aún más, debido a la información desactualizada de la NEC SE MD, que impide la aplicación de la madera como material estructural, así como la falta de especificaciones técnicas para diferentes tipos de madera, en especial la madera de *Pinus radiata* (Banshuy & Guamunshi, 2024). Ante esta problemática, resulta necesario fortalecer la capacitación técnica junto con la formación académica en el uso de herramientas de modelado estructural adaptadas a la madera.

Por otro lado, el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino también menciona que, a causa del déficit de la madera dentro de la construcción, la JUNAC junto con los países andinos, se ha planteado introducir especies tropicales de la madera para la actividad productiva de modo que pueda contribuir a los problemas habitacionales.

Asimismo, indica que el uso de la madera se ve reducida por la falta de conocimientos técnicos, leyes, normas y prejuicios del material por parte de los usuarios (JUNAC, 1984). Es decir, la introducción de especies tropicales podría ofrecer una alternativa viable para mitigar el déficit de madera en la construcción, pero es necesario un enfoque integral que considere tanto la sostenibilidad de estas especies como la capacitación técnica de los usuarios para maximizar los beneficios del material.

1.3. Justificación

Se pretende abordar los problemas existentes en las estructuras de madera para promover el uso adecuado y seguro de la madera en la industria de la construcción. Para ello, se llevará a cabo una investigación en la que se detalla las propiedades físicas - mecánicas de la madera del *Pinus radiata*, una de las especies más comercializadas en Ecuador debido a su rápido crecimiento y adaptabilidad. Esta madera destaca por su uniformidad en términos de calidad, lo que facilita su manipulación al igual que el diseño estructural.

Asimismo, la JUNAC enfatiza la importancia de estudiar los factores de cargas y sus combinaciones debido a la necesidad de evaluar adecuadamente las condiciones a las que las estructuras estarán sometidas a lo largo de su vida útil. Por lo que, este análisis es fundamental para poder establecer las propiedades mecánicas de la madera (*Pinus radiata*).

Al definir las propiedades mecánicas y físicas de la madera se puede desarrollar estructuras más confiables y seguras mediante el software ETABS que permite la integración de datos, por medio de la calibración, con la ayuda del modelado de estructuras. En el que se busca optimizar recursos reduciendo el tiempo de ejecución de los proyectos, al mismo tiempo que se garantiza el cumplimiento de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción - Estructuras de madera.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

- Integrar las propiedades mecánicas de la madera de pino, para la calibración de los datos solicitados dentro del software de modelación estructural ETABS, para facilitar el uso a profesionales en el ámbito de ingeniería y arquitectura del Ecuador.

1.4.2. Específicos

- Identificar las características mecánicas de la madera estructural del *Pinus radiata*, a través de la NEC SE MD e investigaciones para la implementación de datos en el software ETABS.
- Evaluar los datos obtenidos de las normativas y características en el software a través de los requerimientos establecidos por el software ETABS.
- Validar los datos integrados mediante pruebas experimentales para la corroboración de datos interpretados.

1.5. Metodología

La metodología que se aplica conlleva a la recopilación bibliográfica sobre las características mecánicas que posee la madera de pino así como el uso del software estructural ETABS para la aplicación de datos en el sistema, posteriormente hacer un análisis experimental de prueba – error, junto con el análisis de ensayos de laboratorio. Finalmente, realizar un modelado en el que se pueda comprobar, comparar y validar los datos obtenidos.

Para el desarrollo de los objetivos planteados se llevará a cabo:

Fase 1: Recopilación bibliográfica (Normativas)

Se generará una recopilación de datos a través de referencias bibliográficas como artículos científicos y libros que tengan estrecha relación con las características mecánicas del *Pinus radiata* en la construcción, además de normativas ecuatorianas de construcción, como la JUNAC y la NEC SE MD, entre otros; para poder extraer los datos necesarios e importantes de la madera a estudiar. Del mismo modo, se realizará la investigación necesaria para el manejo del software ETABS.

1.1. Recopilación y revisión de bibliografías.

1.1.1. Revisión de artículos científicos: Caracterización Físico – Mecánica de la Madera Aserrada *Pinus Radiata* Comercializada en Cuenca y Modelo estructural calibrado y análisis dinámico del Edificio Central del Instituto Costarricense de Electricidad.

1.1.2. Análisis de investigaciones del estudio de la resistencia de la madera.

1.1.3. Estudio de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción: Estructuras de madera (NEC SE MD) y JUNAC.

Fase 2: Aplicación de datos y pruebas de laboratorio

A partir de los datos obtenidos de la resistencia de la madera *Pinus radiata*, de las referencias bibliográficas, se desarrollarán ensayos a flexión con probetas de dimensiones que cumplan con la normativa ASTM D198.

2.1. Definición de las propiedades mecánicas del *Pinus radiata*.

2.1.1. Obtención de datos a partir de la JUNAC y del artículo científico “Caracterización Físico – Mecánica de la Madera Aserrada *Pinus Radiata* Comercializada en Cuenca”.

2.2. Aplicación de normativas de construcción.

2.2.1. NEC SE MD: Estructuras de madera.

2.2.2. Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino (JUNAC).

2.2. Pruebas de laboratorio para obtención de datos.

2.2.1. Selección de probetas.

2.2.2. Ensayos a flexión.

3.2. Documentación de datos obtenidos.

Fase 3: Aplicación de datos, diseño de elementos estructurales y corroboración de datos obtenidos.

Se realizará la calibración de datos dentro del sistema del software ETABS, en el que se pretende realizar un análisis experimental de prueba y error, a través del modelado de elementos estructurales bajo condiciones de cargas dentro del software, sobre un el elemento estructural (vigas) según las normativas ecuatorianas.

Para realizar el análisis comparativo entre los resultados adquiridos en el laboratorio y los datos obtenidos de las referencias bibliográficas. La validación de datos se obtendrá después del análisis estructural en donde se observa el comportamiento de la estructura frente a una carga, de modo que, se identifica los desplazamientos, esfuerzos internos, reacciones de los apoyos, entre otros. Una vez terminado el análisis se puede empezar a diseñar a detalle el elemento estructural para garantizar su estabilidad y documentar los resultados dentro del mismo sistema para su revisión.

3.1. Calibración de datos en el software ETABS.

3.2. Diseño del elemento estructural.

3.3. Modelado de elemento estructural (viga) para la aplicación de cargas.

2.4. Resultados de pruebas en el software ETABS.

3.5. Comparación entre los datos obtenidos en laboratorio con los datos del modelado digital.

3.6. Resultados y discusión.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Madera

2.1.1. Uso en la actualidad

La madera es considerada como el material más sostenible en la construcción más sostenible debido a las emisiones netas negativas que hace referencia a captura de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera de lo que se emite, a diferencia de los otros materiales como el metal y de origen mineral (García y Benedetti, 2021). Este material se distingue por su buena resistencia, ligereza, por ser un material renovable, con propiedades acústicas – térmicas. Asimismo, actúa como almacén de CO₂, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. No obstante, cada especie de madera posee diferentes características físicas y mecánicas únicas que determinan su idoneidad para diferentes usos, desde interiores decorativos hasta aplicaciones estructurales.

A nivel internacional, la madera es usada para estructuras de cubierta, mobiliarios y viviendas de baja altura (Beyer, 2009). Esto resalta la importancia de la madera como un material versátil y ampliamente aceptado en diferentes regiones del mundo, lo que refuerza su viabilidad en la construcción.

2.1.2. Características y propiedades de la madera

En el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino (1984), las propiedades de resistencia de la madera, radica en reconocer las direcciones ortogonales de la madera: la dirección longitudinal, transversal y radial.

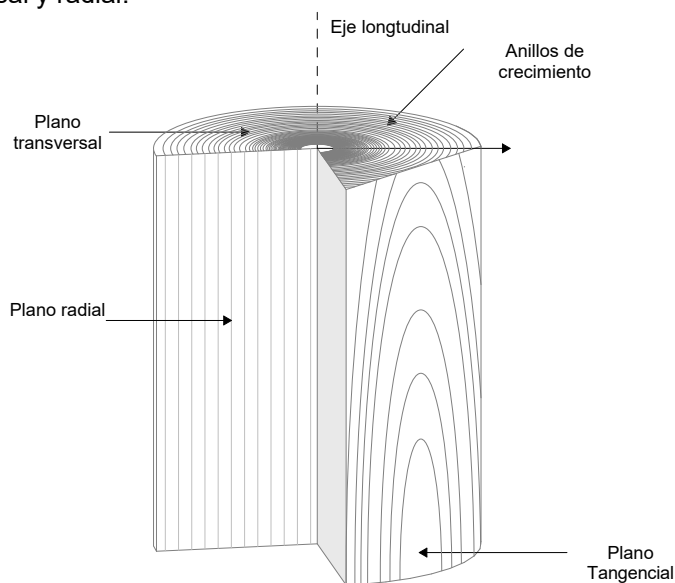
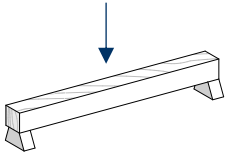

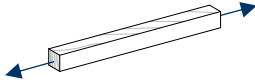


Figura 3: Estructura de la madera

Elaboración: Autores

La dirección transversal consiste en el corte perpendicular al eje longitudinal del tronco, asimismo el corte longitudinal hace referencia al corte longitudinal a los anillos de crecimiento, por último, el radial es el corte longitudinal paralelo a los radios y perpendicular a los anillos de crecimiento (Feijoo, 2018). A partir del reconocimiento de las direcciones de corte de la madera, se identifican varias propiedades resistentes que son:

Tabla 1: Análisis comparativo de maderas coníferas y latifoliadas.

Propiedad Mecánica	Descripción	Unidad de Medida	Rango Típico (Madera Común)	Gráfico
Flexión Estática	La flexión estática mide la capacidad de la madera para resistir cargas aplicadas que producen una deformación o curvatura. Es una prueba importante para la resistencia a cargas.	Módulo de Elasticidad (E) y Resistencia a la flexión (σ_f)	E: 71380,12 – 142760,24 kgf/cm ² σ_f : 611.83 - 1019.72 kgf/cm ²	
Compresión Paralela a las Fibras	La compresión paralela a las fibras mide la capacidad de la madera para resistir cargas de compresión aplicadas a lo largo de la dirección de las fibras.	Resistencia a la compresión (σ_c)	305,91 – 703,8 kgf/cm ²	
Tracción Paralela a las Fibras	La tracción paralela a las fibras mide la capacidad de la madera para resistir cargas de tracción aplicadas a lo largo de las fibras.	Resistencia a la tracción (σ_t)	407,89 – 917,74 kgf/cm ²	

Fuente: NEC SE MD, 2015

Elaboración: Autores

2.1.2.1. Clasificación por densidad básica

La clasificación por densidad básica es un método ampliamente utilizado en la caracterización de materiales lignocelulósicos, materiales compuestos por celulosa, hemicelulosa junto con lignina, que son componentes principales estructurales de las paredes celulares de las plantas. Asimismo, es utilizado para la evaluación de maderas para usos constructivos, energéticos e industriales.

La densidad básica, se define como la relación entre la masa seca de la madera y su volumen en estado saturado, es un indicador esencial de la calidad además de las propiedades mecánicas de la madera, así como de su comportamiento frente a tratamientos químicos y físicos (NEC SE MD, 2015). Por lo que, la densidad básica es clave para evaluar la resistencia y durabilidad de la madera.

La madera se agrupa dependiendo de su densidad básica (DB) como es el caso de las 105 maderas tropicales estudiadas en 3 grupos:

- A: DB entre 0,71 y 0,90 g/cm³ → 710 y 900 kg/m³
- B: DB entre 0,56 y 0,70 g/cm³ → 560 y 700 kg/m³
- C: DB entre 0,40 y 0,55 g/cm³ → 400 y 550 kg/m³

En la Tabla 2, A partir de los grupos A, B y C, se definen las propiedades de resistencia y rigidez.

Tabla 2: Resistencias y rigidez dependiendo de la densidad básica.

Grupos	Densidad Básica (g/cm ³)	Calidad / Resistencia	Durabilidad Natural	Usos Comunes	Ejemplos de Especies
A	> 0.71	Alta calidad o resistencia	Alta (resistentes sin tratamiento)	Estructuras de carga, pisos, muebles finos	Teca, Ipé, Caoba, Roble
B	0.56 - 0.70	Resistencia media	Media (protección moderada)	Carpintería, revestimientos, vigas	Pino, Cedro, Eucalipto
C	< 0.40	Baja calidad o resistencia	Baja (necesita tratamiento intenso)	Molduras, embalajes, elementos decorativos	Balsa, Álamos, Abedul

Fuente: JUNAC, 1996.

Elaboración: Autores.

2.1.2.2. Módulo de elasticidad (E)

El módulo de elasticidad o módulo de Young (E o MOE), es una propiedad mecánica que describe la capacidad de un material para deformarse elásticamente bajo una carga aplicada. Es un valor clave para el diseño estructural, como cálculos de deformación (determina la rigidez del material en la fase elástica, es decir, cuando la deformación es reversible una vez retirada la carga) y vibración en elementos estructurales como vigas y columnas (NEC SE MD, 2015).

El MOE es esencial porque afecta directamente al comportamiento de los elementos estructurales, tanto vigas como columnas, determinando su capacidad para soportar cargas sin presentar deformaciones permanentes. También, se describe como la relación entre el esfuerzo (fuerza aplicada) y la deformación en la región elástica del material, en este caso la madera, y su unidad de medida es kgf (kilogramos fuerza) (NEC SE MD, 2015).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Donde:

- E = Módulo de elasticidad.
- σ = Esfuerzo de trabajo (en kgf/cm²).
- ε = Deformación unitaria

En relación con la Tabla 3, los valores del módulo de Young y los tres grupos, son los que se harán uso para el dimensionamiento de elementos en flexión, compresión y tracción paralelos a las fibras. Según la NEC SE MD (2015), se incluyen dos valores para "E":

- E_{min} ($E_{0.05}$): Válido para el cálculo de elementos individuales.
- $E_{promedio}$: Valor promedio para el diseño de elementos en los que exista una acción en conjunto.

Tabla 3: Módulo de elasticidad para madera (kgf/cm²)

Grupo	Módulo de elasticidad (Mpa)		Kgf/cm ²	
	E_{min} (E 0.05)	$E_{promedio}$	E_{min}	$E_{promedio}$
A	9500	13000	95000	130000
B	7500	10000	75000	100000
C	5500	9000	55000	90000

Fuente: JUNAC, 1984; Quesada, 2024.

Elaboración: Autores.

2.1.2.3. Módulo de Poissón

Módulo de Poissón también denominado “Coeficiente de Poissón”, es la relación que existe entre la deformación lateral y deformación longitudinal. Es decir, es un parámetro que mide cómo se “estrecha” o “ensancha” la madera en una dirección perpendicular cuando se le aplica una carga en otra dirección (JUNAC, 1984). La fórmula para calcular este coeficiente es:

$$\nu = - \frac{E_{transversal}}{E_{longitudinal}} \quad (2)$$

Donde:

- $E_{transversal}$ = Deformación lateral
- $E_{longitudinal}$ = Deformación en dirección de la carga aplicada
- ν o ν = Módulo de Poissón

El signo negativo refleja que cuando un material se estira longitudinalmente, este se contrae transversalmente y viceversa. De igual forma, la madera presenta deformaciones en las direcciones tanto longitudinal, radial como tangencial.

Por otro lado, en la madera tiene diferentes valores con respecto a las direcciones que se consideren, como:

- Valores del orden 0,325 a 0,40 para densidades de 0,5gr/cm³

2.1.2.4. Módulo de Corte o Rigidez (G)

Es aquella propiedad mecánica fundamental que describe la resistencia de un material a deformarse bajo esfuerzo cortante (JUNAC, 1984). El módulo de corte es la relación entre el esfuerzo cortante (τ) y la deformación angular (γ) en una dirección perpendicular al esfuerzo aplicado:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3)$$

Donde:

- τ = Esfuerzo cortante.
- γ = Deformación angular o deformación transversal.

Otra manera de calcular el módulo de corte es a través de:

$$G = \frac{E}{2(1 + r)} \quad (4)$$

Donde:

- G = Módulo de Corte
- E = Módulo de elasticidad
- r = Módulo de Poissón

2.1.2.5. Peso específico de la madera

Una de las propiedades mecánicas de la madera es el peso específico. Se refiere a la cantidad de masa que conforma una cantidad de volumen de madera. Este peso influye directamente en el comportamiento de la madera bajo cargas y en su rendimiento en construcción (JUNAC, 1984).

$$\text{Peso Específico} = \frac{\text{Masa}}{2(1 + r)\text{Volumen}} = p \cdot g \quad (5)$$

Donde:

- p = Densidad de la madera (kg/m³)
- g = Gravedad (m/s²)

2.1.2.6. Conductividad térmica de la madera

La conductividad térmica es la capacidad de un material para transmitir calor cuando está sometida a un gradiente de temperatura. Se expresa en unidades de kcal/h·m·°C, que indican la cantidad de calor (en kilocalorías) que pasa a través de una unidad de espesor (en metros) y por una unidad de tiempo (en horas) cuando existe una diferencia de un grado Celsius entre sus caras (NEC SE MD, 2015).

2.2. Especies de madera

Como se observa en la Tabla 4, existen dos especies de madera: coníferas y latifoliadas, diferenciadas tanto interna como externamente, una de las diferencias notables es el comportamiento mecánico, relacionado con su resistencia y rigidez definido como la capacidad para experimentar deformación (JUNAC, 1984).

Tabla 4: Análisis comparativo de maderas coníferas y latifoliadas.

Características	Coníferas	Latifoliadas
Hojas	Aciculares o escamosas	Anchas y planas
Reproducción	Conos	Frutos y flores
Corteza	Gruesa y rugosa	Lisa, escamosa y gruesa
Distribución	Climas fríos y templados	Climas tropicales y templados
Madera	Suave y ligera	Dura y densa
Ejemplos	Pinos, abetos y cedros	Robles, arces y nogales

Fuente: JUNAC, 1984

Elaboración: Autores

De manera general, con ensayos de la misma densidad, se obtuvo que las maderas latifoliadas presentan una mayor resistencia que las maderas coníferas. En los ensayos de vigas a escala natural, se detectan deformaciones significativas antes de que ocurra la falla, al descargar la prueba durante la prueba, se recupera casi por completo la deformación (JUNAC,1984). La deformación máxima en el punto de rotura en comparación con el límite elástico, origina un comportamiento dúctil, de manera especial en vigas de madera verde.

2.4. Pinus Radiata

El Pinus radiata o pino insigne, es una especie de conífera originaria de la región costera central de California, en Estados Unidos, y de áreas limitadas en Baja California, México. A pesar de su área de distribución natural relativamente pequeña, se ha convertido en una de las especies de pino más cultivadas y apreciadas a nivel mundial debido a su rápido crecimiento junto a la versatilidad en la industria forestal. Este árbol destaca por su adaptabilidad a diferentes climas, de la misma manera a los suelos, lo que lo ha hecho popular en países como Nueva Zelanda, Chile, Australia al igual que España, donde se planta extensivamente para la producción de tanto madera como papel (Mead, 2013). El pino representa una alternativa viable para la construcción, debido a que juega un papel importante en la sostenibilidad de los ecosistemas forestales.

El pino radiata es valorado por su capacidad para crecer rápidamente alcanzando alturas significativas en pocos años, lo que lo convierte en una opción económica y sostenible para la producción de madera. Asimismo, se emplea en proyectos de reforestación, incluso como elemento ornamental en paisajes urbanos, gracias a su aspecto atractivo y su capacidad de adaptación.

a. Partes del Pinus Radiata

A partir de la Tabla 5, se presentan las partes del Pinus Radiata en donde:

Tabla 5: Estructura de la madera.



Elaboración: Autores

Según Mead (2013), para comprender cómo el *Pinus radiata* se desarrolla, es fundamental conocer las diferentes partes que lo conforman:

- **Raíz:** Caracterizada por ser raíces extensas y bien desarrolladas, lo que permite una buena absorción de agua y nutrientes, con un buen anclaje firme al suelo. Este sistema de raíces contribuye a la resistencia del árbol en suelos pobres y climas variados.
- **Tronco:** El tronco es recto, tal como su rápido crecimiento, una característica por la cual el *Pinus radiata* es valorado en la industria maderera. La madera producida es versátil y útil para construcción y papel.
- **Corteza:** La corteza del *Pinus radiata* es relativamente gruesa y cambia de una textura suave en árboles jóvenes a una textura más rugosa y escamosa en árboles adultos. Proporciona protección contra daños físicos y condiciones climáticas adversas.
- **Ramas:** Las ramas se disponen en verticilos a lo largo del tronco y, en su mayoría, tienen un ángulo ascendente. Esto permite un crecimiento equilibrado y favorece la exposición al sol de las acículas.
- **Hojas (acículas):** Las acículas del *Pinus radiata* están dispuestas en fascículos de tres, con forma alargada y de color verde oscuro. Estas hojas ayudan al árbol a realizar fotosíntesis de manera eficiente, adaptándose a diferentes climas.
- **Conos:** Existen conos masculinos, así como femeninos. Los conos masculinos son más pequeños y producen polen, mientras que los femeninos son más grandes y leñosos, conteniendo las semillas que se liberan al madurar el cono.

Estas características hacen del *Pinus radiata* una especie resistente, a la vez, ampliamente cultivada, especialmente en regiones fuera de su hábitat natural, como Nueva Zelanda y Australia, donde se ha adaptado bien su gestión sostenible para maximizar su producción y beneficios económicos. En cambio, en Ecuador, el *Pinus radiata* ha sido introducido principalmente con fines comerciales y de reforestación, siendo una especie clave en la industria maderera del país (Aguirre, 2019). Este hecho evidencia su relevancia estratégica en el sector forestal ecuatoriano, donde se ha aprovechado su rápido crecimiento, adaptabilidad y calidad de la madera para satisfacer la demanda de productos forestales, permitiendo recuperar áreas degradadas aportando beneficios ambientales.

En 1925, el *Pinus radiata* fue introducido en el Ecuador, específicamente en el páramo del Volcán Cotopaxi. No obstante, su uso no se extendió hasta la década de 1960 (Tabla 6), al igual que que otras especies como el *Eucaliptus globulus*. A partir de entonces, el *Pinus radiata* ha demostrado una notable capacidad de adaptación a las condiciones climáticas y edáficas de la región andina del país, lo que ha favorecido su presencia en la sierra (Miller,1974). Esta adaptación refleja su plasticidad ecológica, que le permite desarrollarse en suelos pobres y climas fríos propios de la Sierra ecuatoriana. Además, su expansión a partir de los años 60 estuvo estrechamente vinculada con las políticas nacionales de reforestación, lo que facilitó su consolidación en plantaciones comerciales.

Tabla 6: *Pinus Radiata* en Ecuador

N°	Localidad	Año
1	Cotopaxi	1925
2	Cotopaxi	1959
3	El Refugio Chaupi	1954
4	El Refugio Chaupi	1959
5	Achapichu	1959
6	Conocoto	1955
7	Conocoto	1963
8	Tortorillas-Palmira	1965

Fuente: Miller,1974

Elaboración: Autores

b. Propiedades mecánicas

Por otro lado, en la JUNAC (1984) el comportamiento mecánico del *Pinus radiata* o pino insigne se describe en la Tabla 7. En esta ficha se observa que la densidad básica de la especie es de 39 gr/cm³, lo que la clasifica como una madera suave. Sin embargo, esta densidad está por debajo del rango de la categoría C, que representa el índice de densidad más bajo.

Tabla 7: Propiedades mecánicas del *Pinus radiata*.

Nombre	País	Densidad básica (g/cm ³)	Condición	Flexión estática (kg/cm ²) - ELP	Flexión estática (kg/cm ²) - MOR	Flexión estática (t/cm ²) - MOE	Compresión (kg/cm ²) - ER	Compresión (kg/cm ²) - ELP
Pino insigne	EC	39	Verde	116	252	45	98	26
<i>Pinus radiata</i>	EC		Seco	293	664	76	390	70

Fuente: JUNAC, 1984

Elaboración: Autores

Según Catalán, Reyes & González (2021) para el diseño para los esfuerzos admisibles, la resistencia del material ante los diferentes tipos de esfuerzos varía, aumentando o disminuyendo, según factores de modificación relacionados con efectos constructivos o de servicio de la estructura. Los esfuerzos admisibles de la madera aserrada *Pinus radiata* se plantean de la siguiente manera:

Tabla 8: Esfuerzos admisibles de la madera acerrada del Pinus radiata

Grado Estructural	ESFUERZOS ADMISIBLES					Módulo de Elasticidad en Flexión
	Flexión	Compresión Paralela	Tracción Paralela	Cizalle Paralelo	Compresión Normal	
	Ff (kg/cm ²)	Fc (kg/cm ²)	Ftp (kg/cm ²)	Fcz (kg/cm ²)	Fcn (kg/cm ²)	Ef (kg/cm ²)
GS	112,17	86,6759	61,183	11,2169	25,4929	107070,18
G1	76,4787	76,4787	50,9858	11,2169	25,4929	101971,6
G2	55,0647	66,2815	40,7886	11,2169	25,4929	90754,72
C16	53,0252	76,4787	35,6901	11,2169	25,4929	80557,56
C24	94,8336	81,5773	47,9267	11,2169	25,4929	104011,03
MGP10	85,6561	101,97	40,7886	25,4929	13,2563	101971,6
MGP12	137,66	158,06	61,183	25,4929	13,2563	129503,93

Fuente: Catalán et al., 2021

Elaboración: Autores

2.5. Normativas

La madera como elemento estructural debe cumplir con estándares de seguridad así como durabilidad, por lo que hay normativas internacionales y locales que proporcionan criterios específicos para el diseño, pre dimensionamiento e incluso para el uso de este material en vigas, columnas u otras aplicaciones estructurales.

Entre las normativas más significativas se encuentran la **Norma Ecuatoriana de la Construcción** (NEC SE MD), que regula el uso de materiales en el contexto sísmico y climático de Ecuador; las normativas de la **ASTM** (American Society for Testing and Materials), establece procedimientos de ensayo, tal como la clasificación mecánica de la madera; por último, la **JUNAC/CAN** (Comunidad Andina), que promueve el uso de especies locales aparte de la adaptación a condiciones específicas de los países andinos.

Tabla 9: Cuadro comparativo de normativas (NEC, ASTM, JUNAC)

Criterio	NEC 2015 (Norma Ecuatoriana de la Construcción)	ASTM (Normas Internacionales)	JUNAC/CAN (Normativa Andina)
Materiales aceptados	Madera laminada y maciza, aprobada según estándares de resistencia mecánica y durabilidad	Madera maciza y laminada, con calificación según ASTM D2555 (propiedades de resistencia mecánica)	Uso de madera nativa, preferentemente de especies locales; énfasis en sostenibilidad y durabilidad según las condiciones climáticas
Resistencia de la madera	NEC establece diferentes resistencias según la clase de madera y las condiciones ambientales (madera seca o húmeda)	ASTM D245 y D2555: clasificaciones mecánicas de la madera, propiedades según el tipo de madera y sus defectos	Basada en la clase de madera nativa y adaptaciones a zonas sísmicas y de alta humedad
Criterios para vigas	Predimensionamiento de vigas basado en esfuerzos de flexión permisibles según la resistencia mecánica de	ASTM D198 y ASTM D2915: resistencia a flexión de madera estructural y procedimientos de	Diseño de vigas tomando en cuenta la humedad y el uso de madera local, con resistencia y flexión adaptadas a condiciones regionales

	la madera (σ_f) y el momento de inercia (I) de la sección	cálculo para el diseño de vigas	
Longitud máxima de vigas	Determinada por las propiedades del material, la sección y la carga aplicada, considerando coeficientes de seguridad de acuerdo con las condiciones ambientales	ASTM D245 y ASTM D3737: cálculo de longitudes máximas según la sección de la viga y su resistencia al pandeo y flexión	JUNAC recomienda dimensiones máximas según la altura y la ubicación de la estructura en zonas sísmicas o de vientos fuertes
Factores de ajuste	Incluye factores de ajuste por duración de la carga, condiciones ambientales (humedad) y efectos a largo plazo	ASTM D1990: factores de ajuste para condiciones de carga, humedad y otros factores que influyen en la resistencia	Factores de ajuste por humedad, exposición a condiciones tropicales, y adaptaciones a la altura geográfica
Criterios de pandeo lateral	La NEC establece criterios de estabilidad lateral según la longitud de pandeo efectiva (L_e) y el módulo de elasticidad (E)	ASTM D198: criterios de pandeo lateral y ASTM D143 para el cálculo de rigidez y desplazamientos	JUNAC define recomendaciones para evitar el pandeo lateral en zonas de alta humedad y sismicidad, basado en la estabilidad local de la madera
Uniones y empalmes	NEC define especificaciones para uniones de madera con diferentes conectores (clavos, pernos, placas de anclaje)	ASTM D5652: especificaciones para conexiones de madera y empalmes con pernos, clavos, y adhesivos	JUNAC fomenta el uso de sistemas de uniones tradicionales adaptadas a las especies locales, con énfasis en conexiones resistentes a condiciones ambientales extremas
Condiciones ambientales	Factores de ajuste por exposición a la humedad, clases de servicio (madera protegida, expuesta o en contacto con agua)	ASTM D3495: efectos de la humedad sobre las propiedades de la madera, con factores de ajuste para condiciones específicas	JUNAC establece directrices para el uso de madera en climas tropicales, considerando el impacto de la exposición continua a la humedad y las lluvias intensas

Fuente: NEC SE MD, 2015; JUNAC, 1984.

Elaboración: Autores

2.5.1. Clasificación de la madera

La clasificación por resistencias de la NEC SE MD (2015) agrupa las maderas en tres categorías basadas en sus propiedades mecánicas:

- Maderas de mayor resistencia (maderas duras): Estas se caracterizan por ser fuertes y de alta calidad, pero son difíciles de trabajar. Son las más adecuadas para aplicaciones donde se requiere alta resistencia estructural.
- Maderas de resistencia intermedia (maderas semiduras): Estas tienen una durabilidad y resistencia moderadas, una calidad aceptable, suelen ser fáciles de trabajar. Son una opción equilibrada que combina resistencia adecuada junto con una buena facilidad de uso.
- Maderas de menor resistencia (maderas suaves): Estas son menos duraderas, de baja calidad y presentan menor resistencia mecánica, aunque su manipulación es más sencilla.

En cuanto a los esfuerzos admisibles, la NEC SE MD (2015) proporciona valores de referencia para evaluar las propiedades mecánicas de las maderas y clasificarlas dentro de estas categorías.

2.5.2. Cálculo de elementos estructurales (vigas) de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)

El predimensionamiento de vigas de madera se basa en el análisis de esfuerzos y deformaciones para establecer secciones transversales adecuadas antes de un cálculo estructural detallado. Este proceso considera parámetros como la luz entre apoyos, las cargas aplicadas, las propiedades mecánicas de la madera y los factores de servicio que afectan su comportamiento estructural.

2.5.2.1 Consideraciones para el diseño

El análisis y diseño de estructuras de madera debe basarse en los principios fundamentales de la mecánica estructural, utilizando métodos convencionales de análisis lineal y elástico (NEC SE MD, 2015). Los esfuerzos generados por las cargas aplicadas se calcularán suponiendo que el material es homogéneo, isotrópico y de comportamiento lineal, bajo las hipótesis usuales de la teoría de vigas.

En el diseño de estructuras de madera, todos los cálculos deberán realizarse utilizando las dimensiones reales de los elementos, considerando las reducciones correspondientes. No se deben usar estructuras de madera en condiciones donde la temperatura supere los 65 °C (NEC SE MD, 2015). Es esencial considerar las dimensiones reales para obtener un diseño preciso, ya que las reducciones pueden afectar la capacidad de carga de la estructura.

Para el diseño se asume el uso de madera aserrada, aunque también puede considerarse el diseño con madera rolliza si se cuenta con datos de laboratorio que lo respalden. Los resultados de ensayos en probetas pequeñas sin defectos son aplicables a la madera aserrada, pero no necesariamente a la madera rolliza, ya que esta última incluye partes del árbol que no forman parte de las probetas pequeñas sin defectos, como lo indican las normas aceptadas (NEC SE MD, 2015). En otras palabras, la madera rolliza tiene mayor variabilidad y debe evaluarse cuidadosamente, debido a sus defectos naturales.

Por otro lado, es posible emplear piezas estructurales de madera laminada, siempre que se disponga de información confiable sobre los adhesivos, al igual que las técnicas de fabricación de los elementos, tales como vigas, columnas y pórticos. Es fundamental prestar especial atención a las uniones entre las láminas que conforman la pieza, para asegurar la continuidad de su resistencia (NEC SE MD, 2015). La calidad, tanto de las uniones como los adhesivos en la madera laminada, es necesario para asegurar la resistencia y estabilidad de la estructura a largo plazo.

Aunque el comportamiento de la madera frente a la aplicación de esfuerzos no sigue, en términos generales, la Ley de Hooke, en los niveles de sollicitación habituales puede considerarse un comportamiento elástico-lineal.

2.5.2.2 Requisitos de diseño

Cada componente de la estructura debe diseñarse, construirse y unirse para soportar los esfuerzos derivados de las combinaciones de cargas de servicio establecidas en la NEC SE MD (2015).

El diseño de los elementos de madera debe realizarse mediante el método de esfuerzos admisibles, que requiere como mínimo lo siguiente:

- Los elementos estructurales deben ser diseñados de manera que los esfuerzos generados por las cargas de servicio no superen los esfuerzos admisibles del material (NEC SE MD, 2015).
- Las deformaciones en los elementos, bajo las cargas de servicio, deben ser menores o iguales a las deformaciones admisibles. Además, es necesario considerar las deformaciones a largo plazo debido a cargas permanentes para asegurar que la deformación total sea aceptable (NEC SE MD, 2015).

Los requisitos de diseño se resumen de la siguiente manera:

2.5.2.3. Requisitos de resistencia

Esfuerzos de trabajo \leq Esfuerzos admisibles

La fórmula de esfuerzo de trabajo en el dimensionamiento de vigas de madera, propuesta por Navier, se basa en una expresión previa que relaciona la resistencia del material con las solicitaciones inducidas por las cargas actuantes (NEC SE MD, 2015). Por lo que, el esfuerzo admisible se obtiene reduciendo la resistencia última de la madera mediante un factor de seguridad, lo que permite considerar variaciones en la calidad del material, condiciones de carga y durabilidad.

Con esta formulación, se asegura que la viga no supere los esfuerzos permitidos, facilitando una selección preliminar de dimensiones sin necesidad de cálculos complejos, pero manteniendo la estabilidad y eficiencia del diseño estructural.

$$\sigma t = \frac{6 * M}{b * h^2} \quad (6)$$

Donde:

- σt = esfuerzo de trabajo
- M = Momento flector
- b = Base de la sección transversal ($h/2$)
- h = Altura de la sección transversal

Asimismo, la fórmula previamente mostrada se deriva de una expresión fundamental utilizada para el cálculo de esfuerzos en elementos sometidos a flexión:

$$\sigma_t = \frac{M*c}{I_x} \longrightarrow \sigma_t = \frac{\frac{q*L^2}{8} * \frac{h}{2}}{\frac{b*h^3}{12}} \longrightarrow \sigma_t = \frac{6*M}{b*h^2} \quad (7)$$

Donde:

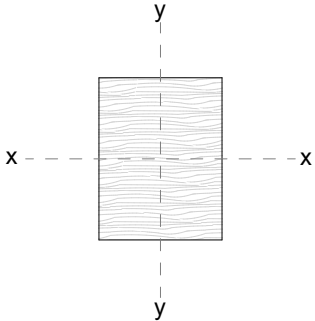
- σ_t = esfuerzo de trabajo
- M = Momento flector
- c = medida desde su centroide hasta su fibra más alejada ($h/2$)
- I_x = Inercia en el eje x
- b = Base de la sección transversal ($h/2$)
- h = Altura de la sección transversal
- q = Carga

2.5.2.4. Requisitos de rigidez

Las deformaciones deben ser menores que las deformaciones admisibles y evaluarse bajo cargas de servicio, tomando en cuenta los incrementos de deformación a lo largo del tiempo (deformaciones diferidas) causadas por cargas aplicadas de manera continua. El módulo de elasticidad es aplicable a elementos de madera en flexión, tracción o compresión paralela a las fibras (NEC SE MD, 2015). Es importante que las deformaciones de los elementos de madera no superen los valores permitidos, considerando tanto las deformaciones iniciales como las que ocurren con el tiempo debido a cargas constantes.

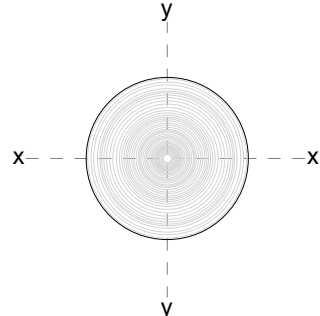
- Inercia en el x (Vigas)

a. Sección rectangular



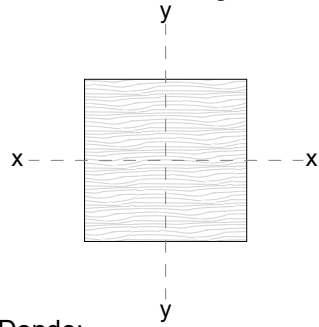
$$I_x = \frac{b*h^3}{12} \quad (8)$$

b. Sección circular



$$I_x = \frac{\pi*r^4}{4} \quad (9)$$

c. Sección cuadrangular



$$I_x = \frac{h^4}{12} \quad (10)$$

Donde:

- I_x = Inercia en el eje x
- h = Peralte de la viga

Se sugiere considerar la información sobre esfuerzos y deformaciones proveniente de literatura especializada o de la experiencia en estructuras de madera en servicio. El conocimiento actual a nivel nacional no permite desarrollar un diseño basado en el estado límite en esta versión de la norma, debido a la falta de información confiable que garantice una seguridad adecuada para las estructuras, dada la amplia diversidad de especies latifoliadas en la región (NEC SE MD, 2015). Esta limitación provoca la falta de datos confiables sobre las especies locales.

2.5.3. Predimensionamiento de vigas

Para las vigas, el predimensionamiento se realiza en función de los momentos flectores y las cargas aplicadas (NEC SE MD, 2015). El cálculo en función de los momentos flectores y cargas aplicadas permite una distribución adecuada de los esfuerzos, asegurando que las vigas puedan resistir cargas generadas durante su uso.

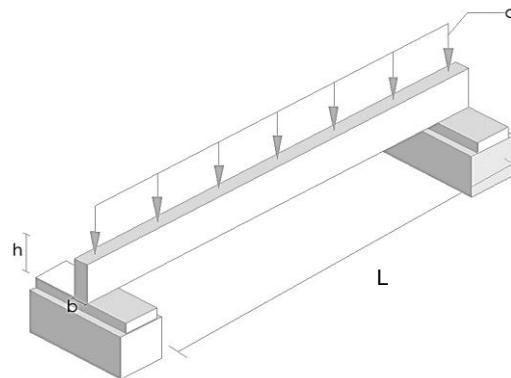


Figura 4: Viga simplemente apoyada

Elaboración: Autores

a. Cálculo del Momento Máximo (M): Consiste en el punto donde la estructura experimenta la mayor flexión, lo que suele determinar el diseño de la resistencia del material.

$$M_{max} = \frac{q * L^2}{8} \quad (11)$$

b. Selección de la sección transversal:

$$b = \frac{\sqrt[3]{150 * q * L^2}}{\sigma_{adm}} * h \quad (12)$$

Donde:

- b = es el ancho de la viga.
- h = es la altura de la viga.
- σ_{adm} = es el esfuerzo admisible del material (100 kgf/cm²)
- q = Carga
- L = Longitud

2.6. Investigaciones en el área

La evaluación del comportamiento mecánico de la madera es fundamental para su aplicación en la construcción, ya que permite determinar sus propiedades estructurales garantizando su uso seguro y eficiente. En este contexto, estudios previos han empleado ensayos a escala real para analizar parámetros clave como el módulo de elasticidad (MOE), el módulo de rotura (MOR), el esfuerzo último máximo y la humedad de la madera.

En particular, el estudio realizado por Cada, Neira y Quesada (2023) titulado “Caracterización Físico – Mecánica de la Madera Aserrada Pinus Radiata Comercializada en Cuenca”, en donde hace enfoque al análisis del comportamiento estructural de varias probetas de madera sometida a ensayos de flexión, tracción y compresión. De igual modo, la investigación de Viera, Maliza y Mejía (2023) se orienta en la evaluación experimental de vigas de madera a escala real, proporcionando datos precisos sobre su comportamiento estructural. La metodología utilizada en estos estudios servirá como referencia para el análisis experimental de nuevas probetas.

2.6.1. Caracterización Físico – Mecánica de la Madera Aserrada Pinus Radiata Comercializada en Cuenca

Este estudio busca determinar las propiedades físico-mecánicas del Pinus radiata mediante la normativa COPANT, con el fin de aportar al conocimiento y promover su uso en la industria de la construcción en la provincia del Azuay (Cada et al.,2023). Este tipo de estudios favorece la adopción del pino en la construcción local, lo que podría contribuir al desarrollo de la industria maderera en el Azuay.

2.6.2.1. Metodología

Se llevaron a cabo varios ensayos en los que sometían a 10 probetas secas, además de 10 probetas verdes a ensayos de flexión, compresión y tracción para determinar las propiedades principales físico mecánicas del pino. Sus dimensiones eran de 5x5x20cm cada una siguiendo los parámetros de la COPANT (Cada et al.,2023). El contraste entre ambas condiciones permitirá observar variaciones significativas en la resistencia y elasticidad del pino. El cumplimiento con los parámetros establecidos en la COPANT garantiza que los resultados sean comparables con otros estudios, lo que aumenta la confiabilidad de los datos obtenidos.

Durante los ensayos, se obtuvieron valores clave (Tabla 10) como el módulo de elasticidad (MOE), el módulo de ruptura (MOR), el esfuerzo último (EFS) y el contenido de humedad (CH) de las probetas. Los ensayos de flexión proporcionaron datos específicos sobre el comportamiento mecánico del material (Cada et al.,2023). Estos parámetros permiten evaluar si el material es adecuado para aplicaciones estructurales en la construcción, asimismo, los ensayos simulan condiciones de uso real en estructuras de madera, proporcionando datos directamente aplicables en el diseño.

Tabla 10: Resultados de ensayos a flexión

ESTADO	IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA	MOR (kgf/cm ²)	MOE (kgf/cm ²)	ELP (kgf/cm ²)	CH (%)	PE (g/cm ³)
VERDE	1A	180,89	38012,54	122	117,97	0,34
	11	108,55	45621,77	96	88,48	0,37
	2A	278,73	118306,29	158,66	60,89	0,35
	22	148,82	53093,38	117,17	105,8	0,52
	3A	100,44	51156,48	79,81	113,85	0,36
	33	111,07	46679,67	84,77	119,37	0,34
	4A	198,24	62488,34	135,69	144,93	0,34
	44	181,6	51387,8	70,19	108,97	0,34
	5	305,6	60442,37	102,68	93,64	0,43
	55A	162,24	45458,4	136,31	74,85	0,37
PROMEDIO		333,93	52041,03	171,27	102,875	0,376

Fuente: Cada, Neira y Quesada, 2023

Elaboración: Autores

A partir de los datos consignados en la Tabla 10, se realizará una comparación con los resultados que se obtendrán en los ensayos de flexión, dado que la investigación se basa en datos actualizados y cumple con las normativas técnicas vigentes. La especificación precisa de estos valores en la tabla es importante para garantizar la exactitud y validez del análisis estructural, conforme a los criterios establecidos en la metodología de este estudio.

2.6.2. Caracterización Mecánica de Vigas de Madera Laminada Encolada (MLE) de Pino Producido en Ecuador

Según Viera et al. (2023), la investigación tiene como finalidad determinar las propiedades físico y mecánicas de la madera laminada encolada (MLE), a través de la ejecución de ensayos experimentales aplicados a elementos macizos de Pinos Radiata con fines estructurales.

2.6.2.1. Metodología

Se adquirieron cuatro probetas de MLE a través de la empresa Madebú, ubicada en la ciudad de Quito, las cuales fueron fabricadas utilizando pino producido en Ecuador. Tanto las dimensiones de las muestras como los ensayos correspondientes se llevaron a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en la normativa ASTM D198 (2016) (Viera et al., 2023). Por lo tanto, se asegura que las muestras son materiales locales, por lo que evalúa la relevancia de la sostenibilidad y disponibilidad de recursos nacionales.

Las dimensiones de las probetas (VF-01, VF-02, VF-03, VF-04) se presentan en la Tabla 11. Cada sección está compuesta por ocho láminas unidas longitudinalmente mediante el sistema de finger joint, una técnica que consiste en realizar un dentado en los extremos de las piezas para aumentar la superficie de encolado, optimizando así la resistencia estructural de la unión. El espesor promedio de cada lámina es de aproximadamente de 4cm.

Tabla 11: Dimensiones de probetas de MLE

Probetas	Dimensiones		
	b(m)	d(m)	Lo(m)
VF-01	0,141	0,321	4,099
VF-02	0,140	0,320	4,100
VF-03	0,141	0,321	4,099
VF-04	0,140	0,321	4,100

Fuente: Maliza y Mejía, 2023
Elaboración: Autores

2.6.1.2. Procedimiento

De acuerdo con la norma NCh 2165, los nudos e imperfecciones superiores a 6 mm pueden influir en la resistencia del material. Por esta razón, se identificaron en las cuatro caras de las probetas, tal como se muestra en la Figura 6 (Viera et al., 2023). En los proyectos de construcción se debe tomar en consideración las imperfecciones de la madera, ya que pueden reducir la capacidad de carga del material y aumentar el riesgo de fallas estructurales.



Figura 5: Marcación de nodos

Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

El contenido de humedad se determinó utilizando un higrómetro electrónico, y se registró el peso de cada probeta previo a la realización del ensayo, tal como se muestra en la Figura 7 (Viera et al., 2023). Esto ayuda a obtener los pesos de las probetas para obtener un margen de error, considerando que las variaciones en el contenido de humedad pueden afectar los resultados finales.



Figura 6: Medición de contenido de humedad

Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

La carga puntual aplicada mediante la máquina fue transmitida a través de una viga y rodillos de acero, ubicados en un tercio de la luz, como se muestra en la Figura 8. Además, se instaló un deformímetro LVDT en la parte inferior y al centro de la luz. Una vez realizado este montaje, se procedió a iniciar el ensayo (Viera et al., 2023). El ensayo de flexión se llevó a cabo siguiendo las directrices de la norma ASTM D198.

Según ASTM D198 (2016), los momentos flectores generados por la aplicación de dos cargas puntuales, situadas en los tercios de la luz, son equivalentes a los generados por una carga uniformemente distribuida a lo largo de toda la viga. Por este motivo, se optó por dicha configuración de carga. De igual manera, la distancia entre los puntos de carga (a) depende principalmente del peralte de la viga (d). Para calcular las propiedades de resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, es necesario que la relación a/d esté comprendida entre 4 y 6 (Figura 8).

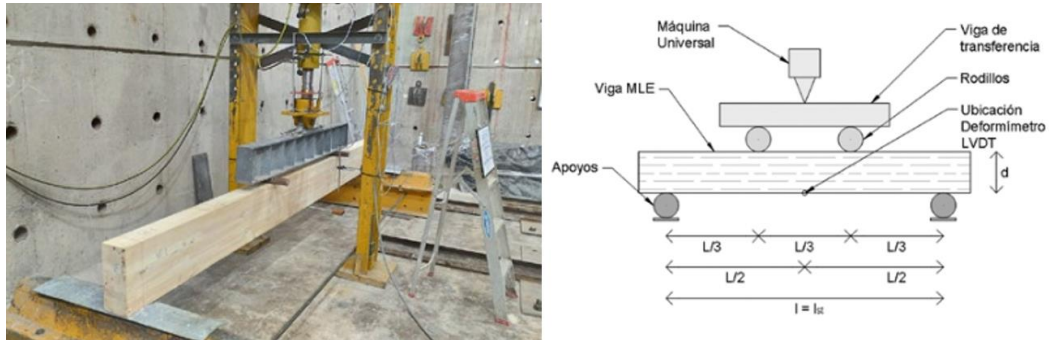


Figura 7: Colocación de viga MLE en posición de ensayo a flexión

Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

La norma ASTM D198 (2016) proporciona las ecuaciones 9 y 10 como herramientas para determinar el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión, respectivamente.

$$E = \frac{3Pa l_{st}^2}{4bd^3 \Delta_{st}} \quad (13)$$

Donde:

- E = Módulo de elasticidad
- Pa = Carga puntual aplicada por la máquina universal
- L_{st} = Longitud entre apoyos extremos
- b = Base de la probeta
- d = Peralte de la probeta
- Δ_{st} = Deflexión libre de cortante (en el centro de la luz de la probeta)

Esta investigación proporciona la metodología para calcular la distancia entre apoyos y dimensiones de las probetas que se someterán a ensayos de flexión, siguiendo la norma ASTM. Además, se incluyen las ecuaciones necesarias para determinar parámetros esenciales como el módulo de elasticidad y el esfuerzo resistente a flexión, los cuales ayudan a complementar el desarrollo de los ensayos propuestos en la metodología de este estudio.

2.7. ETABS

“**Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems**”, es un software que permite el análisis y diseño de estructuras tridimensionales, con visualización 3D, junto con gráficos explicativos, utiliza objetos para realizar elementos estructurales, que permite establecer las cargas, así como las propiedades para definir la estructura del edificio (CSI, 2024). Este software es especialmente útil en proyectos de gran escala donde la complejidad y precisión del diseño son factores relevantes.

Según Computers & Structures (2024) los pasos básicos son:

1. Trazar series de objetos, puntos, líneas y áreas que representen el proyecto usando los diversos instrumentos de dibujo que se encuentran disponibles en la interfaz gráfica.
2. Establecer propiedades estructurales (secciones y materiales) y cargas a objetos usando las opciones del menú Asignar (Assign menu option).
3. Establecer y/o Asignar parámetros de división interna (Meshing) en elementos de área.

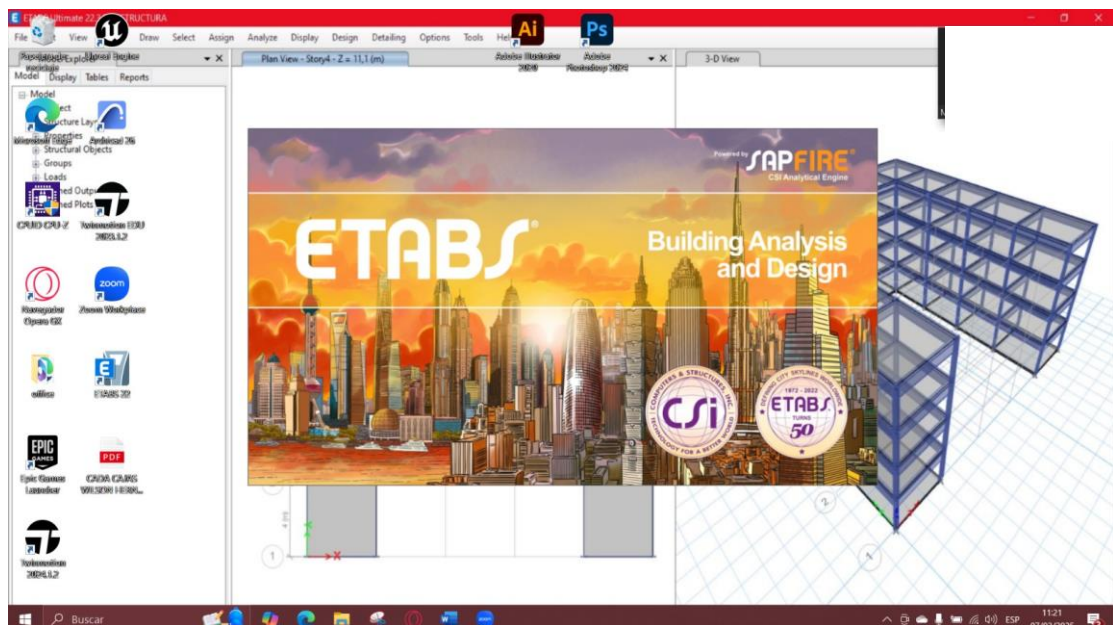


Figura 8: Programa ETABS (Ventana de trabajo)

Elaboración: Autores

En el diseño estructural, el acero y el hormigón son materiales fundamentales. Por lo que, en ETABS están integrados de manera que reflejan sus características reales según los códigos de diseño internacionales (CSI, 2024). Este software permite modelar, analizar y diseñar estructuras que combinan estos materiales, ofreciendo flexibilidad para abordar diferentes escenarios constructivos.

2.7.1. Datos necesarios para dimensionar elementos de madera en ETABS

Según CSI (2024) Para dimensionar elementos de madera en ETABS, se debe ingresar ciertas propiedades físicas y mecánicas de la madera como se expresa en la Figura 10:

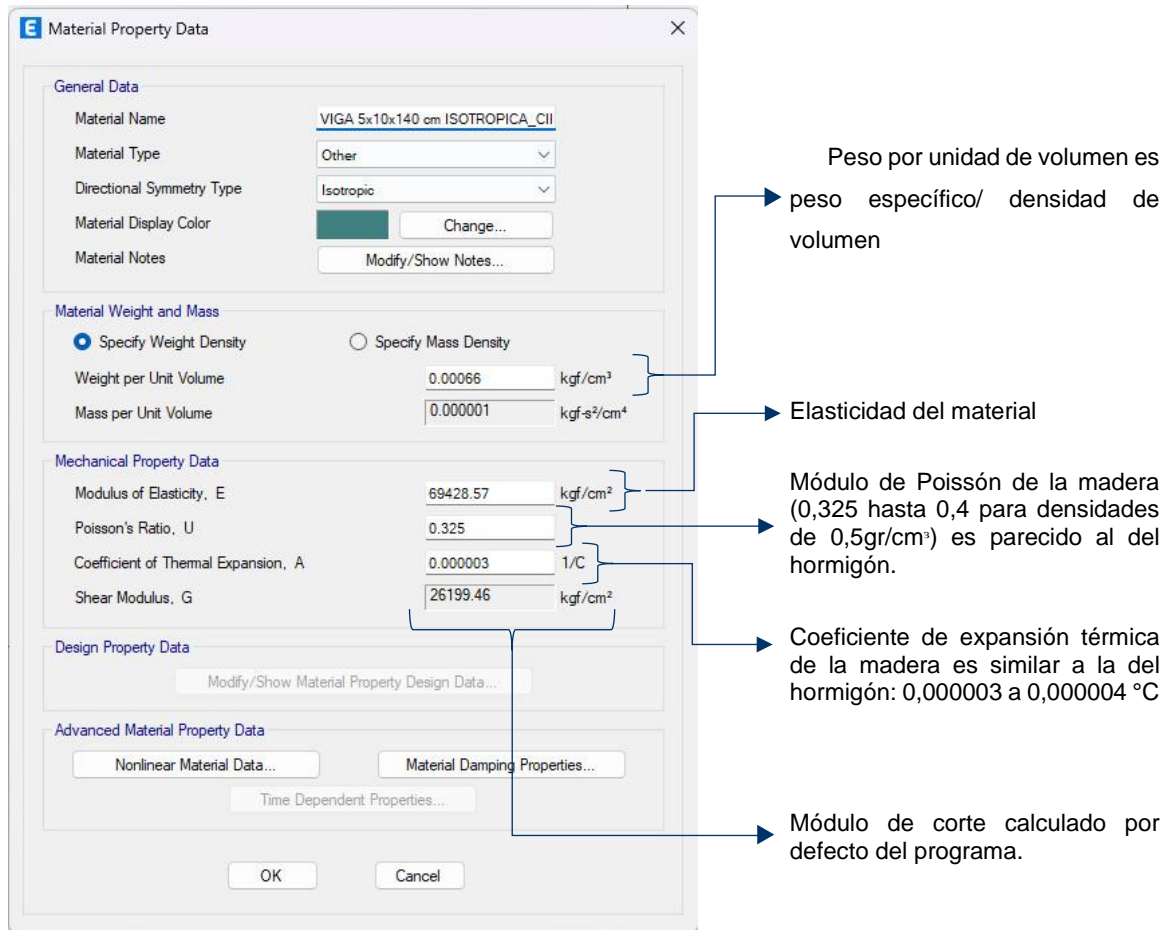


Figura 9: Datos requeridos

Elaboración: Autores, 2025.

- Módulo de Elasticidad (E): Necesario para evaluar la rigidez del elemento bajo cargas. Este valor debe ser específico para la especie de madera y debe estar indicado en el sentido de las fibras (paralelo o perpendicular).
- Módulo de Corte (G): Ayuda a evaluar el comportamiento de deformación del material bajo cargas cortantes.
- Densidad de la madera: Es importante para calcular las cargas gravitacionales.
- Esfuerzos admisibles de tensión, compresión y corte: Valores admisibles para cada tipo de esfuerzo en función de la dirección de la fibra. Estos valores pueden variar considerablemente según la especie de madera y el tipo de carga (permanente o transitoria).
- Coeficientes de seguridad: Para cumplir con normas de diseño, si se está trabajando con normas específicas para maderas (ej: Norma Ecuatoriana de la Construcción).

2.7.2. Procedimiento en ETABS

Según el CSI (2019) para realizar un modelado óptimo de elementos en ETABS, se deben seguir los siguientes pasos:

- **Definición del Material:** Definir el material en la biblioteca de materiales de ETABS. Si no se encuentra una opción de madera predefinida, puede crear un nuevo material de madera e ingresar las propiedades mecánicas mencionadas anteriormente.
- **Sección del Elemento:** Precisar la sección del elemento (vigas o columnas) que desea utilizar en madera. Pueden ser secciones de tipo rectangular, circular u otras formas que se adapten al diseño.
- **Aplicación de Cargas:** Asigna las cargas de servicio que afectarán a los elementos de madera (cargas permanentes, vivas, viento, etc.).
- **Análisis de Deformaciones y Esfuerzos:** ETABS calculará las deformaciones y esfuerzos para cada elemento según las propiedades ingresadas. Puedes verificar si las deformaciones están dentro de los límites admisibles para la rigidez y estabilidad de la estructura.

2.7.3. Limitaciones en el Diseño de Madera en ETABS

Aunque ETABS permite el análisis estructural, el diseño completo y detallado de elementos de madera puede requerir herramientas adicionales o normas especializadas de madera. Sin embargo, Betancur (2022) menciona que, ETABS no realiza todos los chequeos detallados ni considera aspectos como la variabilidad de especies, condiciones ambientales, y deformaciones a largo plazo de manera específica para madera.

Por ende, para solucionar el déficit de datos estructurales de la madera dentro del software ETABS, se han llevado a cabo investigaciones sobre la madera como elemento estructural, para obtener datos sobre la resistencia de la madera, como la investigación “Caracterización físico – mecánica de la madera aserrada *Pinus radiata* comercializada en Cuenca” realizada por Cada, Neira y Quesada (2023), misma que trata del desarrollo de varias pruebas de resistencia como ensayos de compresión paralela a la fibra, flexión estática y tracción paralela a la fibra, con el fin de obtener una caracterización físico - mecánica actualizada dentro del contexto de la ciudad de Cuenca

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Este capítulo está centrado en la validación experimental de elementos estructurales (vigas) y en el ingreso de datos al programa ETABS. El proceso se estructuró en dos componentes principales: los ensayos experimentales a escala real en vigas sometidas a flexión, así como, la modelación numérica en el software ETABS, donde se implementaron propiedades físicas y mecánicas del pino (*Pinus Radiata*).

3.1. ENSAYO EXPERIMENTAL

Este componente permite la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del *Pinus radiata*, proporcionando datos precisos sobre su desempeño estructural en vigas sometidas a distintas cargas. A través de ensayos experimentales, se determinan parámetros como la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad y la capacidad de absorción de cargas, lo que posibilita una evaluación de su comportamiento en condiciones reales. Estos resultados constituyen la base para el desarrollo del segundo componente.

3.1.1. Metodologías

La ejecución de los ensayos a flexión fue realizada en las instalaciones de la Universidad Católica de Cuenca en el Centro de Investigación, Innovación y Transparencia Tecnológica (CIITT), el cual dispone del equipo necesario para su realización.

3.1.1.1. Equipo

El equipo a emplear es una prensa de compresión (Figura 11) que ayuda a evaluar la resistencia mecánica de materiales sometidos a cargas de compresión (ASTM C39, 2015). Su funcionamiento se basa en la aplicación gradual de una fuerza aplicada sobre una probeta, permitiendo medir la carga máxima que el material puede soportar previo a su ruptura.

Esta máquina cumple con normativas internacionales como la ASTM C39, asegurando la precisión de los ensayos, en el cual, las probetas serán aplicadas a una carga con una velocidad constante de 2,5 mm/min². No obstante, la máquina puede ser adaptada para hacer ensayos de flexión.



Figura 10: Prensa de compresión

Elaboración: Autores

De igual forma, se utilizará el horno para el secado de la madera durante 24 horas \pm 2 horas, para el cálculo de la humedad.

3.1.1.2. Adaptación del equipo

Durante la inspección de la máquina en los laboratorios del CIITT, se identificaron limitaciones en cuanto a las dimensiones. La máquina permite una distancia máxima de 15cm entre las cargas, mientras que los apoyos tienen un alcance de hasta 40cm. Dado que las vigas a ensayar excedían estas dimensiones, se optó por adaptar al equipo incorporando una placa de acero y dos rodillos de acero macizo en la parte superior de la máquina, con el fin de simular las cargas, ampliando la distancia entre ellas a 40cm. Además, se ajustaron los apoyos colocando una viga de acero y dos elementos adicionales en cada extremo en la parte inferior de la máquina, lo que permitió elevar la viga aproximadamente a 15cm, asegurando que, al deformarse, no entre en contacto con la viga de acero.

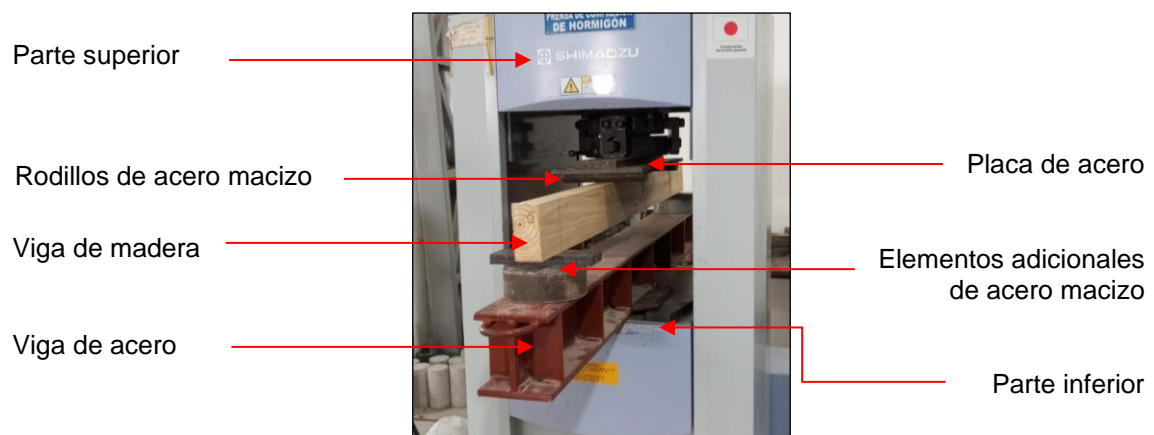


Figura 11: Adaptación del equipo

Elaboración: Autores

3.1.2. Selección de probetas

La selección de muestras se realizó a partir de los productos disponibles en los establecimientos comerciales especializados en la venta de madera, los cuales adquieren la madera de proveedores responsables del aserrío en bosques situados en las provincias del Azuay y Cañar. Las muestras fueron adquiridas en un aserradero localizado en Gualaceo, aunque el origen exacto de la madera, más allá de la Parroquia Taday, no se pudo determinar con precisión.

No obstante, los datos relacionados con su procedencia están debidamente registrados en las guías de movilización, documentos de carácter obligatorio emitidos por el Ministerio del Ambiente (MAE). Dichas guías detallan el tipo de madera, su origen, destino y dimensiones, lo que garantiza que las muestras tomadas corresponden efectivamente al objeto de estudio (Madera Pinus radiata).

Origen		Destino							
Propietario Nombres y Apellidos: NASPUD SALTO SEGUNDO LUIS BENIGNO Razón Social: NASPUD SALTO SEGUNDO LUIS BENIGNO R.U.C: 0300471901		Industria Forestal Nombre Sucursal: - Sucursal - 1 Razón Social: LEON DELGADO WILLIAM ALEJANDRO R.U.C: 010017773001 AV. JAIME ROLDOS y COLON - A UNA CUADRA DEL REDONDEL DE LA GASOLINERA							
Ejecutor Nombres y Apellidos: SIMBAÑA NASPUD MILTON EUDORO Razón Social: SIMBAÑA NASPUD MILTON EUDORO R.U.C: 0302104138		Dirección: Teléfono: Provincia: AZUAY Cantón: GUALACEO Parroquia: GUALACEO							
Ubicación Provincia: CAÑAR Cantón: AZOGUES Parroquia: TADAY Sitio: MACHICORRAL		Datos Vehículo: Color Vehículo: BLANCO Placa Vehículo: ADO0347 Marca de Vehículo: HINO Tipo de Vehículo: Camión							
Válida desde: 2024-11-19 11:00:00 hasta: 2024-11-19 16:00:00 tiempo en horas: 5									
DETALLE DE PRODUCTOS INGRESADOS									
N.	PRODUCTO	COD. ESPECIE	NOMBRE COMUN	LARGO	DIAMETRO/ ESPESOR	ANCHO	UNIDADES	VOLUMEN APROVECHADO	VOLUMEN MOVILIZADO
1	Aserrada dimensionada	28810	PINO (Pinus radiata)	3	0.13	0.13	120	12.17	6.08
								TOTAL MOVILIZADO	6.08
Declaro que los datos en esta guía se apegan a la verdad y en caso contrario, asumo las responsabilidades legales conforme a los artículos 78 y 94 de la Codificación de la Ley Forestal y Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre.				<i>DRCV 19/11/2024 HASTE</i>					
<i>Milton Eudoro Simbaña</i> MILTON EUDORO SIMBAÑA NASPUD 0302104138 EJECUTOR									

Figura 12: Guía de Movilización de la madera Pinus Radiata

Elaboración: Autores

Las muestras fueron extraídas del duramen, la parte más central del árbol, como se observa en la Figura 14.



Figura 13: Muestras obtenidas (duramen).

Elaboración: Autores

Para la selección de las probetas se consideró la normativa vigente para ensayos de flexión (ASTM D198), la cual especifica que los momentos flectores son similares a una carga uniformemente distribuida cuando se aplican dos cargas puntuales a los tercios de la luz respectivamente.

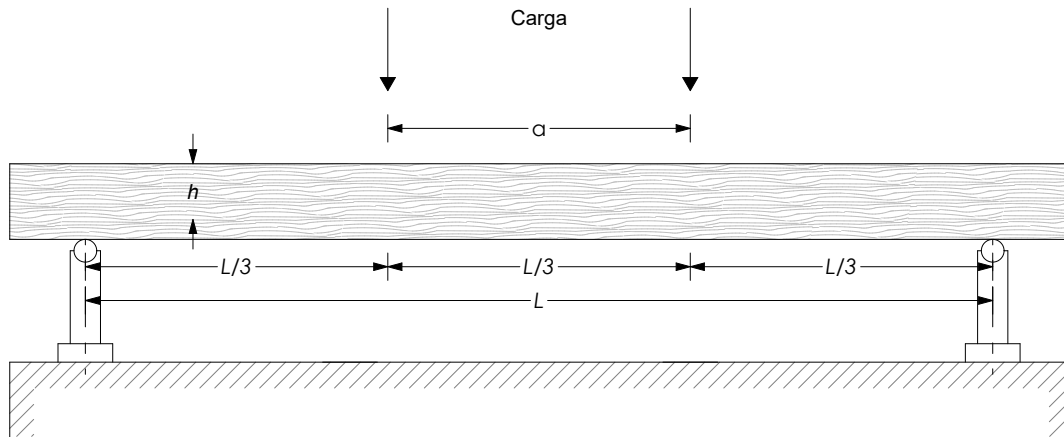


Figura 14: Viga simplemente apoyada con cargas a los tercios de la viga

Elaboración: Autores

Asimismo, la distancia entre los puntos de aplicación de cargas (a), depende principalmente del peralte de la viga (d). Por lo tanto, para garantizar las propiedades mecánicas requeridas, como la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad, es necesario que la relación a/d se mantenga dentro del rango de 4 a 6 (Viera et al., 2023). A partir de este criterio, se presenta la siguiente tabla (Tabla 12).

Tabla 12: Dimensiones de probetas

PROBETAS	DIMENSIONES		
	b(cm)	d (cm)	Lo(cm)
A01	5cm	10cm	140cm
A02	5cm	10cm	140cm
A03	5cm	10cm	140cm
A04	5cm	10cm	140cm

El diagrama muestra una probeta rectangular horizontal. La longitud total es 140 cm y el peralte (altura) es 5 cm .

Elaboración: Autores

Las vigas fueron codificadas como A01, A02, A03 y A04, con el propósito de diferenciarlas entre sí, facilitar su comparación y análisis.



Figura 15: Muestras codificadas

Elaboración: Autores

A continuación, se presenta la viga con sus respectivos datos:

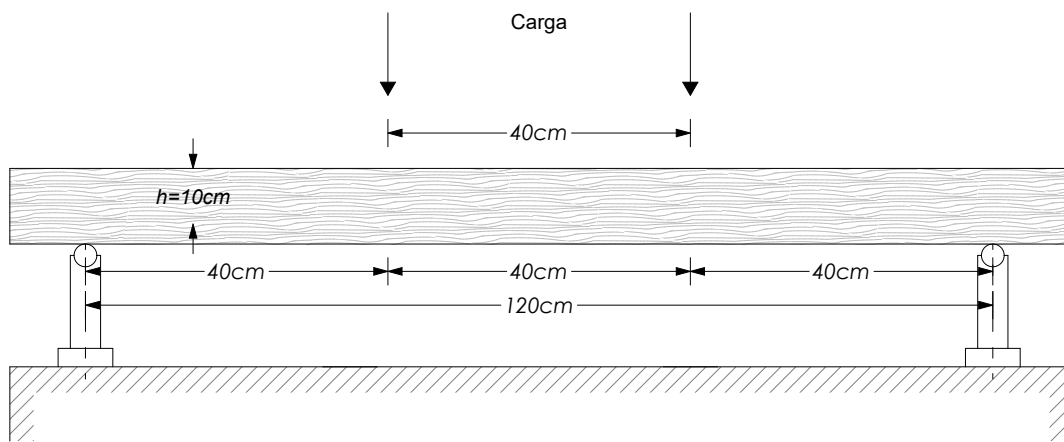


Figura 16: Datos de viga simplemente apoyada

Elaboración: Autores

Previo a la ejecución de los ensayos, se llevó a cabo una inspección de las probetas, donde se identificaron imperfecciones (nudos/ojos) de las probetas. Estas irregularidades, propias de la madera, pueden alterar los resultados del comportamiento mecánico del material.

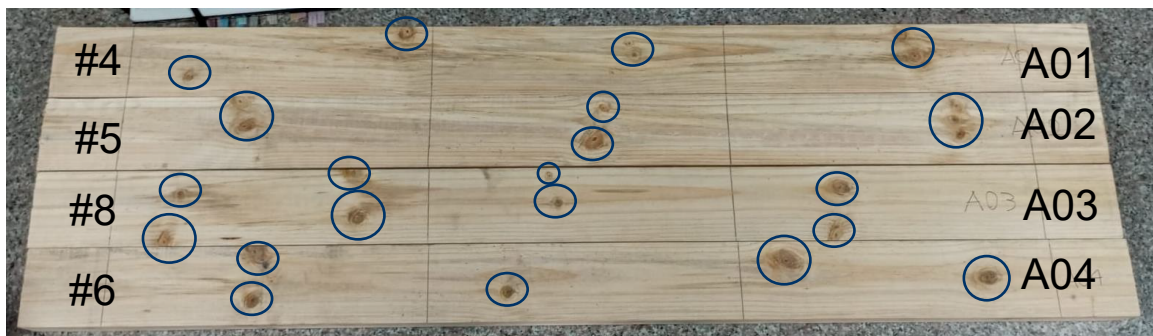


Figura 17: Identificación de ojos/nudos

Elaboración: Autores

En la Figura 18, se observa una distribución irregular de nudos u “ojos”, los cuales han sido señalados. A01, A02 y A04 presentan una menor cantidad de nudos, aunque A02 tiene una imperfección de mayor tamaño (3cm) en la parte derecha. En A03, los nudos son más constantes teniendo un total de 8 nudos tomando en consideración que los nudos son mínimo de 2cm. La presencia de nudos grandes o concentrados en ciertas zonas de la probeta puede generar puntos débiles, afectando la uniformidad del material y su capacidad de soportar cargas.

3.1.3. Registro fotográfico

El siguiente registro fotográfico muestra el proceso del ensayo, incluyendo la medición y señalización de la ubicación de cargas, así como los apoyos en la viga, la colocación de las vigas en la máquina, su estado antes y después de la prueba, evidenciando la deformación, además de la fractura del material.

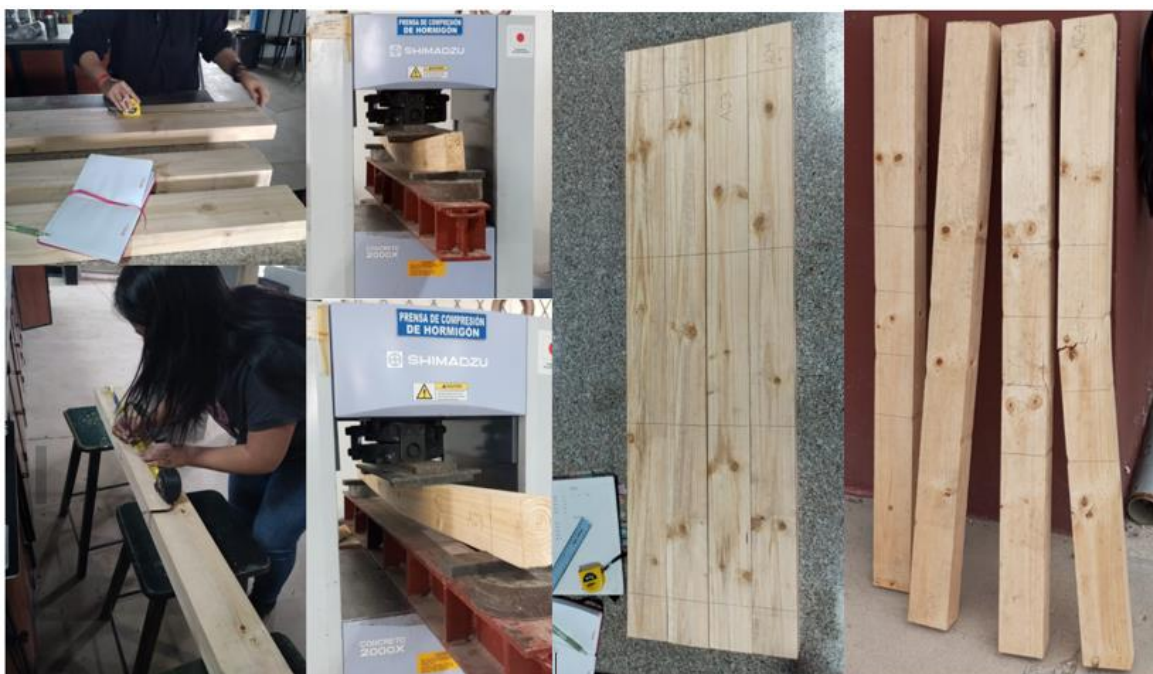


Figura 18: Fotografías realizadas durante y después del ensayo a flexión

Elaboración: Autores

3.1.4. Cálculos

3.1.4.1. Cálculo del Esfuerzo unitario en el límite de proporcionalidad y factores de reducción.

Es importante determinar el esfuerzo unitario en el límite de proporcionalidad debido a que hace referencia al punto máximo en la que la madera puede estar sometida bajo una carga con la posibilidad de volver a su estado original (COPANT, 1973). Identificar este punto permite a los arquitectos e ingenieros utilizar la madera de manera eficiente, maximizando su capacidad de carga sin exceder sus límites de elasticidad.

$$ELP_f = \frac{3P_2 \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (14)$$

Donde:

- ELP_f = Esfuerzo unitario
- P = Carga en el límite de proporcionalidad
- L = Luz entre apoyos
- b = Base
- h = Altura

Tabla 13: Esfuerzo unitario

VIGA	Carga (P) Kgf	Esfuerzo unitario Kg/cm ²
A01	1050 Kgf	378,00 Kg/cm ²
A02	1190,2 Kgf	428,47 Kg/cm ²
A03	900 Kgf	324,00 Kg/cm ²
A04	1000 Kgf	360,00 Kg/cm ²
PROMEDIO	1035,05 Kgf	373,61 Kg/cm ²

Elaboración: Autores

3.1.4.2. Cálculo del Módulo de Elasticidad (MOE)

Para conseguir el módulo de elasticidad, se aplica la siguiente fórmula:

$$E_f = \frac{P \cdot L^3}{\delta \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (15)$$

Donde:

- E_f = Módulo de elasticidad
- P = Carga en el límite de proporcionalidad
- l = Longitud entre apoyos
- δ = Deformación
- b = Ancho
- h = Altura

a. Viga A01

Tabla 14: Cálculo del MOE A01

P= 1050 Kgf	$E_f = \frac{(1050 \text{ kgf}) \cdot (120\text{cm})^3}{1,60 \cdot 4 \cdot (5\text{cm}) \cdot (10\text{cm})^3}$ $E_f = 56700 \text{ Kgf/cm}^2$
l= 120 cm	
Ancho= 5 cm	
Altura= 10 cm	
Deformación = 1,6 cm	

Elaboración: Autores

b. Viga A02

Tabla 15: Cálculo del MOE A02

P= 1190,2 kgf	$E_f = \frac{(1190,2 \text{ kgf}) \cdot (120\text{cm})^3}{1,70 \cdot 4 \cdot (5\text{cm}) \cdot (10\text{cm})^3}$ $E_f = 60490,16 \text{ Kgf/cm}^2$
l= 120 cm	
Ancho= 5 cm	
Altura= 10 cm	
Deformación = 1,7 cm	

Elaboración: Autores

c. Viga A03

Tabla 16: Cálculo del MOE A03

P= 900 kgf	$E_f = \frac{(900 \text{ kgf}) \cdot (120\text{cm})^3}{1,12 \cdot 4 \cdot (5\text{cm}) \cdot (10\text{cm})^3}$ $E_f = 69428,57 \text{ Kgf/cm}^2$
l= 120 cm	
Ancho= 5 cm	
Altura= 10 cm	
Deformación = 1,12	

Elaboración: Autores

d. Viga A04

Tabla 17: Cálculo del MOE A04

P= 1000 Kgf	$E_f = \frac{(1000 \text{ kgf}) \cdot (120\text{cm})^3}{1,68 \cdot 4 \cdot (5\text{cm}) \cdot (10\text{cm})^3}$ $E_f = 51438,85 \text{ Kgf/cm}^2$
l= 120 cm	
Ancho= 5 cm	
Altura= 10 cm	
Deformación = 1,68 cm	

Elaboración: Autores

3.1.4.3. Cálculo del Módulo de Rotura (MOR)

Para obtener el módulo de rotura, se aplica la siguiente ecuación:

$$MOR_f = \frac{3P_m \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (16)$$

Donde:

- MOR_f =Módulo de Rotura
- P_m = Carga Máxima
- L = Longitud entre apoyos
- b = Base
- h = Peralte

a. Viga A01

Tabla 18: Cálculo del MOR A01

$P= 1119,94 \text{ Kg}$	$MOR_f = \frac{3(1119,94 \text{ Kg}) \cdot 120\text{cm}}{2(5\text{cm}) \cdot (10\text{cm})^2} = 403,17 \text{ kgf/cm}^2$
$l= 120 \text{ cm}$	
$Ancho= 5 \text{ cm}$	
$Altura= 10 \text{ cm}$	

Elaboración: Autores

b. Viga A02

Tabla 19: Cálculo del MOR A02

$P= 1284,19\text{kg}$	$MOR_f = \frac{3(1284,19 \text{ Kg}) \cdot 120\text{cm}}{2(5\text{cm}) \cdot (10\text{cm})^2} = 462,30 \text{ kgf/cm}^2$
$l= 120 \text{ cm}$	
$Ancho= 5 \text{ cm}$	
$Altura= 10 \text{ cm}$	

Elaboración: Autores

c. Viga A03

Tabla 20: Cálculo del MOR A03

$P= 1037,41 \text{ kg}$	$MOR_f = \frac{3(1037,41 \text{ Kg}) \cdot 120\text{cm}}{2(5\text{cm}) \cdot (10\text{cm})^2} = 373,46 \text{ kgf/cm}^2$
$l= 120 \text{ cm}$	
$Ancho= 5 \text{ cm}$	
$Altura= 10 \text{ cm}$	

Elaboración: Autores

d. Viga A04

Tabla 21: Cálculo del MOR A04

$P= 1113,13\text{Kg}$	$MOR_f = \frac{3(1113,13 \text{ Kg}) \cdot 120\text{cm}}{2(5\text{cm}) \cdot (10\text{cm})^2} = 400,72 \text{ kgf/cm}^2$
$l= 120 \text{ cm}$	
$Ancho= 5 \text{ cm}$	
$Altura= 10 \text{ cm}$	

Elaboración: Autores

3.1.4.4. Cálculo del esfuerzo admisible

El esfuerzo admisible es el valor máximo de esfuerzo al que un material puede experimentar sin mostrar fallas o deformaciones permanentes. De acuerdo con la información derivada de los cálculos, es posible calcular los esfuerzos admisibles que son el producto de factores de reducción (Tabla 22) para realizar el predimensionamiento de vigas. Para ello se considera al esfuerzo último como el MOR en flexión estática (JUNAC, 1984). Este enfoque permite dimensionar adecuadamente las vigas, asegurando su rendimiento estructural dentro de los límites de seguridad establecidos.

$$\text{Esfuerzo admisible} = \frac{F.C \times F.T}{F.S \times F.D.C} * \text{Esfuerzo último} \quad (17)$$

Donde:

- F.C= Factor de reducción por calidad
- F.T= Factor de reducción por tamaño
- F.S= Factor de servicio y seguridad
- F.D.C= Factor de duración de carga

Tabla 22: Factores de reducción

Factor	Flexión
F.C.	0,80
F.T.	0,90
F.S.	2,00
F.D.C.	1,12

Fuente: JUNAC,1984

Elaboración: Autores

Según la Tabla 23, los esfuerzos admisibles de cada probeta y su promedio se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 23: Esfuerzos admisibles

COD.	MOR Kg/cm²	ESFUERZO ADMISIBLE Kg/cm²
A01	403,17 kg/cm ²	129,59 kg/cm ²
A02	462,30 kg/cm ²	148,59 kg/cm ²
A03	373,46 kg/cm ²	120,04 kg/cm ²
A04	400,72 kg/cm ²	128,80 kg/cm ²
PROMEDIO	409,91 kg/cm ²	131,756 kg/cm ²

Elaboración: Autores









Si bien el esfuerzo admisible promedio en flexión estática para maderas del grupo C como el Pino según la JUNAC (1984) es de 110 kg/cm². Sin embargo, el promedio obtenido de las probetas ensayadas es de 131,75kg/cm² lo que indica que la madera tiene una resistencia superior a la esperada. Este resultado es relevante ya que refleja la capacidad del material para soportar cargas mayores las estimadas, lo cual es un factor positivo en términos de seguridad y eficiencia.

3.1.4.5. Cálculo del peso específico

Tras finalizar los ensayos, se realizaron dos cortes a 10cm de los extremos de las vigas, donde se obtiene nuevas probetas de 10cm x 10cm x 5cm. Esta metodología se implementó para garantizar una mayor precisión en los resultados.









Con estas nuevas probetas, se extrajo el contenido de humedad y el peso específico que tuvo la viga durante el ensayo, colocándolas en un horno a 110,01 °C durante 24 horas hasta que se haya secado por completo y obtener nuevos datos (COPANT 464, 1972). El uso de un horno a temperatura constante para el secado de las probetas minimiza los errores derivados de variaciones en el proceso de secado, lo que garantiza la precisión de los datos obtenidos.

Tabla 24: Probetas antes del secado

			
Viga A01	Viga A01.1	Viga A02	Viga A02.1
			
Viga A03	Viga A03.1	Viga A04	Viga A04.1

Elaboración: Autores

Tabla 25: Probetas después del secado

			
Viga A01	Viga A01.1	Viga A02	Viga A02.1
			
Viga A03	Viga A03.1	Viga A04	Viga A04.1

Elaboración: Autores

Tabla 26: Datos de Densidad húmeda y seca

PROBETAS	DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm ³)			DENSIDAD SECA (gr/cm ³)		
	P (gr)	Vol (cm ³)	Total	P (gr)	Vol (cm ³)	Total
A01	363,8	477,80	0,76	204,8	477,80	0,43
A01.1	353	472,36	0,75	207,2	472,36	0,44
A02	349,5	479,22	0,73	203,7	479,22	0,43
A02.1	299,3	482,53	0,62	210,2	482,53	0,44
A03	318,3	482,65	0,66	195,9	482,65	0,41
A03.1	360,9	470,40	0,77	190,6	470,40	0,41
A04	377,8	480,20	0,79	192,2	480,20	0,40
A04.1	343	487,48	0,70	186,9	487,48	0,38
PROMEDIO			0,72			0,42

Elaboración: Autores

3.1.4.6. Cálculo del contenido de Humedad

El porcentaje del contenido de humedad de la madera tiene un rango del 12% al 15% para su uso en la construcción. Por esta razón, los ensayos de madera se realizan con madera verde (recién cortada), ya que al tener un alto porcentaje de humedad, se hace el análisis para determinar los esfuerzos críticos de los elementos (NEC SE MD, 2015); (COPANT, 1972). Este enfoque asegura que los cálculos estructurales tomen en cuenta los esfuerzos máximos que la madera podría experimentar durante su vida útil, considerando condiciones más extremas y ayudando en la optimización del diseño para mitigar fallos.

Para el cálculo de humedad de las vigas, se hace uso de la siguiente fórmula:

$$CH = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 \quad (18)$$

Donde:

- CH = Contenido de Humedad
- m_1 = Masa inicial
- m_2 = Masa Anhidrida

De las probetas de 10cmx10cmx5cm utilizadas en el apartado del cálculo del peso específico, son las mismas para obtener el porcentaje de humedad, en donde A02.1 (Tabla 27) es el que tiene bajo contenido de humedad con respecto a los demás, lo que significa que las otras probetas están en un estado más “verde”. En este contexto, un alto porcentaje de humedad indica que el material es muy vulnerable a deformaciones previo a su colapso. Para la determinación de los esfuerzos admisibles la información mencionada anteriormente es clave para poder considerar los esfuerzos más críticos.

No obstante, la madera seca no se consigue fácilmente en el mercado debido a que la mayoría realizan los cortes bajo necesidades de los clientes.

Tabla 27: Contenido de humedad

PROBETAS	CONTENIDO DE HUMEDAD		
	m_1 (gr)	m_2 (gr)	CH %
A01	363,8	204,8	77,64%
A01.1	353	207,2	70,37%
A02	349,5	203,7	71,58%
A02.1	299,3	210,2	42,39%
A03	318,3	195,9	62,48%
A03.1	360,9	190,6	89,35%
A04	377,8	192,2	96,57%
A04.1	343	186,9	83,52%
PROMEDIO	345,7	198,94	73,77%

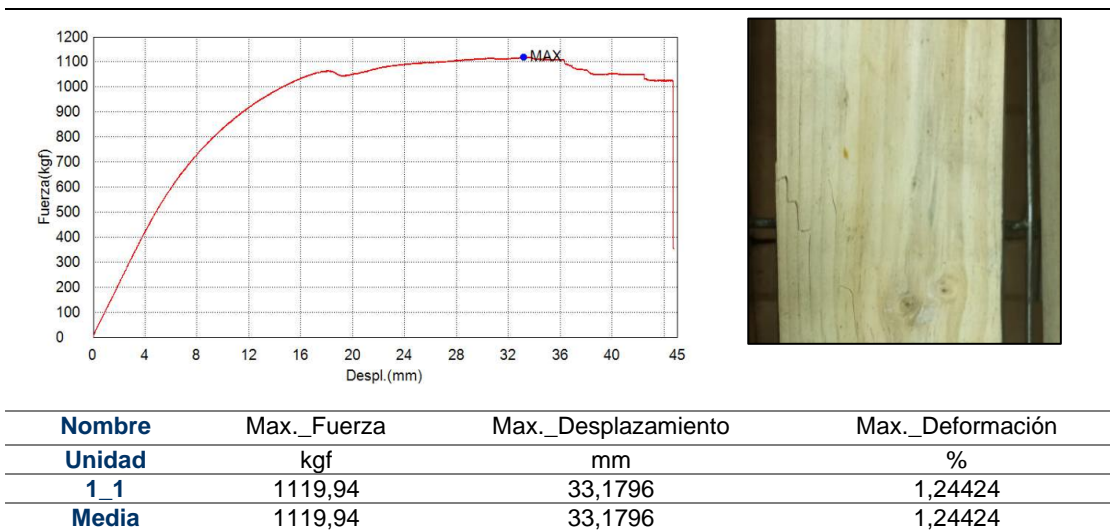
Elaboración: Autores

3.2.5. Análisis de resultados

Con los parámetros obtenidos, con respecto al comportamiento y deformación que tuvo cada muestra (Tabla 28, 29, 30 y 31) representan diferencias significativas en la respuesta de las muestras ante las cargas aplicadas. La variabilidad en los valores registrados se ve afectada por el módulo de elasticidad y la capacidad del material para disipar esfuerzos sin comprometer su estabilidad estructural.

a. Viga A01

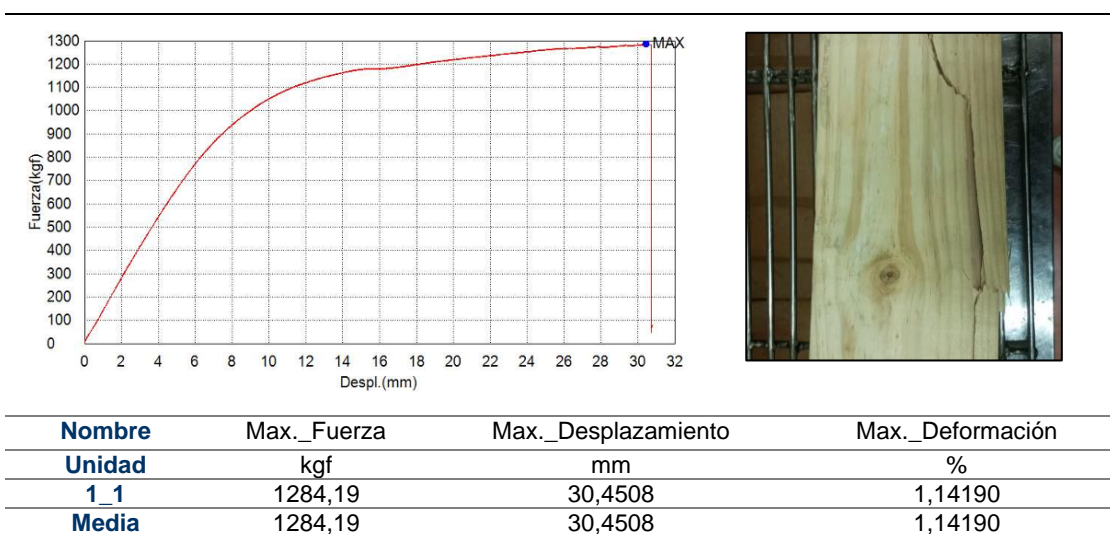
Tabla 28: Gráfico Fuerza – Deformación de la viga A01



Elaboración: Autores

b. Viga A02

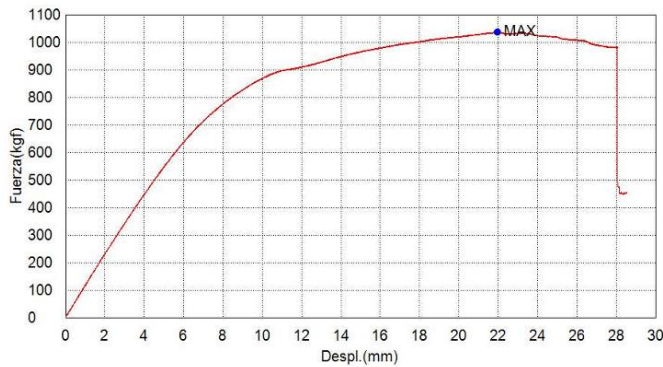
Tabla 29: Gráfico Fuerza – Deformación de la viga A02



Elaboración: Autores

c. Viga A03

Tabla 30: Gráfico Fuerza – Deformación de la viga A03

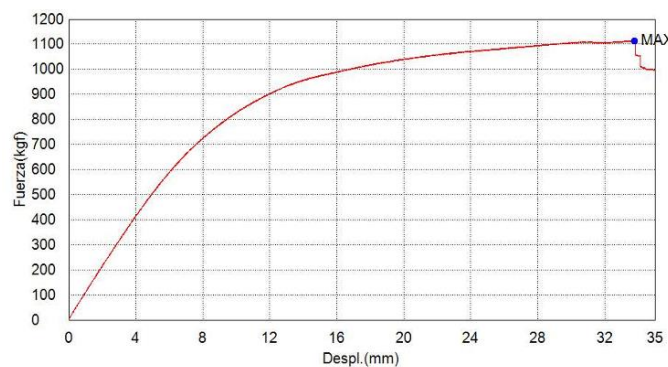


Nombre	Max._Fuerza	Max._Desplazamiento	Max._Deformación
Unidad	kgf	mm	%
1_1	1037,41	21,9549	0,82331
Media	1037,41	21,9549	0,82331

Elaboración: Autores

d. Viga A04

Tabla 31: Gráfico Fuerza – Deformación de la viga A04



Nombre	Max._Fuerza	Max._Desplazamiento	Max._Deformación
Unidad	kgf	mm	%
1_1	1113,13	33,7891	1,26709
Media	1113,13	33,7891	1,26709

Elaboración: Autores

Por lo tanto, en la Figura 20, se presenta la relación entre probetas con respecto a su máxima deformación. En este sentido, la probeta que posee un mayor desplazamiento es la A04 con 33,78 mm, mientras que A03 sufrió una deformación mínima de 21,95 mm.

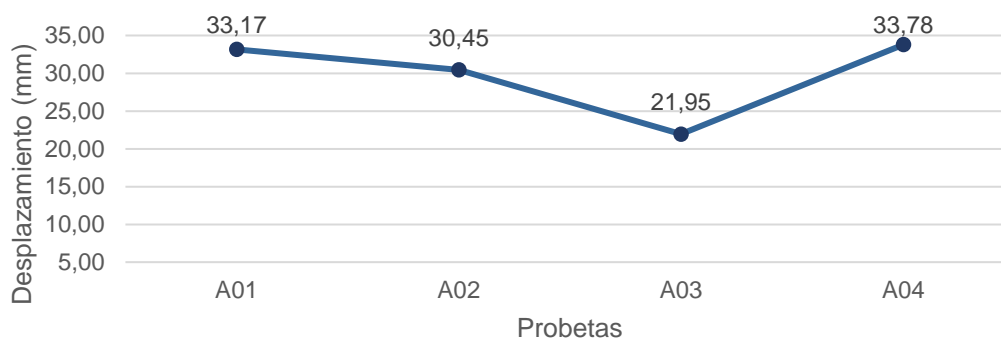


Figura 19: Deformación de probetas

Elaboración: Autores

A continuación, la Tabla 32 presenta los datos sobre las propiedades mecánicas y físicas de diferentes muestras del material, identificadas por los códigos A01, A02, A03 y A04. Entre los parámetros analizados se encuentran el esfuerzo límite proporcional (ELP), el módulo de elasticidad (MOEf), el módulo de ruptura (MORf), el contenido de humedad (CH), los pesos inicial y final (PE1 y PE2). Estos valores permiten evaluar la resistencia y estabilidad de cada muestra.

Tabla 32: Resultados de los ensayos a flexión

COD.	ELP	MOEf	MORf	CH	PE 1 (Peso inicial)	PE 2 (Peso final)
A01	378,00 Kg/cm ²	56700 Kgf/cm ²	403,17 kgf/cm ²	77,64%	0,76 gr/cm ³	0,43 gr/cm ³
A02	428,47 Kg/cm ²	60490,16 Kgf/cm ²	462,30 kgf/cm ²	71,58%	0,73 gr/cm ³	0,43 gr/cm ³
A03	324,00 Kg/cm ²	69428,57 Kgf/cm ²	373,46 kgf/cm ²	62,48%	0,66 gr/cm ³	0,41 gr/cm ³
A04	360,00 Kg/cm ²	51438,85 Kgf/cm ²	400,72 kgf/cm ²	96,57%	0,79 gr/cm ³	0,40 gr/cm ³
PROMEDIO	373,61 Kg/cm ²	59514,35 Kgf/cm ²	409,91 kgf/cm ²	73,77%	0,72 gr/cm ³	0,42 gr/cm ³

Elaboración: Autores

El esfuerzo límite proporcional (ELP) varía significativamente entre las muestras, en el cual, A01 y 02 presentan un valor más alto (212,14 Kg/cm²), lo que indica que puede soportar mayores esfuerzos antes de la deformación. En contraste, A03 muestra el menor valor (192,85 Kg/cm²), lo que sugiere menor resistencia en comparación con las demás.

En cuanto al módulo de ruptura (MORf) refleja la resistencia máxima antes de la fractura. A02 muestra el mejor desempeño con 462,30 kgf/cm², mientras que A03 tiene el menor valor (373,46 kgf/cm²), lo que indica que es más propenso a romperse bajo carga.

El módulo de elasticidad (MOEf), A03 destaca con el valor más alto (69428,57 Kgf/cm²) lo que implica mayor rigidez y menor deformabilidad. Por otro lado, A04 posee el módulo más bajo (51438,85 Kgf/cm²), demostrando que es la probeta con menor capacidad de resistir deformaciones elásticas.

Este comportamiento también se encuentra relacionado con el contenido de humedad (CH), un factor clave que influye en la resistencia de los materiales. A04 tiene el mayor contenido de humedad (96,57%), lo que puede afectar negativamente sus propiedades mecánicas. En cambio, A02 presenta el menor porcentaje (71,58%), lo que sugiere una mayor estabilidad y menor susceptibilidad a cambios en sus características estructurales.

Es importante acotar que A02 a pesar de ser el menor de las otras probetas, el contenido de humedad sigue siendo elevado, el cual puede influir en la resistencia a la flexión, ya que la madera con un alto contenido de humedad es más susceptible a deformaciones y a la pérdida de rigidez.

Además, es relevante destacar que los ensayos se realizaron con madera verde, el estado más vulnerable de la madera, este enfoque permite evaluar las propiedades mecánicas de la madera en sus condiciones más críticas, garantizando resultados que reflejan el rendimiento de la madera en su estado recién cortado, sin los efectos derivados del secado.

La variación en el peso inicial y final de cada muestra evidencian la pérdida de humedad. En el que A04 sufre la mayor reducción de peso (de 0,79 a 0,40 gr/cm³), esto refleja una mayor cantidad de agua evaporada. Referente a la muestra A03, presenta una menor variación de su peso, lo que sugiere que son más estables y menos afectados por la pérdida de humedad.

En resumen, en términos de resistencia A02 es la muestra más óptima, ya que tiene el mayor ELP y MORf, además de un MOEf elevado. La muestra A03 es la más desfavorable en términos de desempeño mecánico, presenta el menor ELP, lo que indica que comienza a deformarse antes que las otras muestras. A pesar de que tiene un MOE de 69428,57 kgf/cm², su resistencia a la flexión es la más baja, lo que significa que soporta menos carga antes de romperse.

3.2.6. Comparación de datos experimentales propios y datos extraídos de investigaciones previas

Los resultados comparativos entre la investigación previa y los ensayos del CIITT muestran variaciones significativas en las propiedades mecánicas del material, lo que puede estar influenciado por el tamaño de las probetas utilizadas en cada estudio. En la investigación de Cada, Neira y Quesada (2023), se usaron probetas de 5x5x20 cm, mientras que en los ensayos del CIITT se emplearon probetas a medida real de 10x5x140 cm, lo que permite una evaluación más representativa del comportamiento estructural del material en condiciones reales.

En la Tabla 33, el esfuerzo admisible en los ensayos del CIITT alcanzó 131,75 kgf/cm², en comparación con los 105 kgf/cm² de la investigación previa, lo que sugiere una menor capacidad para soportar cargas sin deformaciones permanentes. Por otro lado, el MOE (Módulo de Elasticidad) aumentó considerablemente, pasando de 52,041,03 kgf/cm² a 59514,35 kgf/cm², evidenciando una mayor rigidez.

Tabla 33: Resultados datos experimentales obtenidos y datos extraídos de investigaciones previas

	Esfuerzo admisible (kgf/cm²)	MOE (kgf/cm²)
Investigación previa (Cada, Neira y Quesada)	105 kgf/cm ²	52041,03 kgf/cm ²
Ensayos CIITT (Datos propios)	131,75 kgf/cm ²	59514,35 kgf/cm ²
NEC SE MD	100 kgf/cm ²	55000 kgf/cm ²

Fuente: Cada, Neira y Quesada, 2023.

Elaboración: Autores

Estas diferencias pueden deberse no solo a la composición del material y las condiciones de prueba, sino también a la variación en el tamaño de las probetas, ya que las muestras más pequeñas pueden presentar mayor homogeneidad y resistencia aparente, mientras que las de tamaño real reflejan mejor el comportamiento estructural en aplicaciones prácticas.

Además, se puede observar que los valores establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción – NEC SE MD se mantienen en un rango más conservador. La NEC fija un esfuerzo admisible de 100 kgf/cm² y un MOE de 55 000 kgf/cm², valores que se sitúan por debajo de los obtenidos en los ensayos experimentales, a pesar de que estos últimos indican una mayor capacidad del material tanto en resistencia como en rigidez. Esta diferencia refleja una postura normativa orientada a la seguridad estructural, adoptando parámetros que consideran variaciones naturales del material y factores de seguridad adicionales, con el fin de asegurar un comportamiento confiable y predecible de la madera en aplicaciones estructurales.

3.2. INGRESO DE DATOS AL PROGRAMA ETABS

En este componente de modelación numérica se utilizaron dos métodos de análisis para determinar el comportamiento de la viga bajo una carga, estos datos se utilizaron para calibrar y validar los modelos numéricos, asegurando su correlación con el comportamiento real.

Si bien la madera no es considerada un material isotrópico, la NEC SE MD (2015) menciona que el estudio y diseño de estructuras de madera deben fundamentarse en los principios esenciales de la mecánica estructural, empleando enfoques convencionales de análisis elástico lineal. Los esfuerzos inducidos por las cargas aplicadas se determinan considerando al material como homogéneo, isotrópico y con un comportamiento lineal, conforme a las hipótesis clásicas de la teoría de vigas. En consecuencia, ETABS al tener dos alternativas para el ingreso de datos, se lo realizará tanto de manera isotrópica como ortotrópica permitiendo la comparación entre resultados.

3.2.1. Datos obtenidos de los ensayos a flexión

Previo al ingreso de datos para el material con propiedades isotrópicas, se debe considerar los datos necesarios como:

Tabla 34: Datos necesarios - Isotrópico

CÓD.	Carga Kgf	Densidad Básica gr/cm ³	MOE Kgf/cm ²	Módulo de Corte Kgf/cm ²	Coefficiente de Poissón	Expansión Térmica °C
A01	1050					
A01.1	525	0,76	56700	21396,22	0,325	0,000003
A01.2	262,5					
A02	1190,2					
A02.1	595,1	0,73	60490,16	22826,47	0,325	0,000003
A02.2	297,55					
A03	900					
A03.1	450	0,66	69428,57	26199,46	0,325	0,000003
A03.2	225					
A04	1000					
A04.1	500	0,79	51438,85	19410,88	0,325	0,000003
A04.2	250					

Elaboración: Autores

Los valores presentados (Tabla 34) corresponden a los valores obtenidos a partir de las cuatro probetas ensayadas. En este contexto, el módulo de corte es el resultado del módulo de elasticidad y el módulo de Poissón (Ecuación 4). En cuanto al coeficiente de Poissón, junto con el coeficiente de expansión térmica de la madera, se emplean valores que oscilan entre 0,325 y 0,40, dependiendo de la densidad (0.5 gr/cm³), tal como se establece en la NEC SE MD (2015).

Para garantizar una mayor precisión en la obtención de datos, al igual que su comparación con los modelos digitales, se consideraron tres niveles de carga dentro del límite de proporcionalidad para cada probeta (Ver Tabla 34) : la carga al límite de proporcionalidad (P_p) en A01, A02, A03 y A04, la carga correspondiente a $P_p/2$ para A01.1, A02.1, A03.1, A04.1, por último, un cuarto de la carga de límite de proporcionalidad ($P_p/4$) asignada a A01.2, A02.2, A03.2 y A04.2, lo que facilita un análisis más detallado al permitir la identificación de discrepancias entre los valores experimentales con el modelado digital.

La elección de trabajar dentro del límite de proporcionalidad en lugar de la carga máxima se debe a que, dentro de este límite, el comportamiento del material es lineal, lo que permite una relación directa y predecible entre la carga aplicada, así como la deformación. Facilitando la comparación además de la validación de los modelos digitales. En cambio, al alcanzar la carga máxima, el comportamiento del material se vuelve no lineal, por lo tanto, es impredecible, lo que genera incertidumbre en los resultados, complicando la interpretación y el ajuste de los modelos digitales.

3.2.1.1. Propiedades Isotrópicas

La definición de las propiedades del material como isotrópico en el modelo permite simplificar el proceso de ingreso de datos y el análisis estructural. No obstante, esta simplificación puede comprometer la precisión de los resultados, dado que se omite una caracterización detallada de las propiedades ortotrópicas que influyen en el comportamiento estructural.

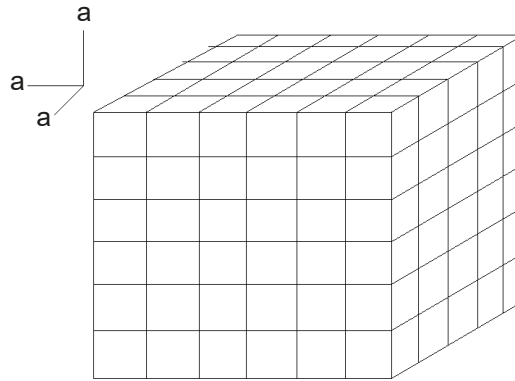


Figura 20: Propiedades Isotrópicas

Elaboración: Autores

a. Proceso

Previo al ingreso de datos se configuró las unidades en las que se va a trabajar (Figura 22) en base a las normativas establecidas como: Metric SI, AISC y el ACI.

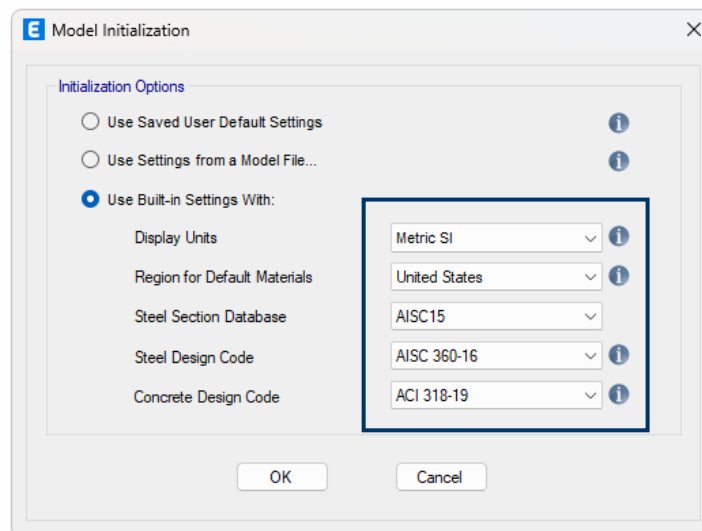


Figura 21: Cambio de unidades

Elaboración: Autores

Una vez transformadas las unidades, se selecciona una plantilla en blanco debido a que se va a modelar únicamente vigas, por lo que es necesario escoger una malla para facilitar el modelado.

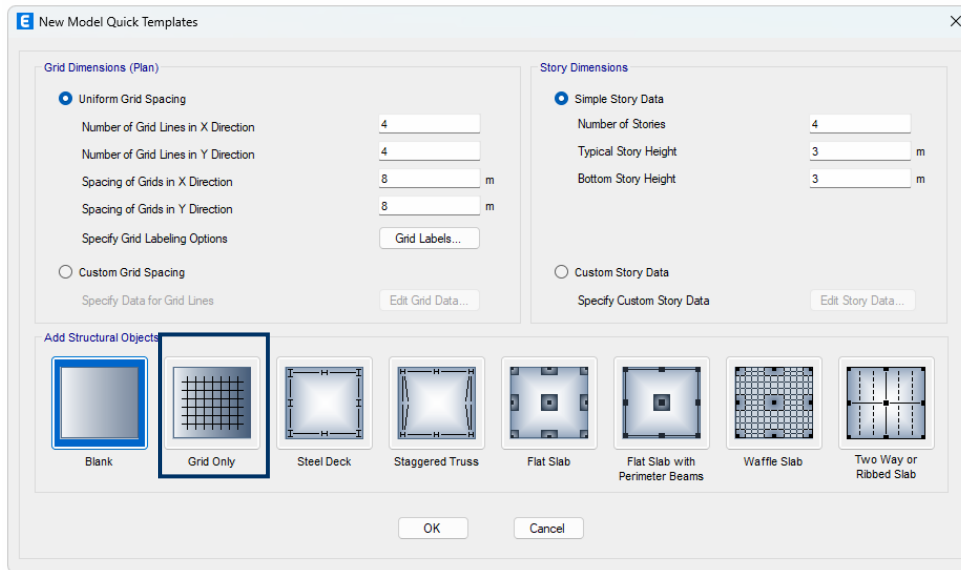


Figura 22: Cambio de grillas

Elaboración: Autores

Una vez configurada la plantilla a utilizar, en la barra superior izquierda se selecciona la pestaña “Define” haciendo clic en “Material Properties”.

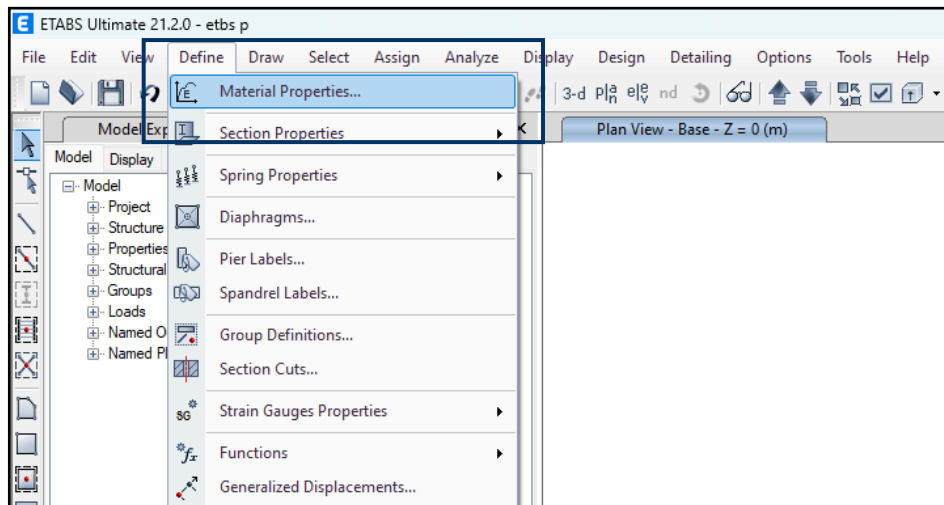


Figura 23: Definición de material

Elaboración: Autores

En la ventana “Define Materials”, se observa que en los materiales preestablecidos no existe una opción para la madera, por lo que, se añade un nuevo material haciendo clic en “Add new material”.

Por ende, se procede a configurar como “User” en “Region” y “Other” en “Material Type”.

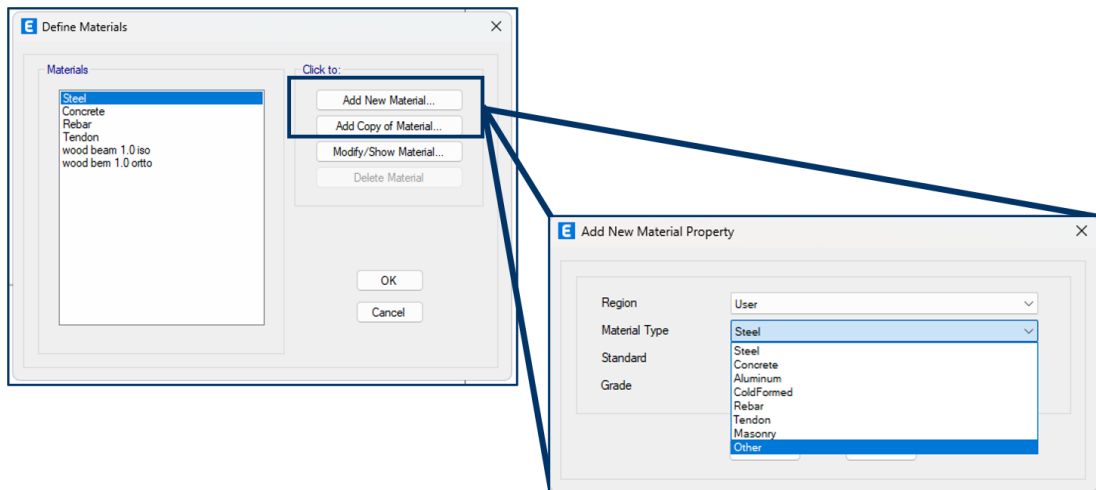


Figura 24: Selección del nuevo material

Elaboración: Autores

Por último, se configura el material como isotrópico. Posteriormente se define un nombre para el material correspondiente y los datos requeridos para este campo, de acuerdo a la Tabla 34.

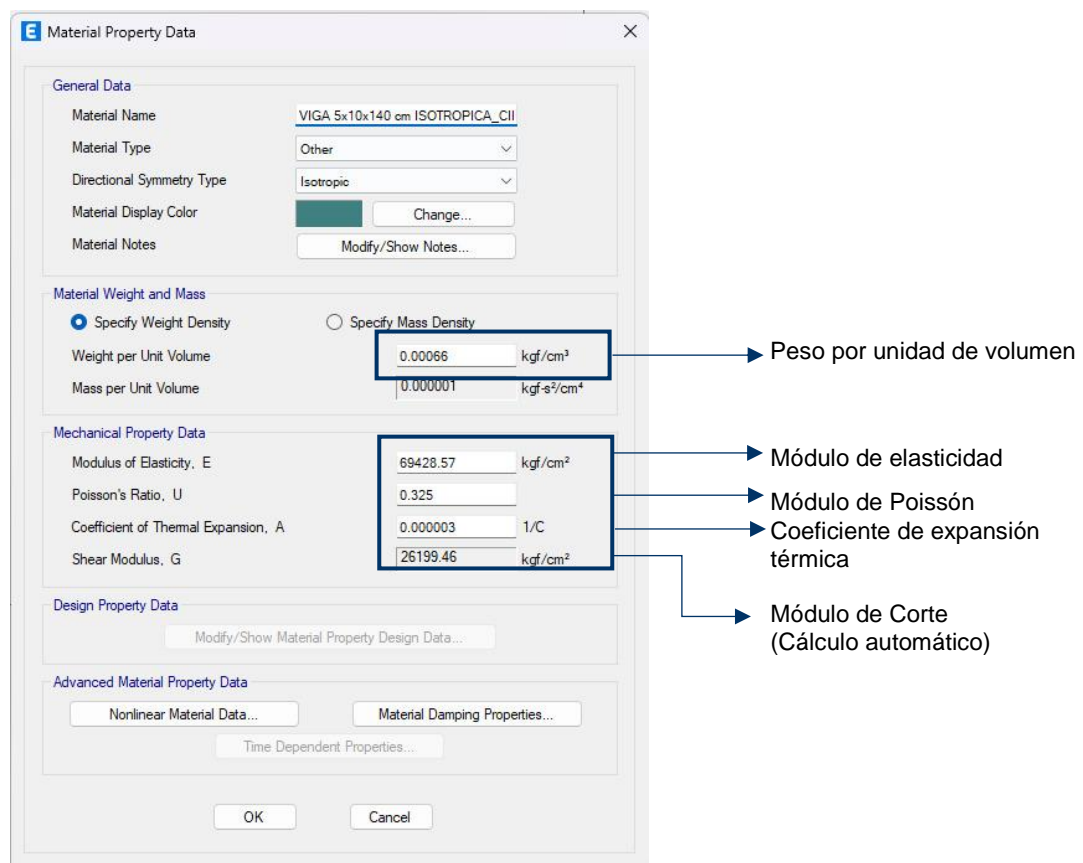


Figura 25: Ingreso de datos

Elaboración: Autores

A continuación, se lleva a cabo el mismo proceso para el ingreso de los datos faltantes de la Tabla 34.

3.2.1.2. Propiedades Ortotrópicas

El uso de materiales ortotrópicos en ETABS, a diferencia de los materiales isotrópicos, requiere una definición más detallada de sus propiedades mecánicas debido a la variabilidad de estas en diferentes direcciones del material (CSI, 2019). Pese a ello, la madera puede considerarse un material homogéneo lo que permite considerar un solo valor para cada módulo dentro del ámbito ingenieril (NEC SE MD, 2015). Este enfoque simplificado contribuye a la agilización del análisis estructural mejorando la eficiencia en el proceso de diseño. No obstante, es importante considerar que en aplicaciones que requieren una alta precisión, la variabilidad direccional inherente a la madera podría afectar el rendimiento estructural.

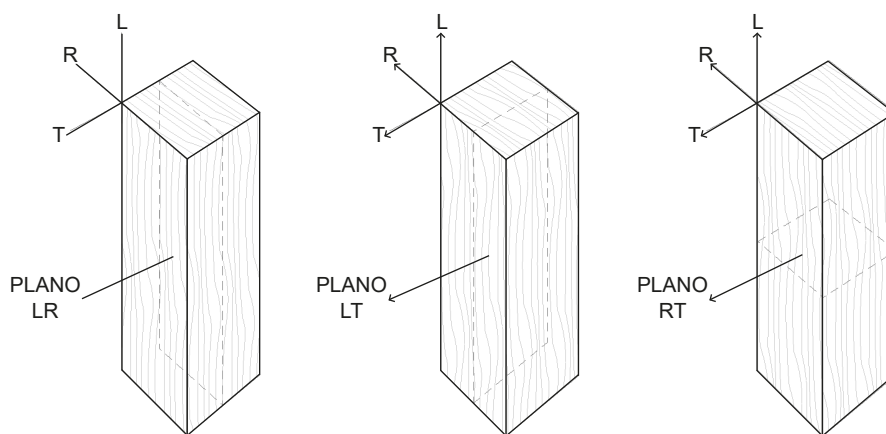


Figura 26: Material ortotrópico en sus tres planos

Elaboración: Autores

Aunque este enfoque aumenta la precisión del modelo, también incrementa el tiempo de cálculo y la complejidad del proceso al momento de integrar nuevos datos de un material no registrado anteriormente, ya que implica un manejo más extenso de datos y una mayor cantidad de propiedades a ingresar en el programa. Por este motivo, el uso de materiales ortotrópicos proporciona un análisis más preciso, permitiendo evaluar el desempeño estructural del material bajo condiciones de carga más realistas.

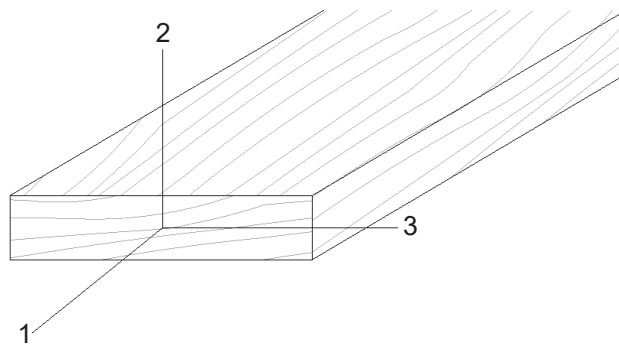


Figura 27: Material Ortotrópico

Elaboración: Autores

En ETABS, para ingresar datos se necesitan el módulo de elasticidad, al igual que el módulo de corte en sus tres direcciones (E1, E2, E3, G12, G13, G23) al igual que el coeficiente de Poisson (U12, U13, U23) y el coeficiente de expansión térmica (A1, A2, A3). Cabe recalcar que el módulo de corte (G) se obtiene del módulo de elasticidad y del módulo de Poisson como se menciona en la sección 3.2.1. (Ver Figura 29).

Material Mechanical Property Data

Material Name and Type

Material Name: VIGA 5x10x140 cm

Material Type: Other, Orthotropic

Modulus of Elasticity

E1	69428.85	kgf/cm ²
E2	69428.85	kgf/cm ²
E3	69428.85	kgf/cm ²

Shear Modulus

G12	26199.57	kgf/cm ²
G13	26199.56	kgf/cm ²
G23	26199.56	kgf/cm ²

Coefficient of Thermal Expansion

A1	0.000003	1/C
A2	0.000003	1/C
A3	0.000003	1/C

Poisson's Ratio

U12	0.325
U13	0.325
U23	0.325

OK

Cancel

Módulo de Elasticidad

Módulo de Corte $G = \frac{E}{2(1+r)}$

Coeficiente de Expansión Térmica

Módulo de Poisson

Figura 28: Requerimientos para propiedades ortotrópicas

Elaboración: Autores

Tabla 35: Datos requeridos

CÓD.	Carga Kgf	Densidad Básica gr/cm ³	MOE (E1, E2, E3) Kgf/cm ²	Módulo de Corte (G12,G13,G23) Kgf/cm ²	Coefficiente de Poisson (U12,U13,U23)	Expansión Térmica °C (A1,A2, A3)
A01	1050					
A01.1	525	0,76	56700	21396,22	0,325	0,000003
A01.2	262,5					
A02	1190,2					
A02.1	595,1	0,73	60490,16	22826,47	0,325	0,000003
A02.2	297,55					
A03	900					
A03.1	450	0,66	69428,57	26199,46	0,325	0,000003
A03.2	225					
A04	1000					
A04.1	500	0,79	51438,85	19410,88	0,325	0,000003
A04.2	250					

Elaboración: Autores

El procedimiento de configuración sigue las mismas etapas iniciales del caso anterior (Sección 3.2.1.1.), asegurando la consistencia en los pasos preliminares. Una vez alcanzada la definición de las propiedades, se selecciona la opción “Orthotropic” dentro del campo “Directional Symmetry Type”. Este ajuste habilita la posibilidad de acceder a parámetros avanzados relacionados con las propiedades mecánicas del material.

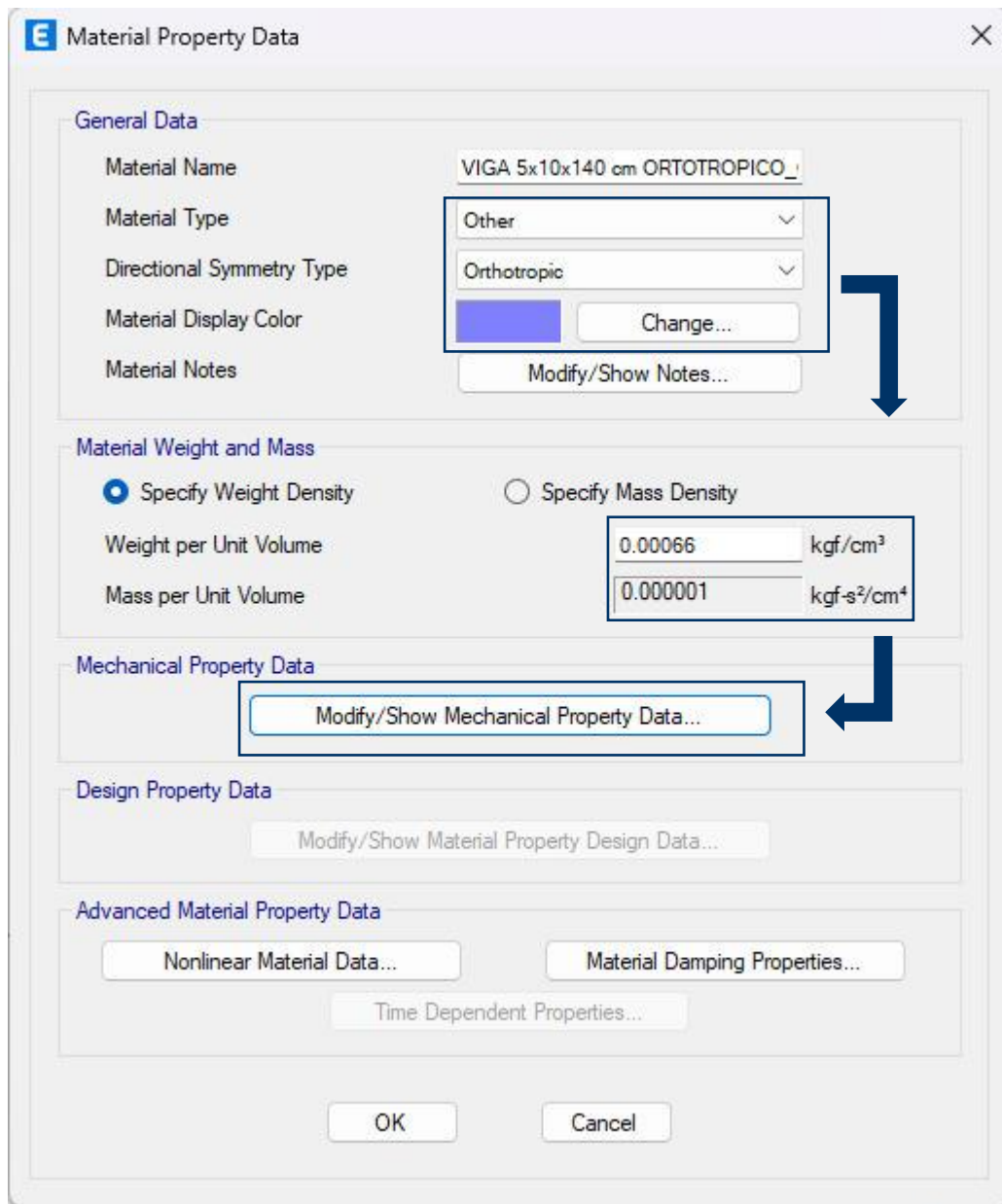


Figura 29: Ingreso de datos - Ortotrópico

Elaboración: Autores

A través del apartado “Modify/Show Mechanical Property Data”, se despliega una ventana (Figura 31), donde se especifican los valores anisotrópicos que caracterizan el comportamiento del material bajo diversas condiciones de carga y orientación estructural, en donde se colocan los valores predeterminados en la Tabla 35.

En caso de no tener G, el programa tiene una calculadora que al presionar SHIFT + ENTER, permite realizar el cálculo requerido.

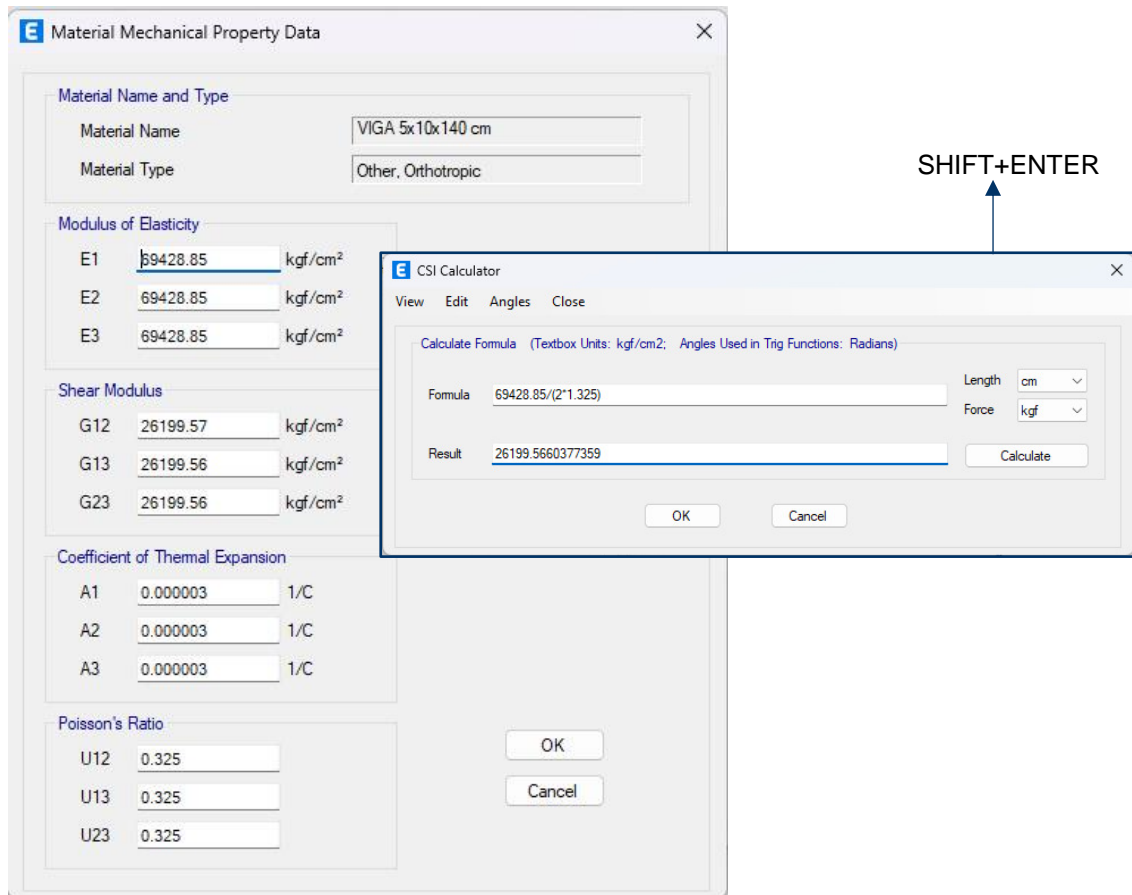


Figura 30: Ingreso de datos - Ortotrópico

Elaboración: Autores

3.1.2. Configuración de sección de la viga

La viga modelada tendrá una sección de 10cm x 5cm en todas las pruebas a realizar en ETABS con el fin de realizar una comparación con los datos obtenidos en el Laboratorio CIITT durante los ensayos a flexión.

a. Proceso

En la barra de herramientas superior, en “Define” se selecciona en “Section Properties” con el propósito de crear una nueva sección (Figura 32). A continuación, se asigna un nombre para facilitar su identificación al momento de modelar la viga.

Luego se configuran los parámetros correspondientes, como el material y las dimensiones.

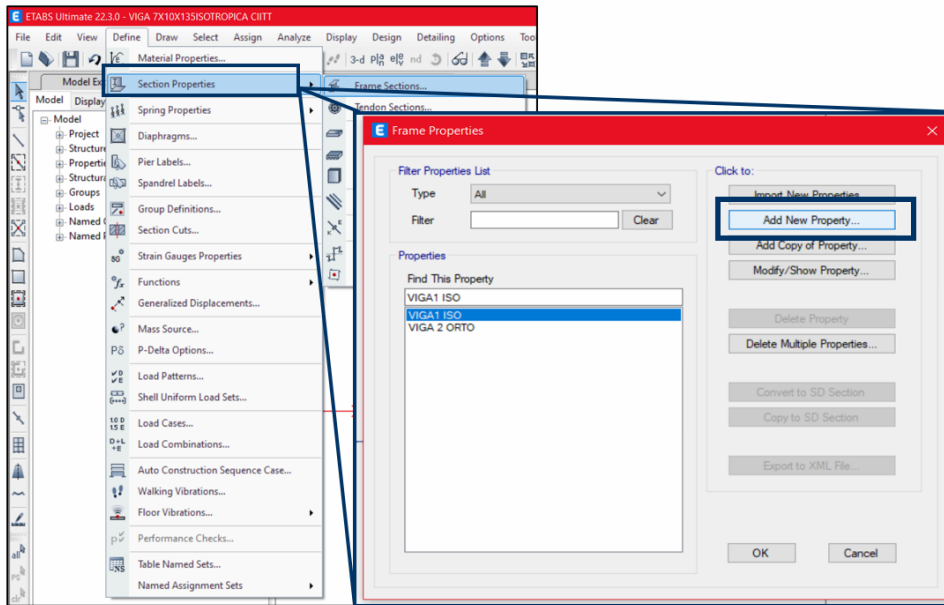


Figura 31: Definición de la sección

Elaboración: Autores

A su vez, en “Base Material” se selecciona el material definido (isotrópico u ortotrópico), así mismo, en “Section Designer” aparece una nueva ventana en la que muestra la sección donde se ingresarán las dimensiones.

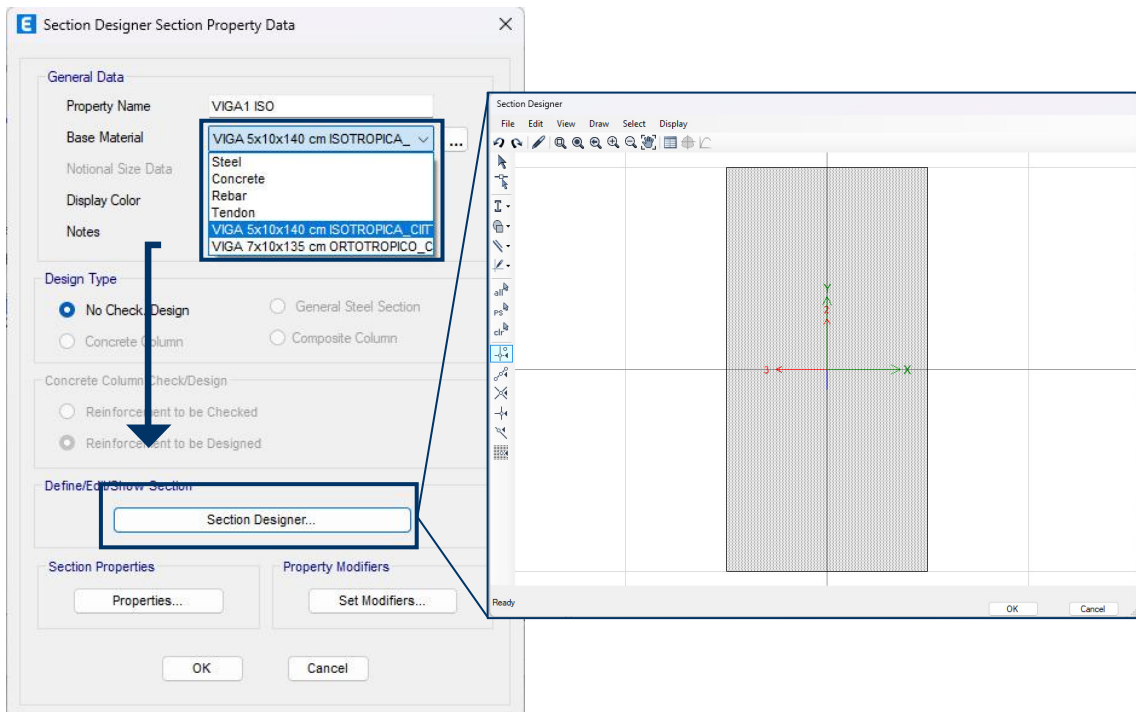


Figura 32: Creación de la nueva propiedad de la sección

Elaboración: Autores

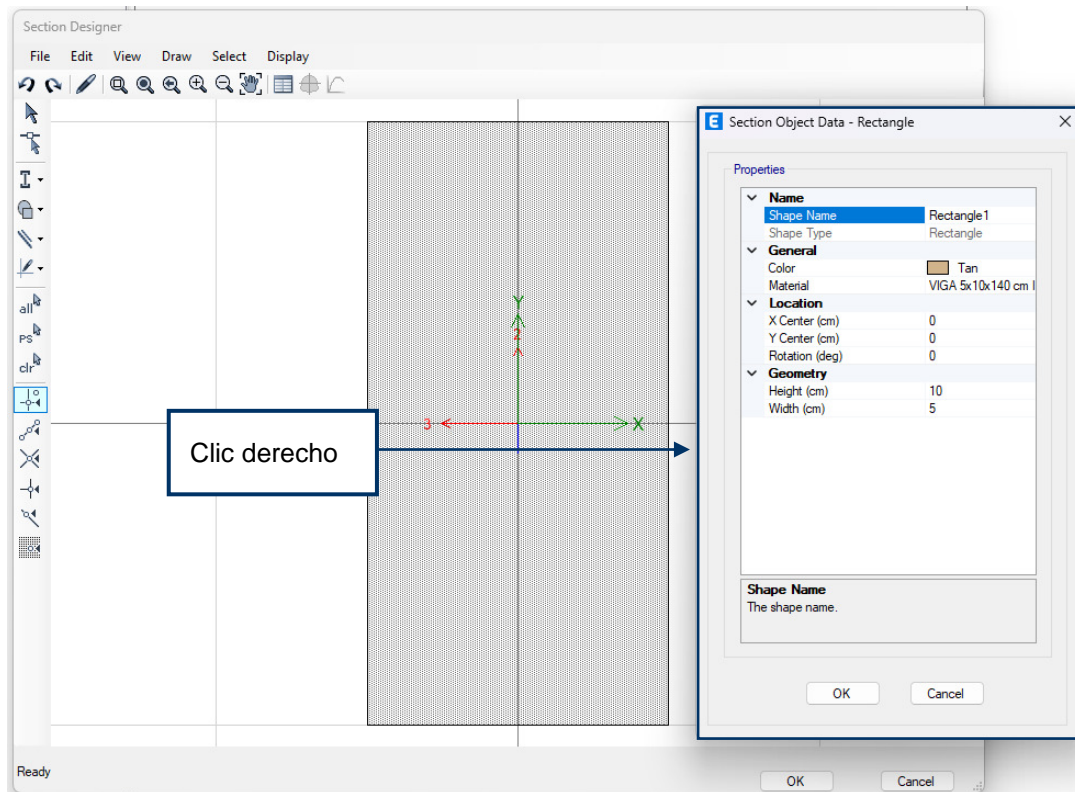


Figura 33: Establecimiento de dimensiones

Elaboración: Autores

3.1.3. Modelado de viga

Para modelar la viga, en la barra lateral izquierda se selecciona “Quick Draw Beams/Columns (Plan, Elev, 3D)”. En la parte inferior de la barra se despliega una tabla de propiedades en el cual se escoge “Property” para definir el material (isotrópico u ortotrópico) dependiendo de lo que se quiere obtener.

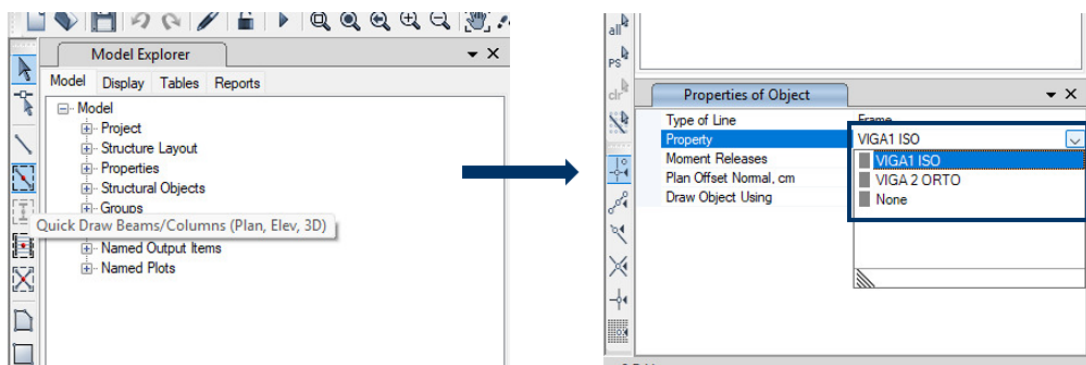


Figura 34: Propiedades que va a tener la viga

Elaboración: Autores

Posteriormente, se modeló la viga simplemente apoyada a 10 cm de sus extremos, siguiendo el procedimiento estándar utilizado en el programa. Este proceso incluye la definición de las propiedades y materiales que están definidos con antelación (Figura 32). Lo que implica la asignación de las cargas, garantizando una correcta representación del comportamiento estructural de la viga para su análisis y evaluación en las etapas posteriores del diseño.



Figura 35: Viga modelada

Elaboración: Autores

3.1.4. Aplicación de Cargas

La viga modelada se sometió a cargas puntuales dependiendo de las propiedades definidas en la sección 3.2.1.1. y 3.2.1.2.

Tabla 36: Cargas a aplicar

CÓDIGO	CARGA TOTAL Kgf	CARGA UNITARIA Kgf
A01	1050	525
A01.1	525	262,5
A01.2	262,5	131,25
A02	1190,2	595,1
A02.1	595,1	297,55
A02.2	297,55	148,77
A03	900	450
A03.1	450	225
A03.2	225	112,5
A04	1000	500
A04.1	500	250
A04.2	250	125

Elaboración: Autores

a. Proceso

En la barra de herramientas superior izquierda, se accede al menú "Assign" se selecciona "Joint Loads" donde se elige la fuerza que se desea aplicar al elemento, que en este caso corresponde a "Force"

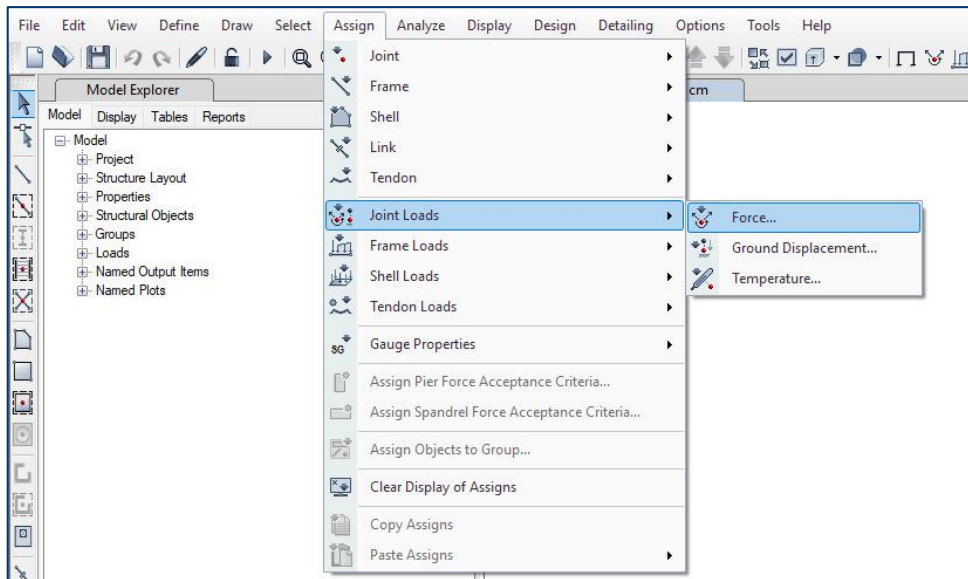


Figura 36: Selección de cargas

Elaboración: Autores

Inmediatamente, se abrirá una ventana en la que se colocará la carga a aplicar. Cabe mencionar que la carga total se divide entre dos, debido a que son dos cargas puntuales (Ver Tabla 36).

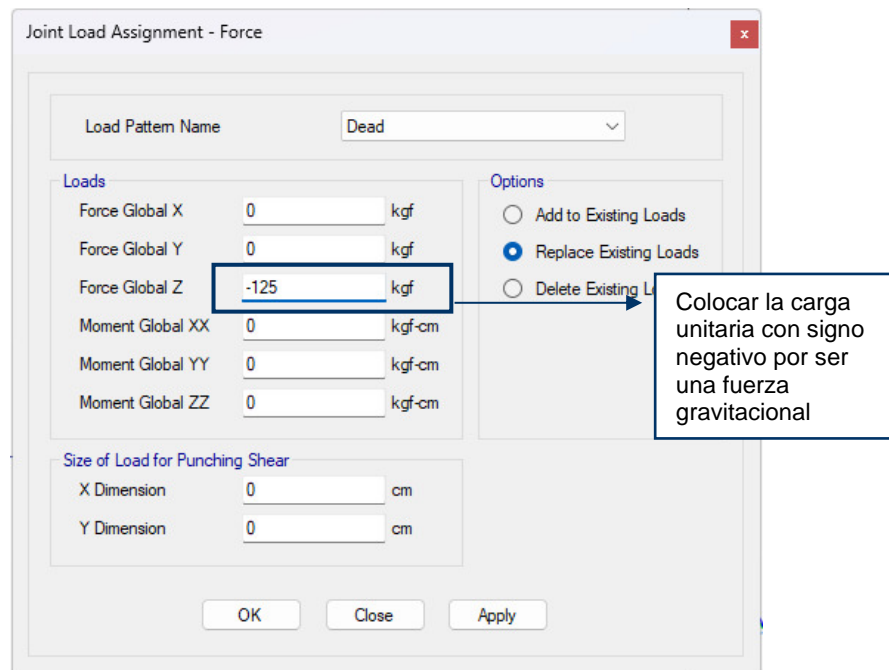


Figura 37: Aplicación de cargas

Elaboración: Autores

Al ser una comparación de resultados entre lo real y lo digital, no se consideran cargas combinadas, sino únicamente carga muerta. Esta corresponde a las cargas obtenidas en el ensayo a flexión, las cuales se detallan en la Tabla 35.

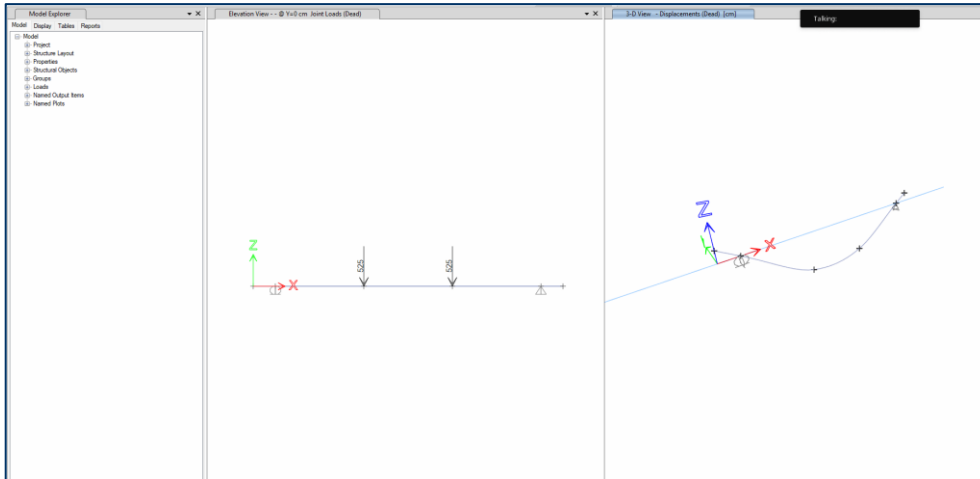


Figura 38: Cargas puntuales

Elaboración: Autores

3.1.5. Resultados obtenidos en ETABS

Tras la incorporación de todos los datos, incluidas las cargas aplicadas, se procede al análisis estructural de la viga para determinar la deflexión experimentada en cada caso.

a. Proceso

En “Analyze”, se activa el “Set Active of Freedom” donde se abre una ventana para seleccionar el plano de análisis (XZ Plane).

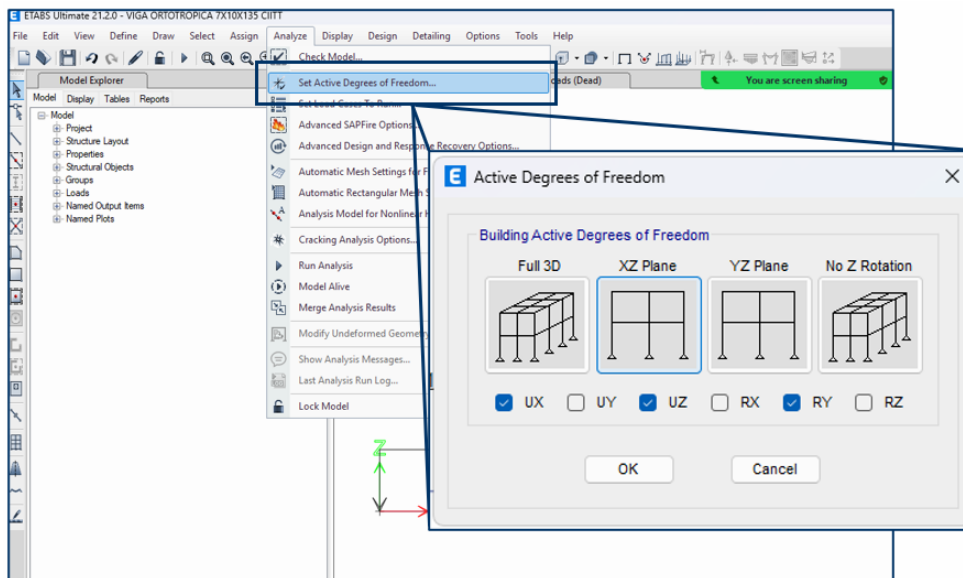


Figura 39: Selección del plano de análisis

Elaboración: Autores

Se activa el “Run Analysis” para que la viga se deforme conforme a la carga aplicada.

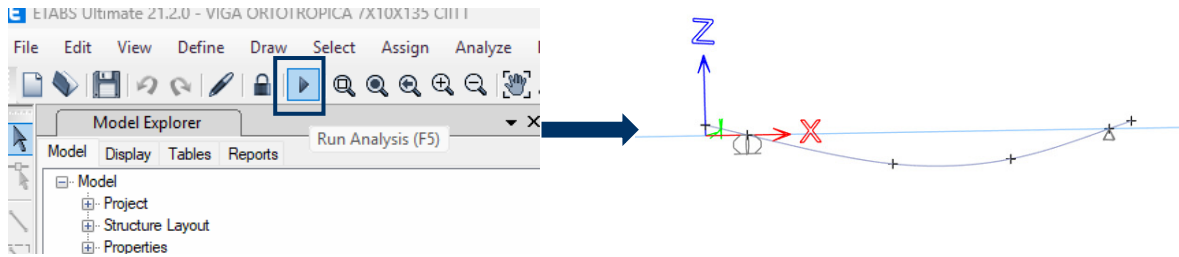


Figura 40: Comportamiento final de la viga

Elaboración: Autores

Luego de que la viga se haya deformado, en y el “Display Frame/Pier/Spandrel/Link Forces” para obtener las deflexiones que se buscan comparar.

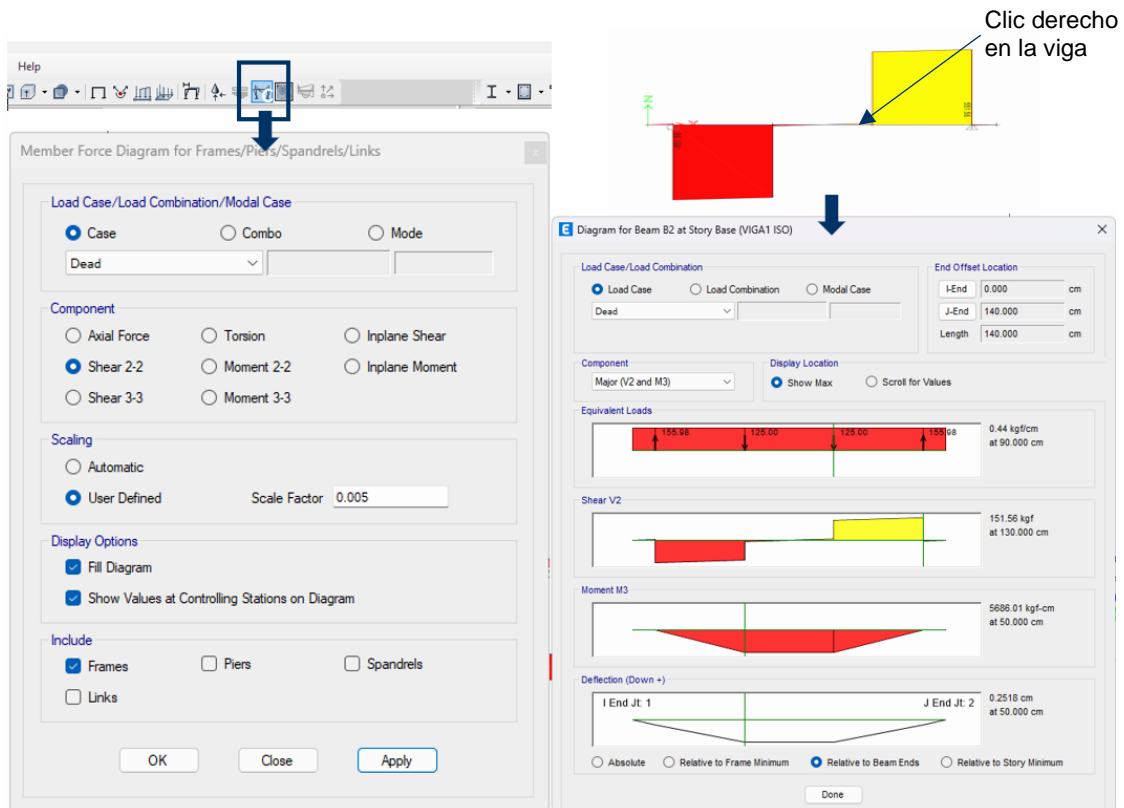


Figura 41: Resultados obtenidos de la prueba en ETABS

Elaboración: Autores

Para cada una de las probetas se realizó el mismo procedimiento para la obtención de datos (Anexo 1 y 2). En la siguiente tabla, se presentan los resultados obtenidos para los materiales clasificados como ortotrópicos e isotrópicos, proporcionando una comparación detallada de las propiedades mecánicas determinadas.

Tabla 37: Cuadro de resultados

P	PROBETAS	CARGA (kgf)	DEFLEXIÓN (mm)	
			ISOTRÓPICA	ORTOTRÓPICA
P1	A01	1050	9,51	9,51
	A02	1190,2	10,7	10,7
	A03	900	8,2	8,2
	A04	1000	9,08	9,08
	PROMEDIO			9,37
PORCENTAJES		100% de similitud		
P2	A01.1	525	4,92	4,92
	A02.1	595,1	5,53	5,53
	A03.1	450	4,26	4,26
	A04.1	500	4,7	4,7
	PROMEDIO			4,85
PORCENTAJES		100% de similitud		
P3	A01.2	262,5	2,62	2,62
	A02.2	297,55	2,93	2,93
	A03.2	225	2,29	2,29
	A04.2	250	2,51	2,51
	PROMEDIO			2,59
PORCENTAJES		100% de similitud		

Elaboración: Autores

Al comparar los resultados de deflexión entre los materiales isotrópicos y ortotrópicos bajo las mismas cargas, se observa que ambos presentan las mismas deflexiones. Esto indica que, a pesar de la naturaleza ortotrópica de la madera, su comportamiento puede asimilarse al de un material isotrópico. La variación radica en la orientación de sus fibras, pero desde una perspectiva ingenieril, puede considerarse un material homogéneo, permitiendo el uso de un único módulo de elasticidad en todas sus direcciones.

CAPÍTULO IV

4. DISCUSIÓN

Con base en los resultados derivados del análisis experimental (Capítulo III), se llevó a cabo un análisis comparativo de los datos integrados en el software ETABS, con el fin de verificar la exactitud y funcionalidad de los modelos estructurales implementados, tanto en la realidad como en lo digital. En este contexto, se desarrolló una plantilla de trabajo (Sección 3.2.1.1. y 3.2.1.2.) a partir de los datos obtenidos, la cual permitirá minimizar el margen de error en el proceso de predimensionamiento de elementos estructurales de madera, optimizando su comportamiento y facilitando su integración en el diseño constructivo. Este enfoque busca no solo garantizar la fiabilidad de las simulaciones estructurales, sino también reforzar tanto la precisión como la eficiencia en su implementación práctica dentro de diseños arquitectónicos o estructurales.

4.1. Comparación de resultados

En la Tabla 38, se observa en los ensayos de flexión, que la precisión de las mediciones varía en función de la carga aplicada, mostrando una relación inversa entre carga y deflexión. En el ensayo P1, donde las cargas se encuentran dentro del límite de proporcionalidad, la deflexión ortotrópica e isotrópica representa el 61,44% de la obtenida en el ensayo del CIITT. A pesar de que el material aún se comporta dentro de un régimen lineal, los efectos de fricción en la prensa y posibles deformaciones no lineales cerca del límite elástico pueden afectar la precisión de las mediciones.

Además, los resultados pueden estar influidos por la presencia de ojos en las probetas, lo que podría generar variaciones en la respuesta del material bajo una carga, afectando la uniformidad de la deformación. En el ensayo P2, con una deflexión ortotrópica e isotrópica casi idéntica a la del ensayo del CIITT (99,58%), el comportamiento del material es más uniforme y la influencia de la fricción es mínima, lo que resulta en mediciones más precisas. Finalmente, en el ensayo P3, con cargas bajas, la deflexión excede un 17,19% con respecto a la referencia del CIITT, lo que indica una mayor flexibilidad del material. En estas condiciones de carga baja, el comportamiento del material es más predecible y lineal, lo que mejora la exactitud de las mediciones.

Tabla 38: Resultados de deflexión obtenidos

P	PROBETAS	CARGA (kgf)	DEFLEXIÓN (mm)		
			ENSAYOS CIITT	ISOTRÓPICA	ORTOTRÓPICA
P1	A01	1050	16,0	9,51	9,51
	A02	1190,2	17,0	10,7	10,7
	A03	900	11,2	8,2	8,2
	A04	1000	16,8	9,08	9,08
PROMEDIO		1035,05	15,25	9,37	9,37
PORCENTAJES			100,00%	61,44%	61,44%
P2	A01.1	525	5,11	4,92	4,92
	A02.1	595,1	4,42	5,53	5,53

	A03.1	450	5,03	4,26	4,26
	A04.1	500	4,92	4,7	4,7
	PROMEDIO	517,525	4,87	4,85	4,85
	PORCENTAJES		100,00%	99,58%	99,58%
P3	A01.2	A01.2	262,5	2,44	2,62
	A02.2	A02.2	297,55	2,1	2,93
	A03.2	A03.2	225	1,94	2,29
	A04.2	A04.2	250	2,37	2,51
	PROMEDIO	258,7625	2,21	2,59	2,59
	PORCENTAJES		100,00%	117,19%	117,19%
				17,19%	DE EXCESO

Elaboración: Autores

En la Figura 43, se representa de forma gráfica y comparativa, la diferencia entre los resultados obtenidos en los ensayos físicos realizados en los laboratorios del CIITT y aquellos generados a través del modelado digital en el software estructural ETABS. Esta representación visual permite identificar con claridad las variaciones en los valores de deflexión entre ambos métodos.

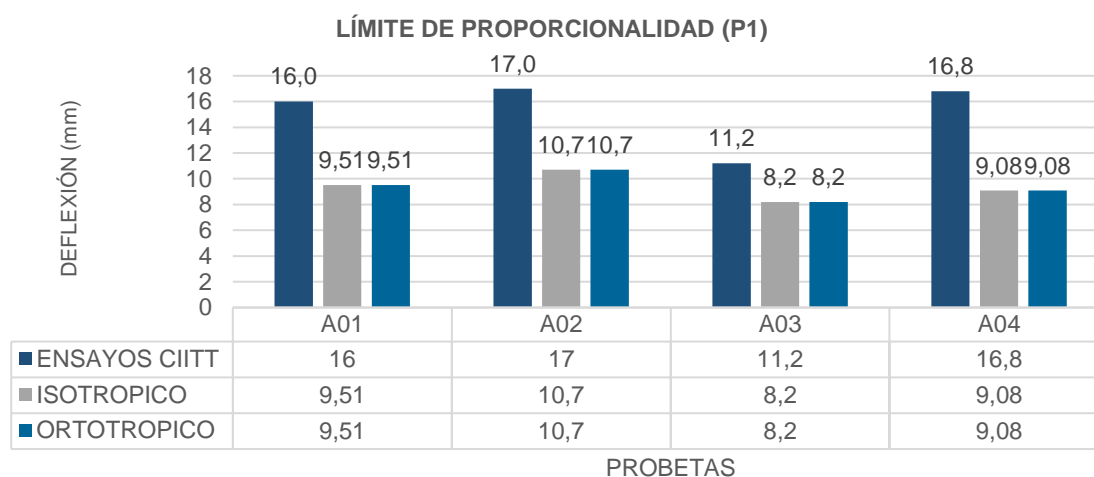


Figura 42: Diagrama de resultados en P1

Elaboración: Autores

Dentro del análisis, destaca el comportamiento de la probeta A03, la cual evidencia una mayor concordancia entre los tres métodos de evaluación de deflexión (un experimental y dos simulados), registrando una diferencia de apenas 3mm. Esta similitud sugiere que dicha probeta posee propiedades mecánicas más uniformes o una geometría más precisa respecto al resto de las muestras, lo que permite una mejor correlación con el modelo digital.

En contraste, el resto de las probetas presenta diferencias más amplias, oscilando entre 7 mm y 8 mm, lo que puede atribuirse a factores como variabilidad en la densidad de la madera o la presencia de defectos físicos como los “ojos / nudos”. Estas discrepancias también podrían deberse a la sensibilidad del modelo digital a la idealización del comportamiento del material en el software.

En el caso de las cargas P2, la diferencia es casi nula entre las tres pruebas, ya que la deflexión no supera los 2mm, lo que sugiere una respuesta uniforme y predecible ante estas cargas. Del mismo modo, el resultado respalda la precisión del modelo digital para representar el comportamiento real del material bajo cargas bajas.

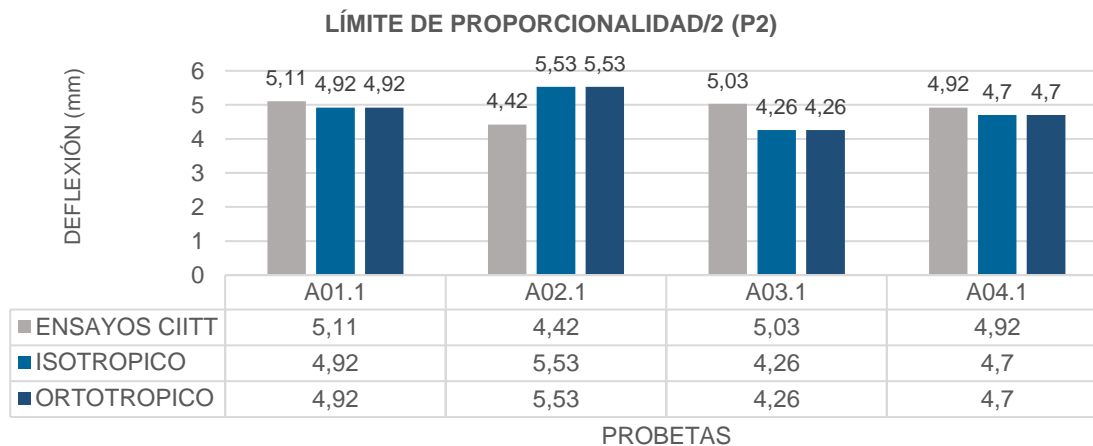


Figura 43: Diagrama de resultados en P2

Elaboración: Autores

La Figura 45, refleja la diferencia entre los modelos isotrópicos y ortotrópicos en comparación con los ensayos del CIITT, evidencian un excedente máximo de 0,85mm. Este pequeño margen de diferencia refleja una buena compatibilidad entre los resultados experimentales y simulados.

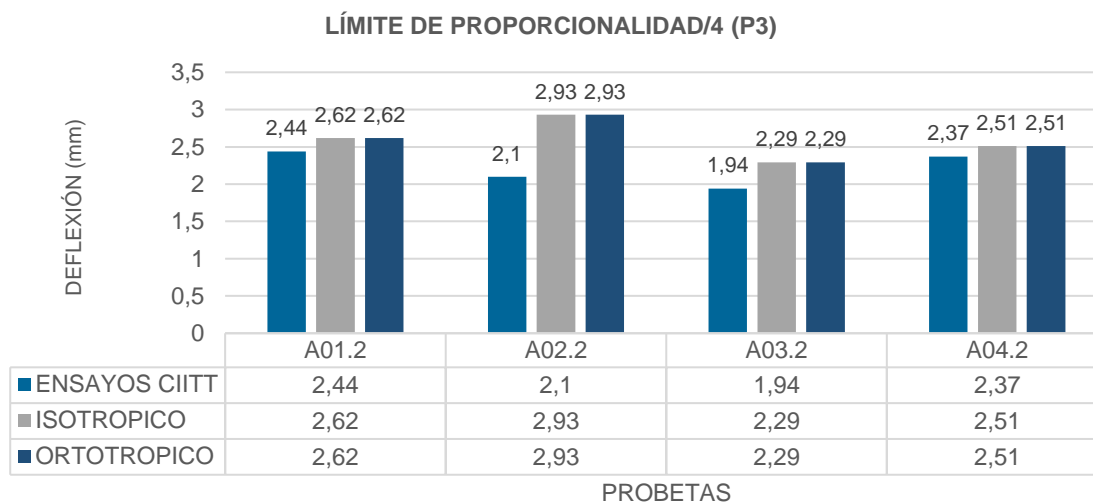


Figura 44: Diagrama de resultados en P3

Elaboración: Autores

Los resultados obtenidos proporcionan una confirmación adicional sobre la fiabilidad de los modelos, demostrando que, a pesar de las variaciones inherentes en la naturaleza del material, los enfoques isotrópicos y ortotrópicos ofrecen estimaciones similares a las condiciones reales.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El estudio ha logrado integrar las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus radiata* en el software de modelación estructural ETABS, facilitando su uso para los profesionales de la ingeniería y arquitectura en Ecuador. Se calibraron los parámetros necesarios del material, permitiendo que el modelo digital refleje con precisión su comportamiento bajo cargas estructurales.

La evaluación de los datos obtenidos de las normativas y características del material se realizó verificando que cumplieran con los requerimientos técnicos del software. Esto incluyó la revisión de parámetros como los módulos de elasticidad y las resistencias de la madera, lo que permitió una simulación precisa del comportamiento estructural dentro de ETABS.

Uno de los logros más importantes de este estudio fue la validación experimental de los datos integrados en el modelo. Las pruebas realizadas en el CIITT corroboraron que los resultados obtenidos del modelado en ETABS eran consistentes con los ensayos reales, con una diferencia máxima de 0,85 mm. Este pequeño margen de error demuestra que el modelo es confiable y refleja adecuadamente el comportamiento de la madera bajo cargas específicas.

Además, se compararon los resultados obtenidos con los modelos isotrópicos y ortotrópicos. A pesar de las diferencias teóricas entre estos enfoques, se observó que las deflexiones fueron idénticas. Este hallazgo resalta que, la madera puede considerarse homogénea desde un punto de vista estructural, simplificando el proceso de modelado sin sacrificar la precisión.

Finalmente, los objetivos del estudio se han cumplido satisfactoriamente. La integración de los datos mecánicos de la madera en ETABS y su validación experimental ofrecen una herramienta útil para los profesionales en Ecuador, permitiéndoles diseñar estructuras más precisas y eficientes utilizando *Pinus radiata*. Esto no solo optimiza el uso de este material en proyectos estructurales, sino que también promueve su utilización en la construcción de manera más sostenible en concordancia con las normativas locales.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda continuar explorando el uso de modelos ortotrópicos para materiales como la madera, aunque los resultados obtenidos con los modelos isotrópicos y ortotrópicos fueron similares, los modelos ortotrópicos pueden ofrecer mayor precisión al considerar las diferentes direcciones de las fibras y sus variaciones en resistencia. Además, se recomienda realizar más ensayos experimentales con distintos tipos de madera y cargas variadas, para validar y enriquecer los modelos con un conjunto más amplio de datos.

Como complemento, se recomienda desarrollar una biblioteca de materiales personalizada dentro del software ETABS, que incorpore propiedades mecánicas verificadas experimentalmente para maderas locales, como el Pinus radiata. Esta base de datos permitiría optimizar el proceso de modelado estructural, facilitando su uso por parte de profesionales y asegurando la coherencia en la aplicación de parámetros técnicos en distintos proyectos.

Paralelamente, se sugiere implementar estudios sobre la vida útil y el mantenimiento de estructuras construidas con este tipo de madera, considerando variables como el envejecimiento, el deterioro por agentes ambientales, junto con la efectividad de los tratamientos protectores. La integración de esta información permitiría no solo mejorar la precisión del modelado estructural en el corto plazo, sino también proyectar con mayor certeza el desempeño de las edificaciones en el tiempo, contribuyendo al diseño de construcciones más duraderas y sostenibles.

Por último, sería interesante promover la capacitación de profesionales en el uso de ETABS con materiales locales, como el Pinus Radiata, lo que facilitaría su integración en proyectos de construcción en Ecuador.

CAPÍTULO VI

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, M., Benedetti, S., Gallardo, C., & Ulloa, D. (2020). Estudio percepción construcción en madera. In Estudio percepción construcción en madera. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/30358>
- Aguirre Mendoza, Z., Díaz Ordoñez, E., Muñoz Chamba, J., & Muñoz Chamba, L. (2019). Sucesión natural bajo plantaciones de *Pinus radiata* D. Don (Pinaceae) y *Eucalyptus globulus* Labill. (Myrtaceae), en el sur del Ecuador. *Arnaldoa*, 26(3), 943–964. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26306>
- ASTM C-39. (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. C-39. The American Society for Testing and Materials. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/108483/0318d1c8cafb4b4cac903d64727feb4d/ASTM-C39-C39M-21.pdf>
- ASTM D143-14. (2016). Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. D143-14. The American Society for Testing and Materials, 3, 1–14. <https://doi.org/10.1520/D0143-14.2>
- ASTM D198. (2016). Standard Test Methods for Small Clear Wooden Specimens of Timber. D143-14. The American Society for Testing and Materials. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/113069/5b89e8b061eb4e979beedfa05ee73ed2/ASTM-D198-22.pdf>
- Banshuy, J. E., & Guamunshi. (2024). UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO Título “ Análisis comparativo de la normativa dispuesta en la ACI 318-19 para el diseño de muros a corte , frente a la NEC-15 ” Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil Autores : Banshuy Lluco Jhon P. UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO.
- Betancur, J. F. (2022). MODELACIÓN SÍSMICA DE EDIFICACIONES DE ENTRAMADOS LIVIANOS DE MADERA. UNIVERSIDAD EIA INGENIERÍA CIVIL ENVIGADO.
- Beyer, G., Madera, U., Woodforum, B., Fischer, M., Fletcher, J., De Jaeger, F., Riet, C. Van, Vandeweghe, K., & Wijnendaele, K. (2009). Frente al Cambio Climático: Manu Defays German Timber Promotion Fund Eric de Munck Nederlands Timber Information Centre. www.cei-bois.org
- Breyer, D. E. (1998). Design of Wood Structures—ASD/LRFD.
- Catalán L., J., Reyes Riquelme, C., González, I., Mardones Díaz, P., Hernández C., G., & Vásquez V., L. (2021). Manual de diseño. Edificaciones en madera de 1 a 3 pisos. Manual de Diseño. Edificaciones En Madera de 1 a 3 Pisos. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/31334>
- Cada, W., Neira, G., & Quesada, F. (2023). Caracterización Físico – Mecánica de la Madera Aserrada *Pinus Radiata* Comercializada en Cuenca. Universidad Católica de Cuenca.
- Computers and Structures, Inc. (CSI). (2019). Manual ETABS v19.1 - Integrated Structural Analysis and Design Software. Recuperado de <https://www.csicertifications.us/Manuals/Manual%20de%20ETABS%20v19.pdf>
- Computers and Structures, Inc. (CSI). (2024). ETABS - Integrated Structural Analysis and Design Software. Recuperado de <https://www.csiamerica.com/products/etabs>
- COPANT. (1972). Método de determinación del peso específico aparente.
- Feijoo, C. E. (2019). GUÍA PARA CORTES ANATÓMICOS DE LA MADERA. In Sustainability (Switzerland) (Vol. 11, Issue 1). <http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng->

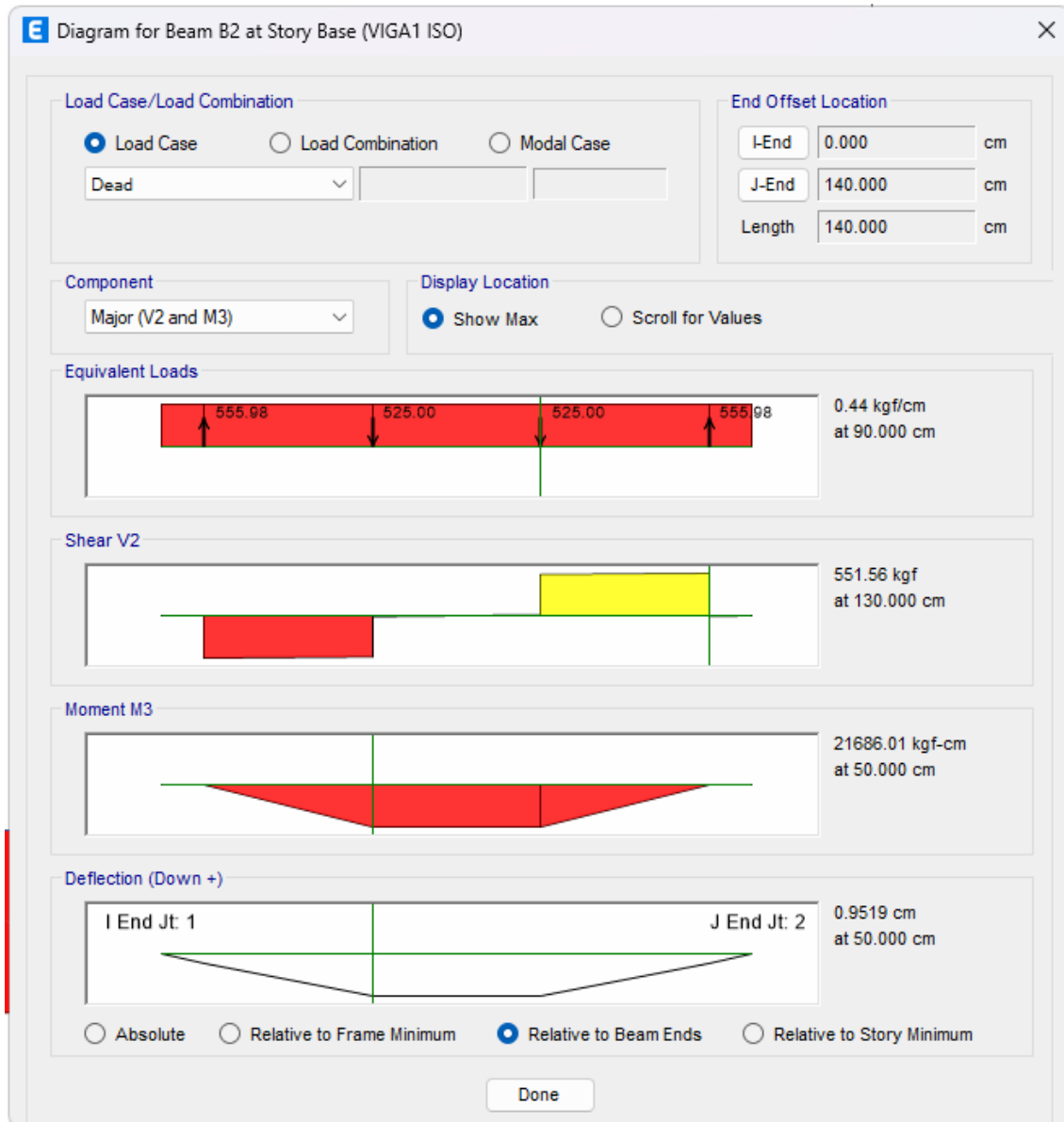
8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI

- García, M., & Benedetti, R. (2021). La madera como material para la construcción. *Infor*, N°68, 8. www.INFOR.cl
- Gysling, Kahler, Soto, Mejias, Poblete, Alvarez, Bañados, Baeza, & Pardon. (2021). Madera y Cosntruccion hacia una Simbiosis Estratégica. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/31291/31291.pdf;jsessionid=00675CEF1B895919607FA319609B6DA8?sequence=5>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2013). INEN 1162 Maderas. Determinación de la densidad aparente. First Edit, 7–12.
- Mead, D. J. (2013). Sustainable management of *Pinus radiata* plantations.
- Miller, A.D. (1974) *Pinus radiata* en el Ecuador, su ecología y crecimiento. *Unasyuva*, 26. Recuperado de: <https://www.fao.org/4/e7730s/e7730s05.htm>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Norma Ecuatoriana de la construcción. Estructuras de madera. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/11.-NEC-SE-MD-Estructuras-Madera.pdf>
- Taboada, J. (2006). ANÁLISIS Y DISEÑO DE EDIFICIOS ASISTIDO POR COMPUTADORAS. *Test*, 1–125.
- Tanguila, C. A. (2023). ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ESPECIE FORESTAL AMAZÓNICA YUYÚN (*TERMINALIA OBLONGA*), Y SU IDONEIDAD COMO MATERIAL ESTRUCTURAL DE ACUERDO A LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN. *AT-TAWASSUTH: Jurnal Ekonomi Islam*, VIII(I), 1–19.
- Viera, A., & Castro, J. (2023). laminada encolada (MLE) de pino producido en Ecuador Mechanical characterization of pine glued laminated timber (MLE) beams produced in Ecuador. *EÍDOS No 23 Revista Científica de Arquitectura y Urbanismo*, 81–88. revistas.ute.edu.ec/index.php/eidos

ANEXOS

Anexo 1: Resultados de deflexiones Isotrópicas

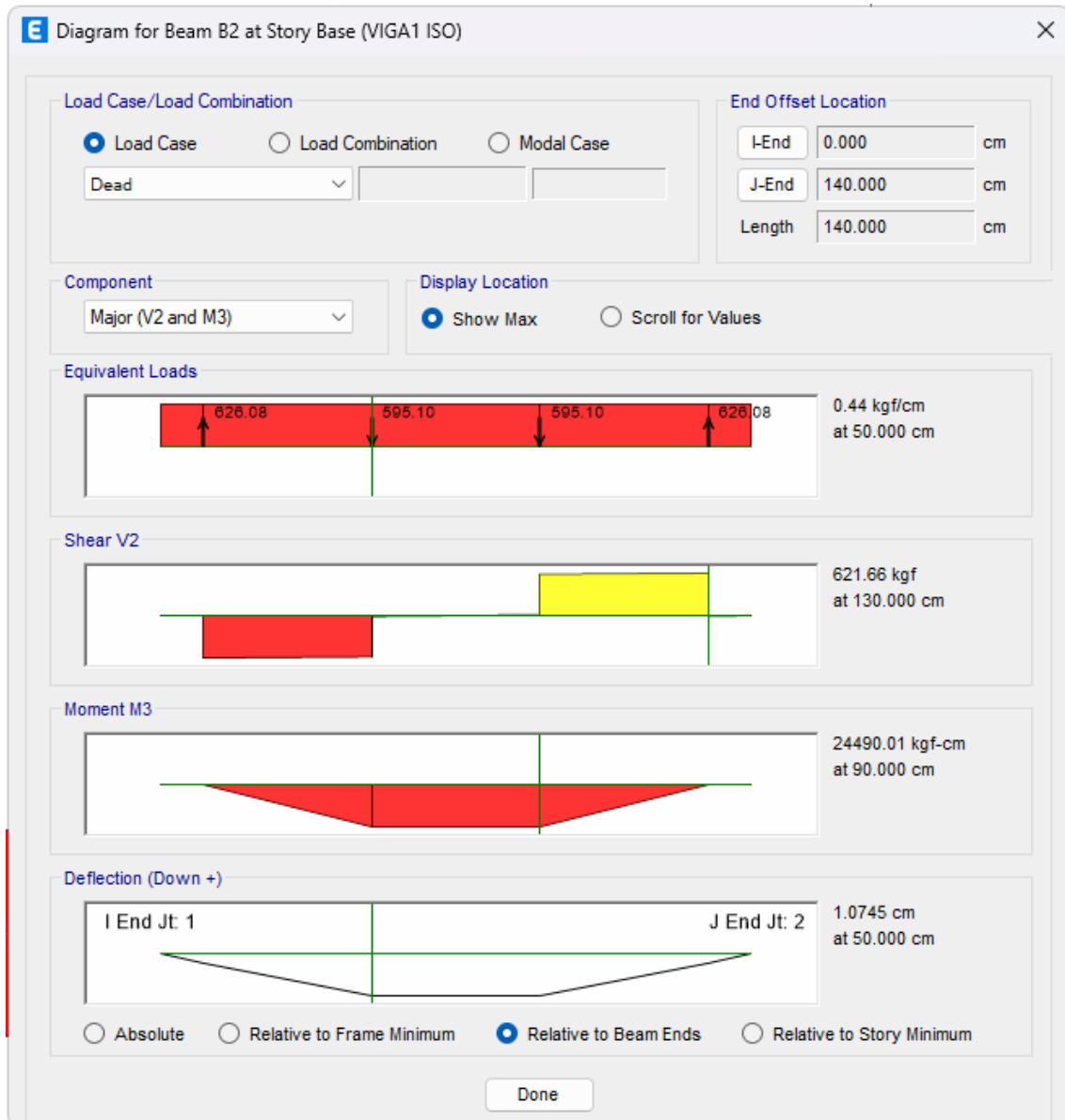
1.1. Probeta A01 con carga de 1050kgf/cm²



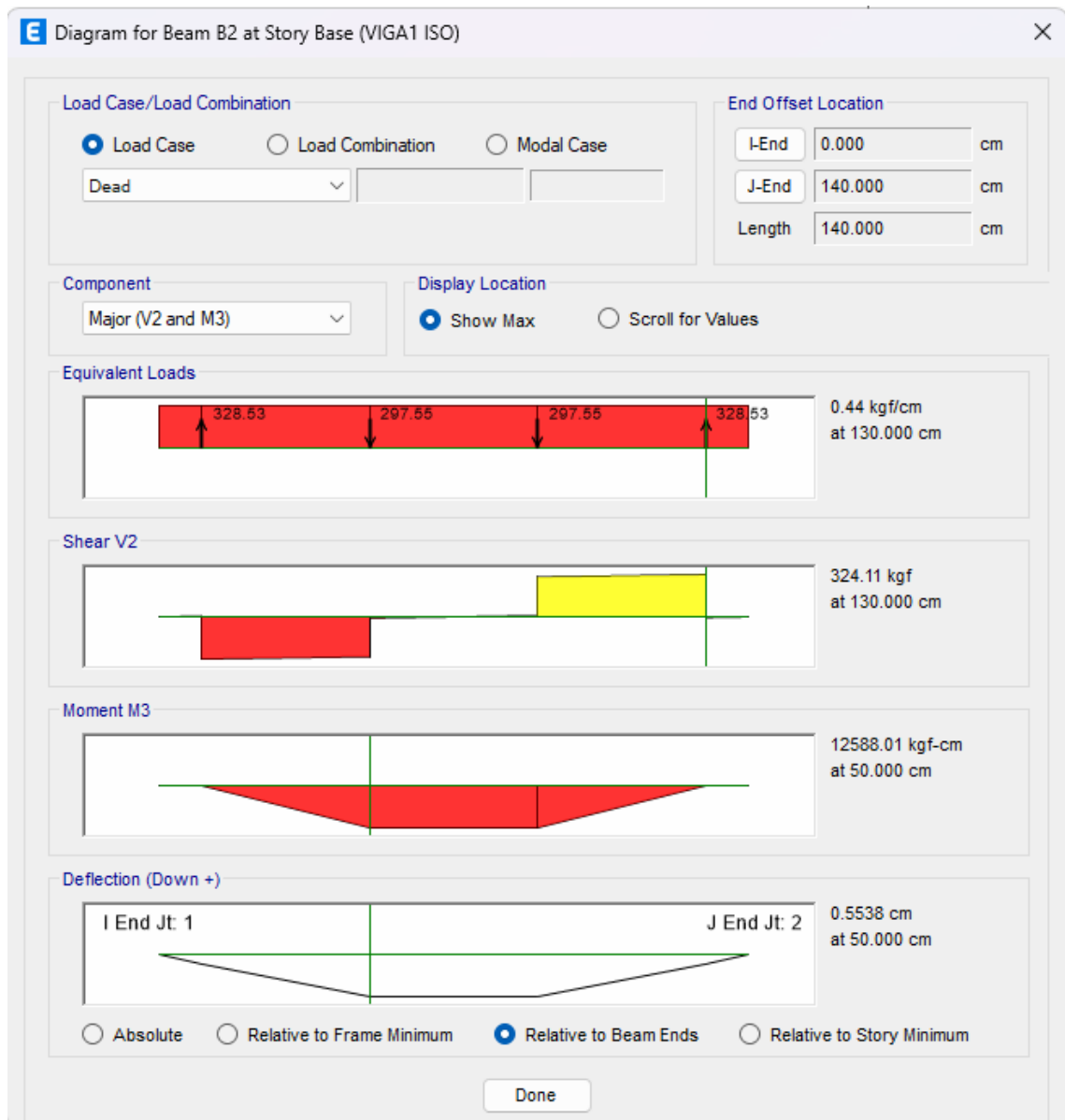
1.3. Probeta A01.1 con carga de 262,5 kgf/cm²



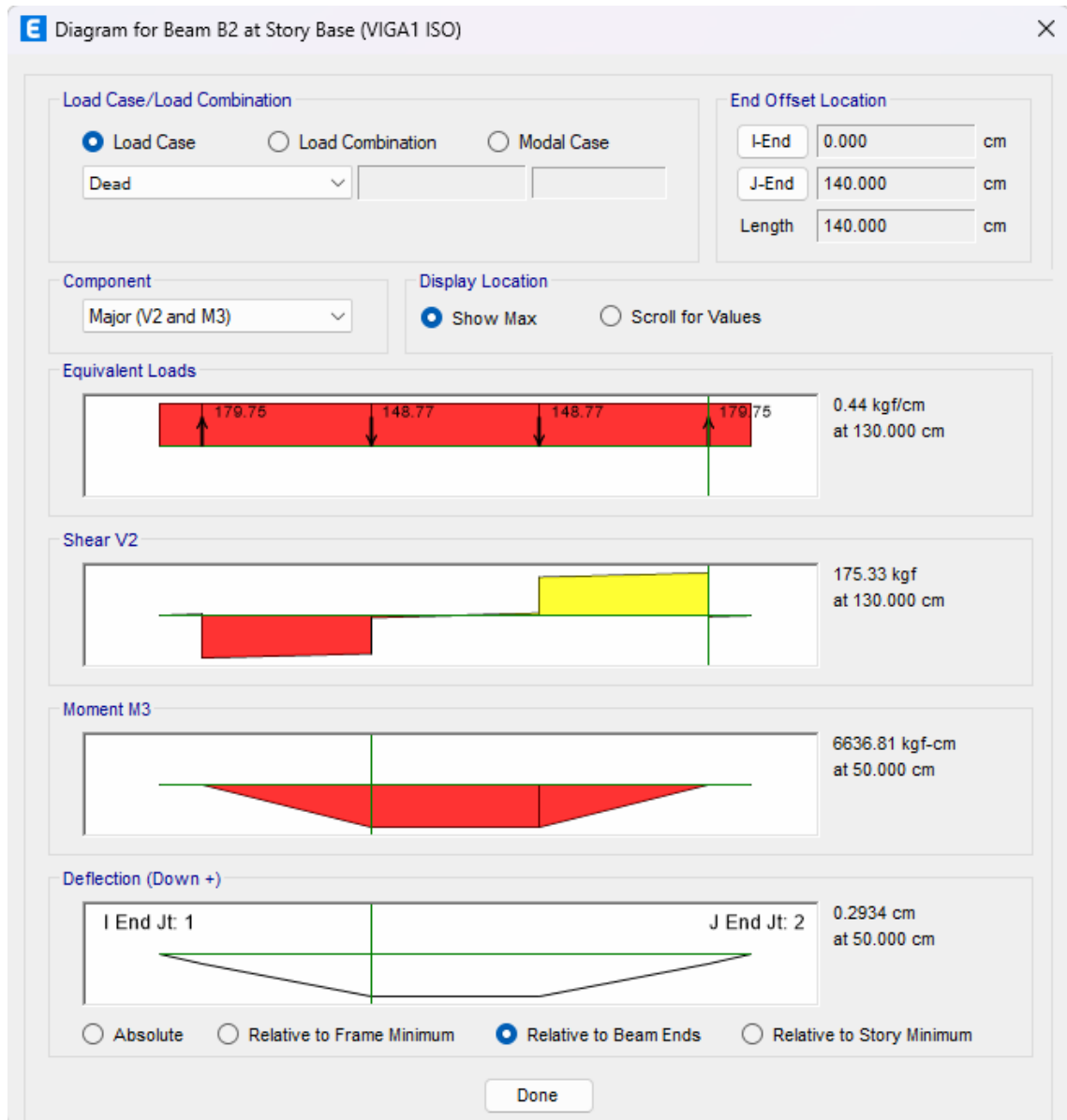
1.4. Probeta A02 con carga de 1190,2 kgf/cm²



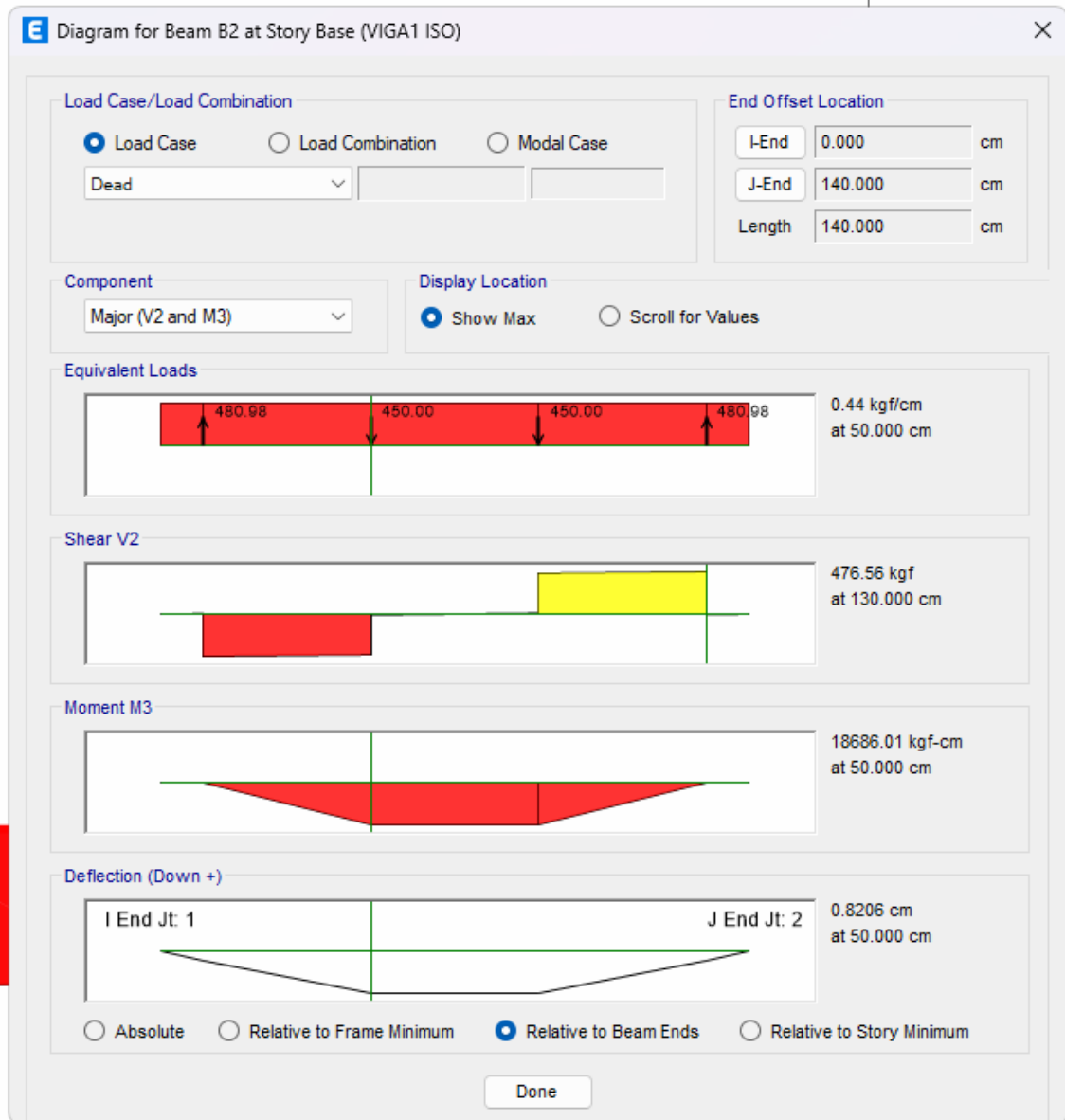
1.5. Probeta A02.1. con carga de 595,1 kgf/cm²



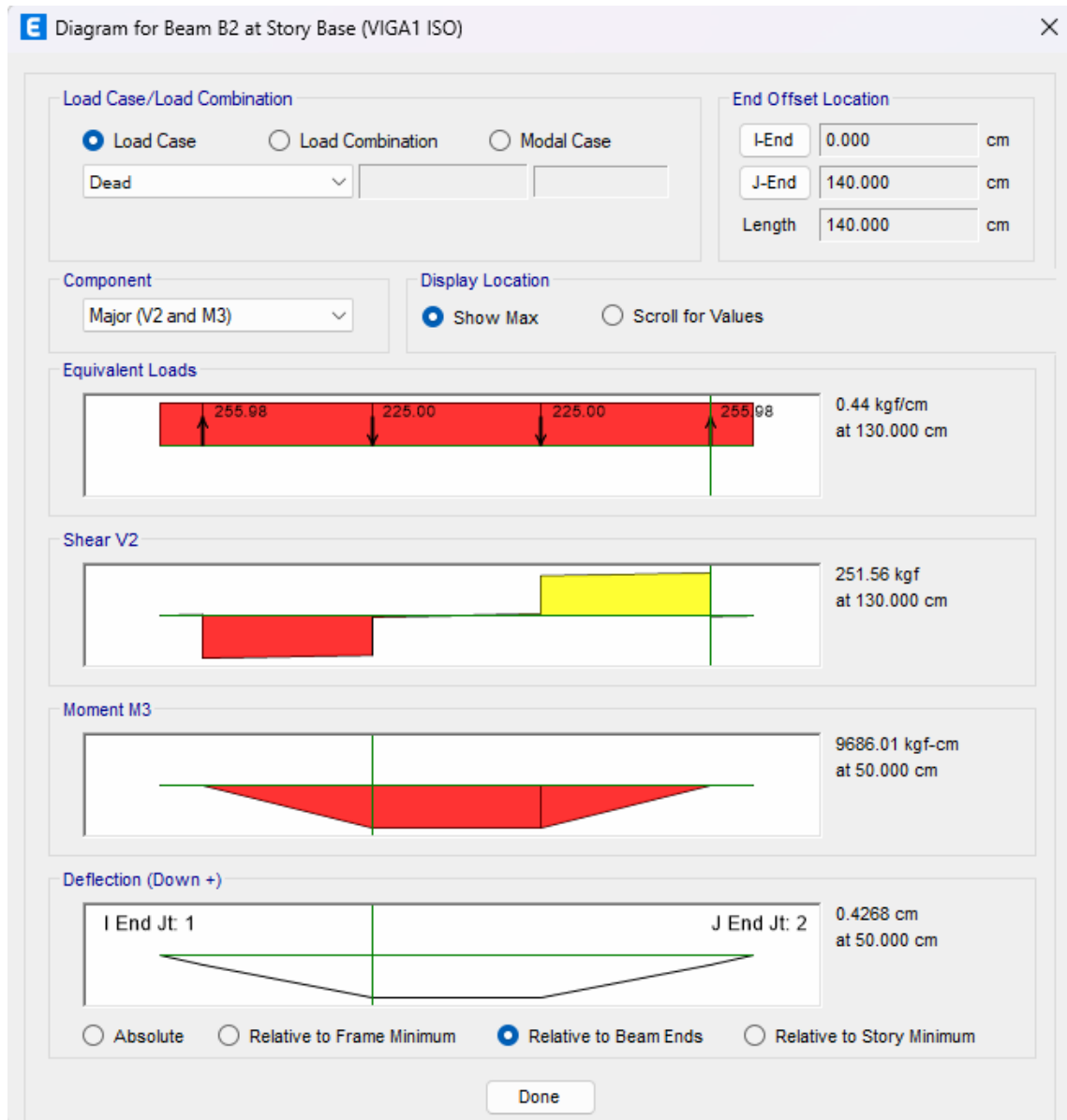
1.6. Probeta A02.2. con carga de 297,55 kgf/cm²



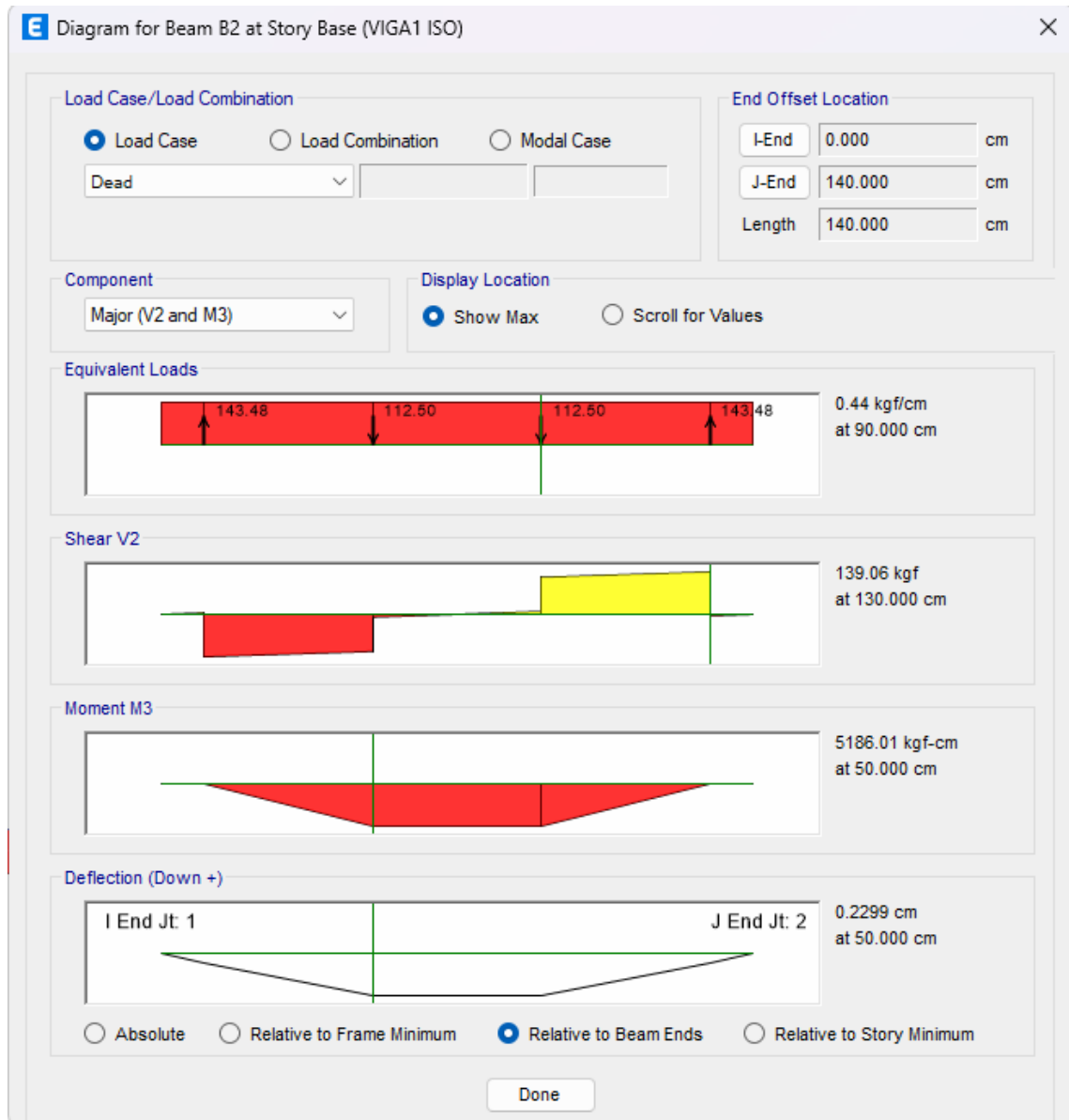
1.7. Probeta A03 con carga de 900 kgf/cm²



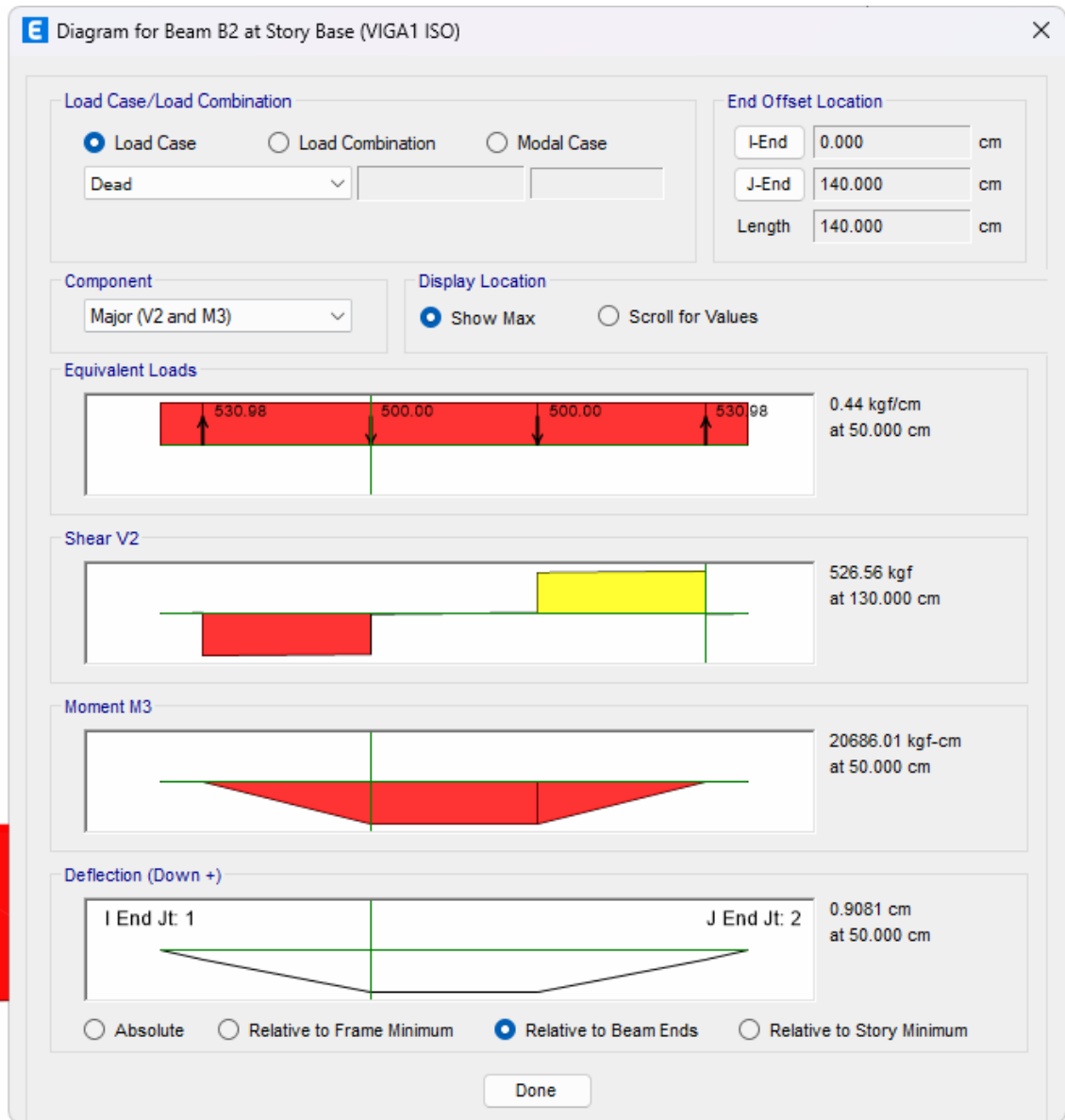
1.8. Probeta A03.1 con carga de 450 kgf/cm²



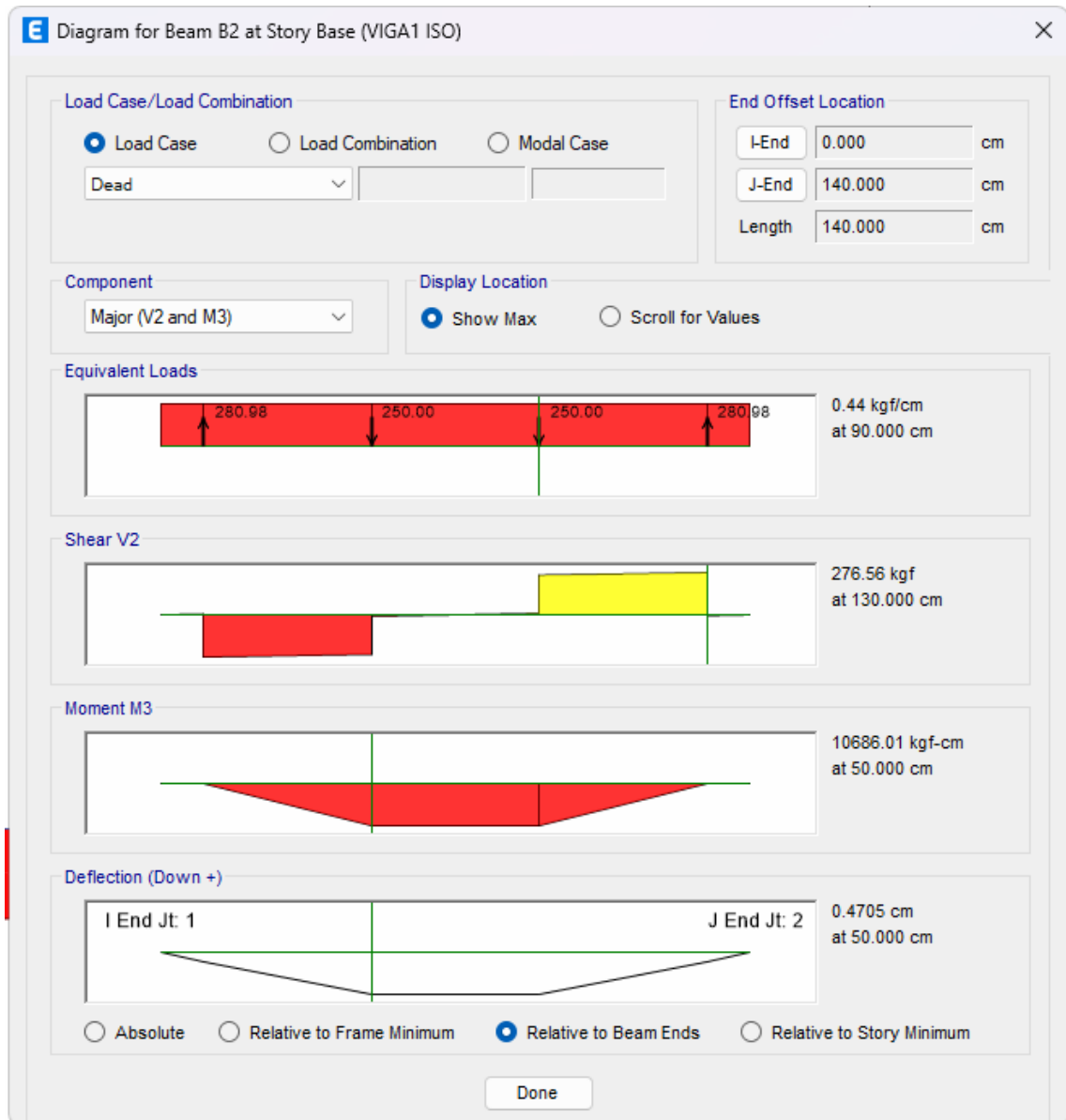
1.9. Probeta A03.2 con carga de 225 kgf/cm²



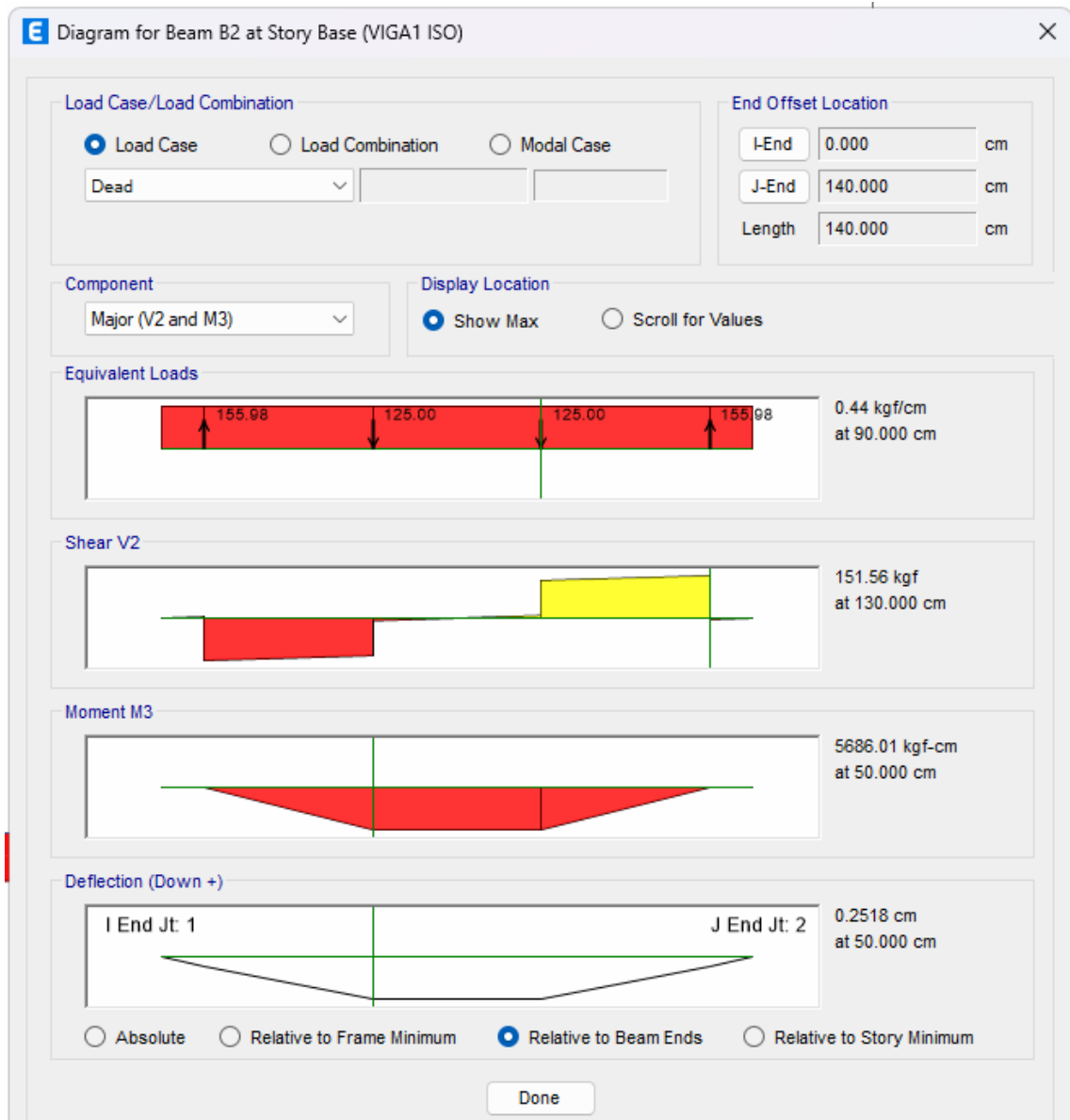
1.10. Probeta A04 con carga de 1000 kgf/cm²



1.11. Probeta A04.1 con carga de 500 kgf/cm²

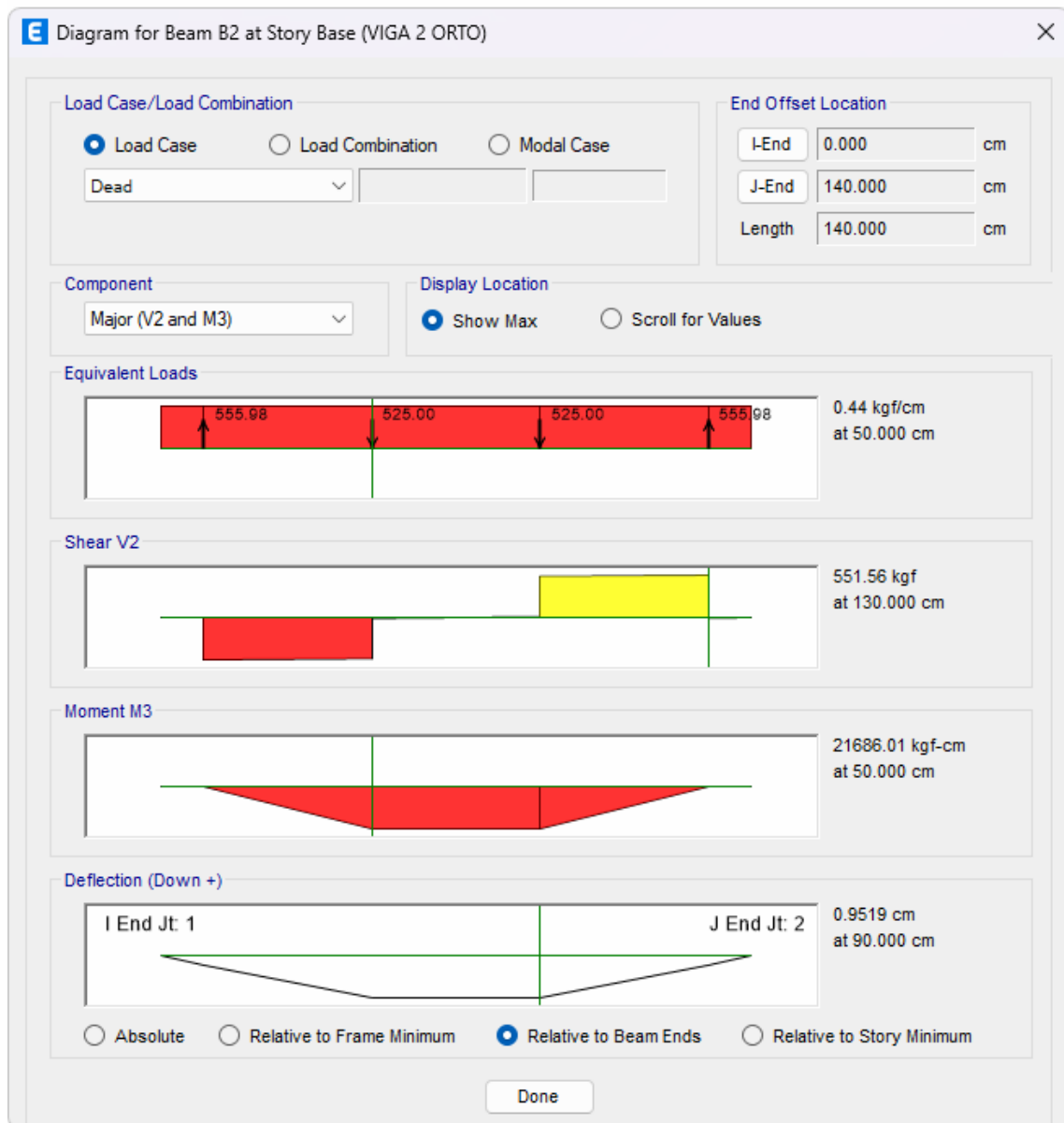


1.12. Probeta A04.2 con carga de 250 kgf/cm²

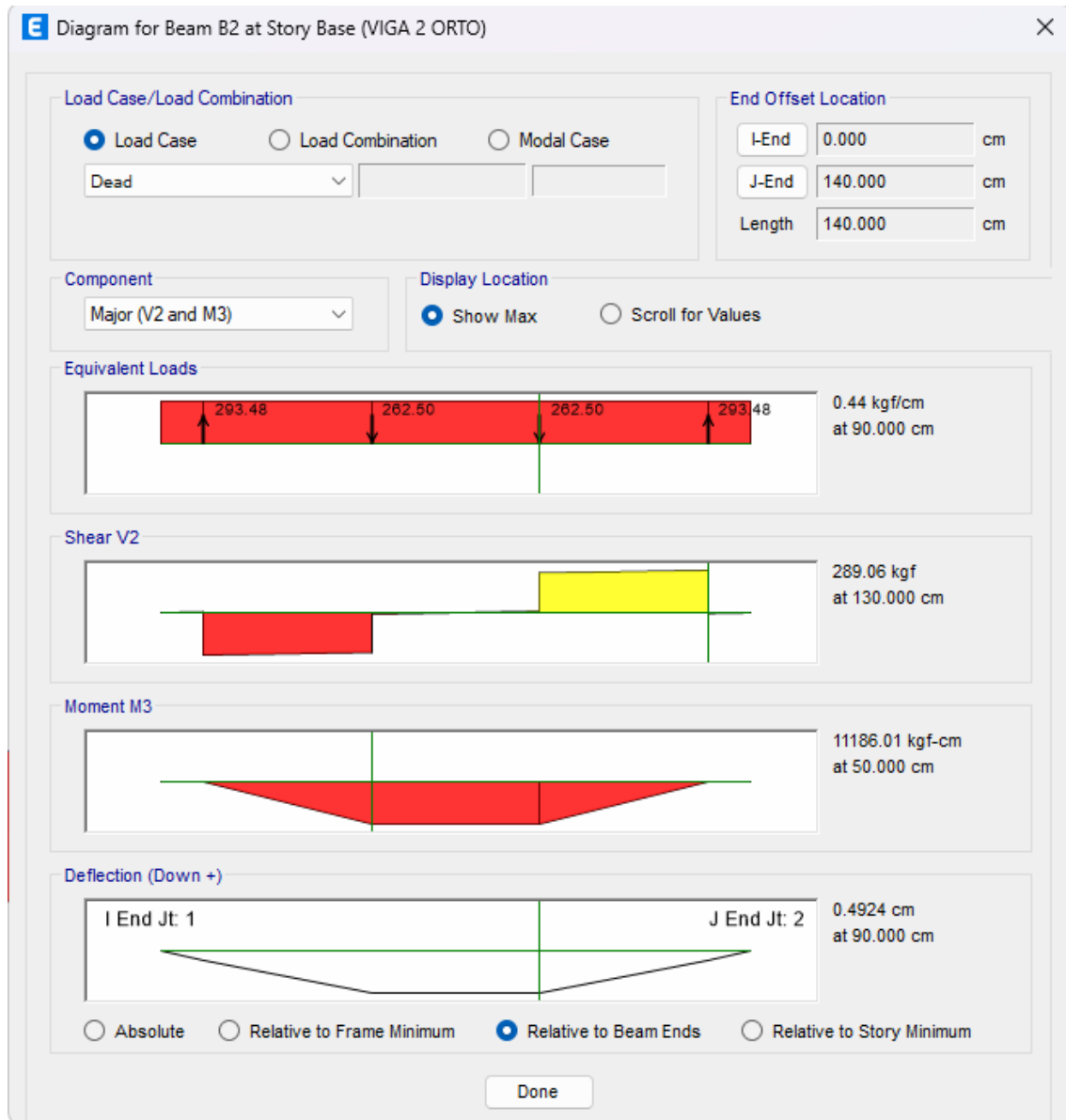


Anexo 2: Resultados de deflexiones Ortotrópicas

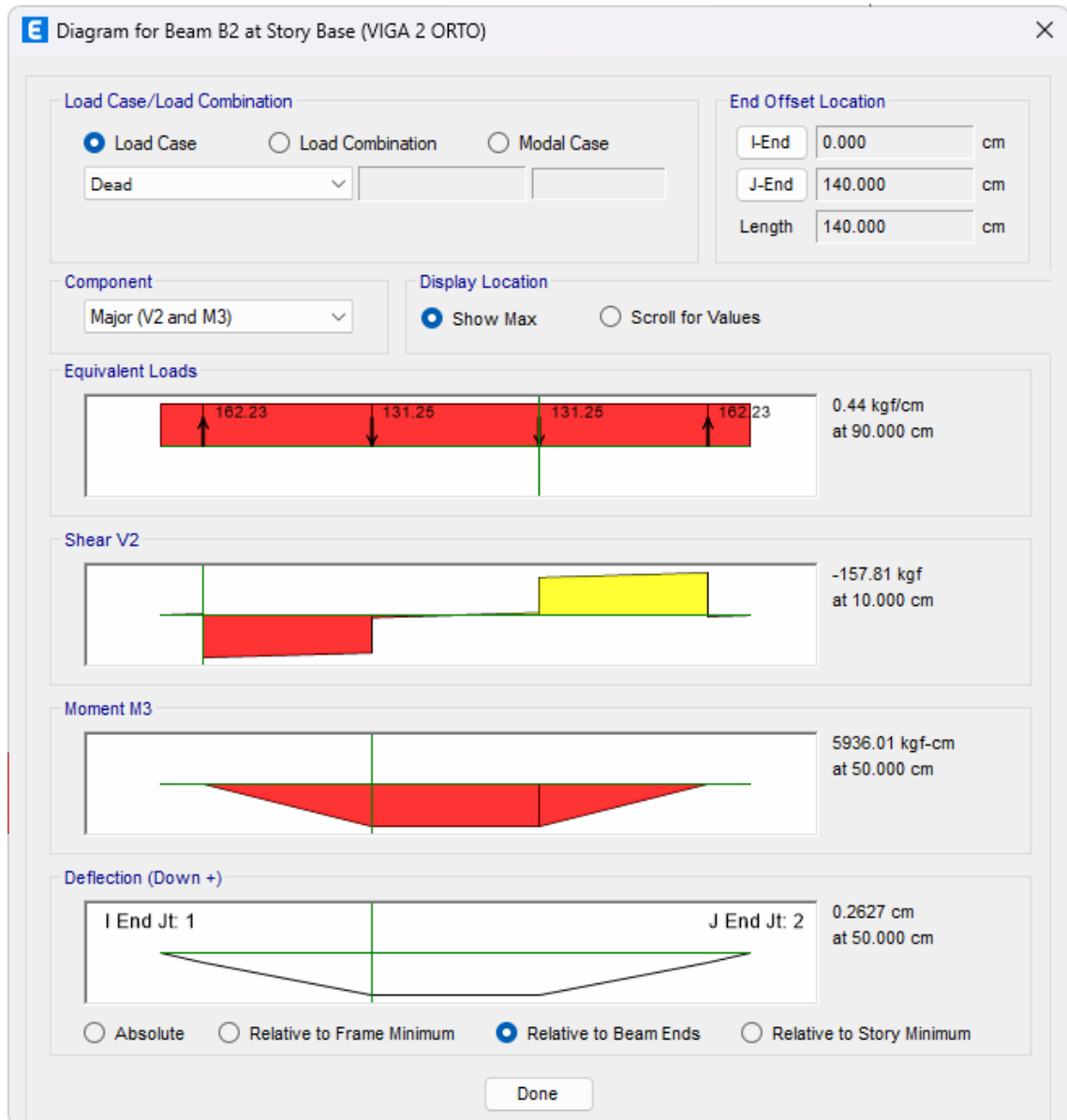
2.1. Probeta A01 con carga de 1050 kgf/cm²



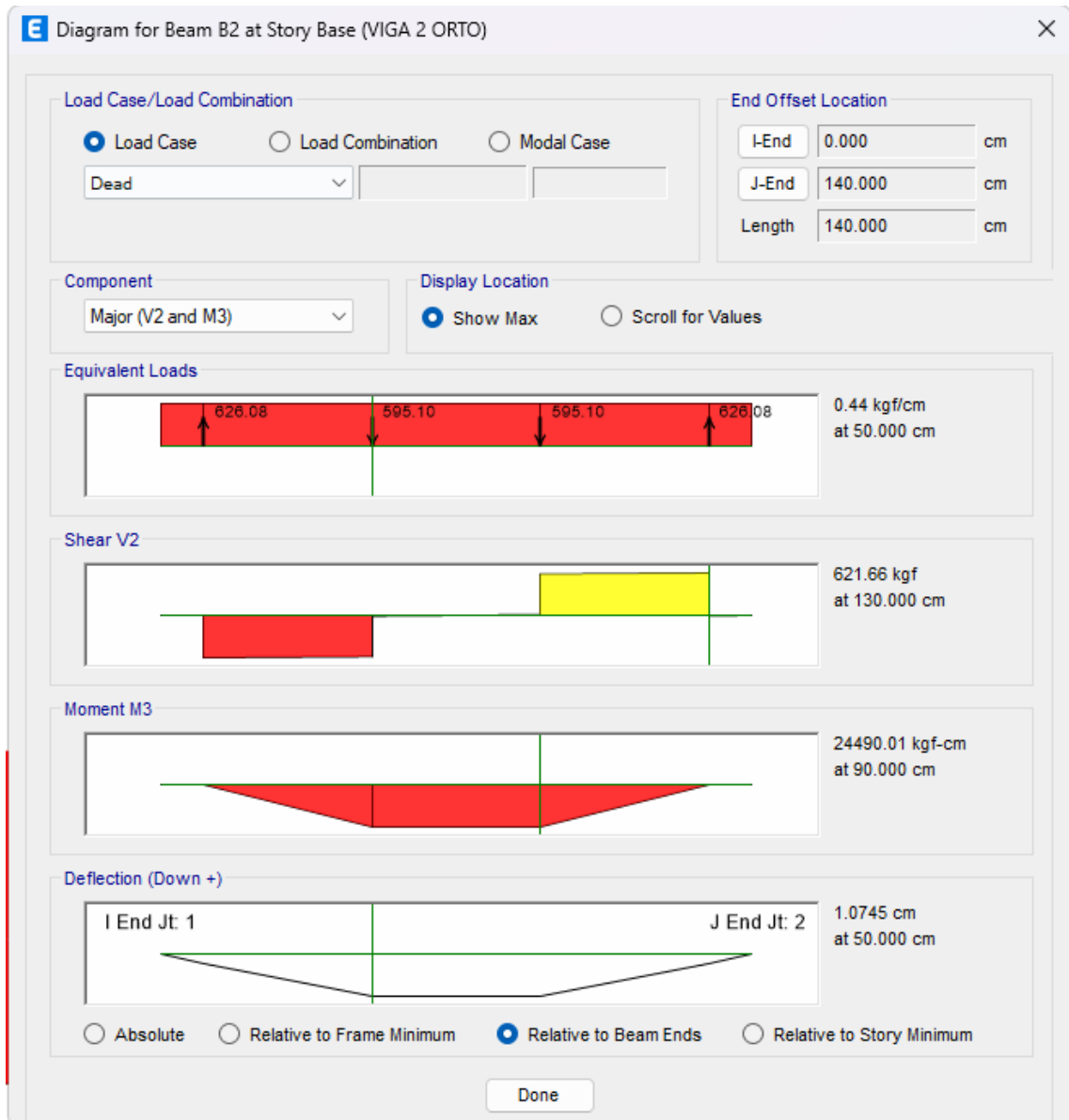
2.2. Probeta A01.1 con carga de 525 kgf/cm²



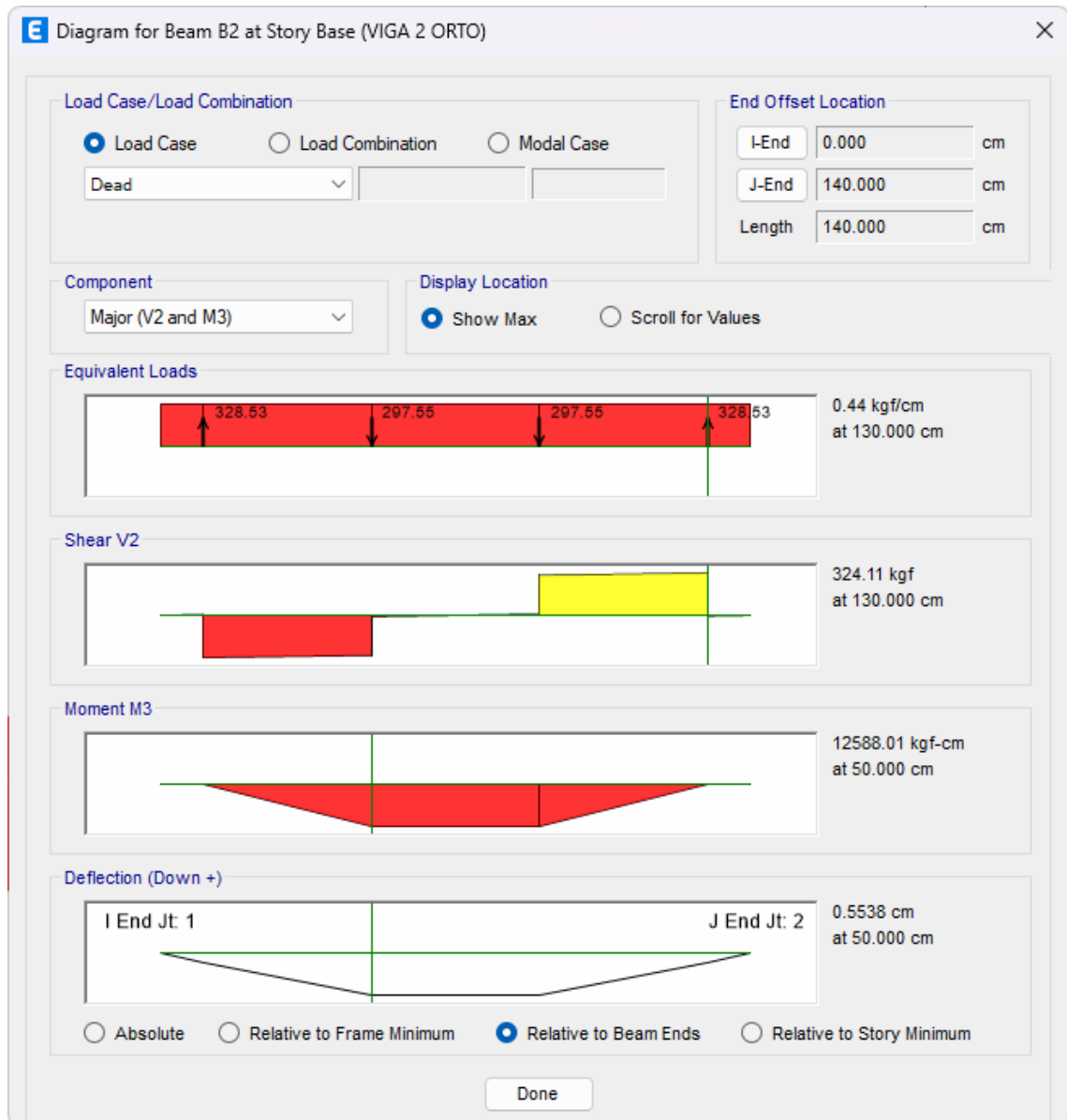
2.3. Probeta A01.2 con carga de 262,5 kgf/cm²



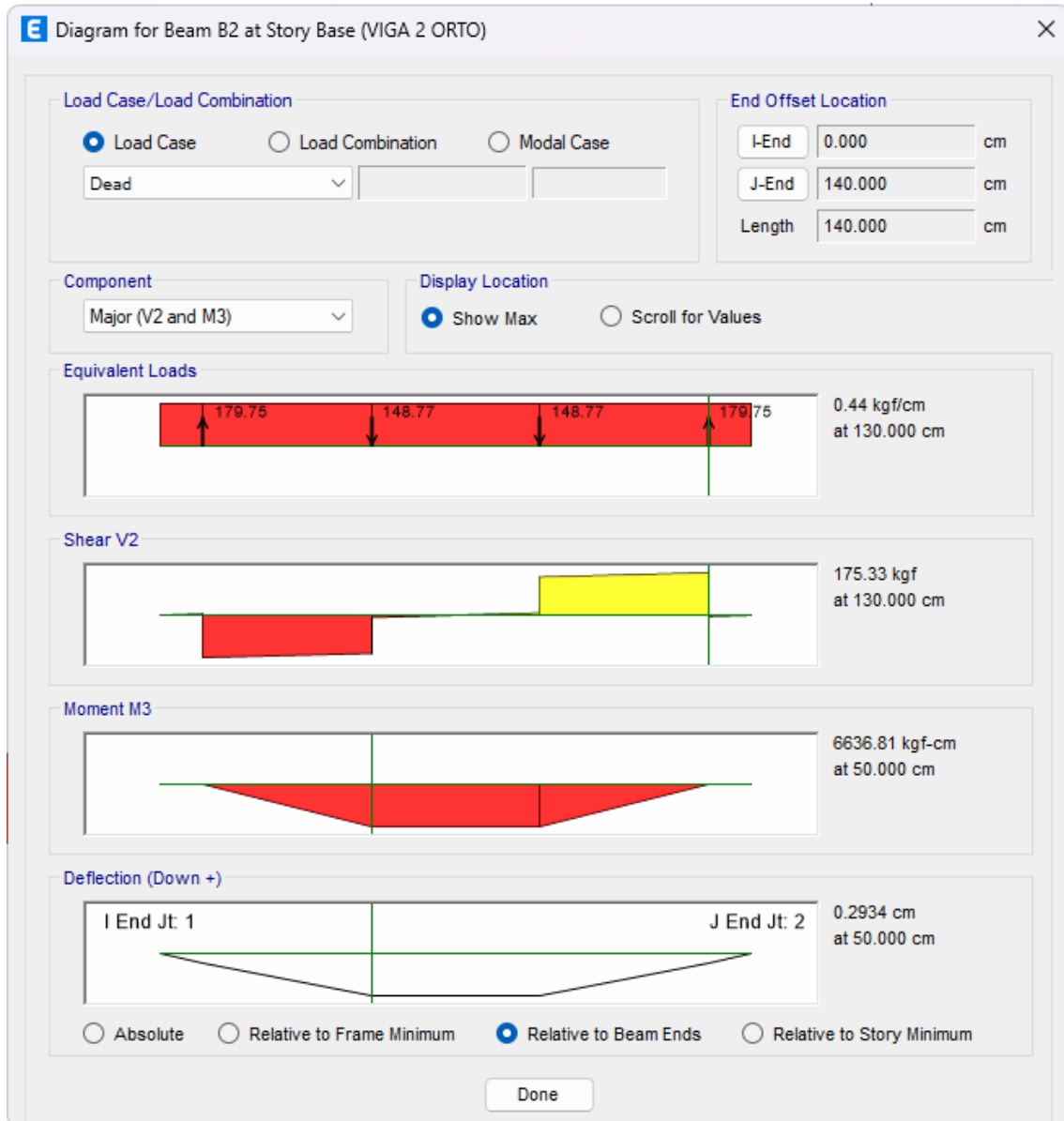
2.4. Probeta A02 con carga de 1190,2 kgf/cm²



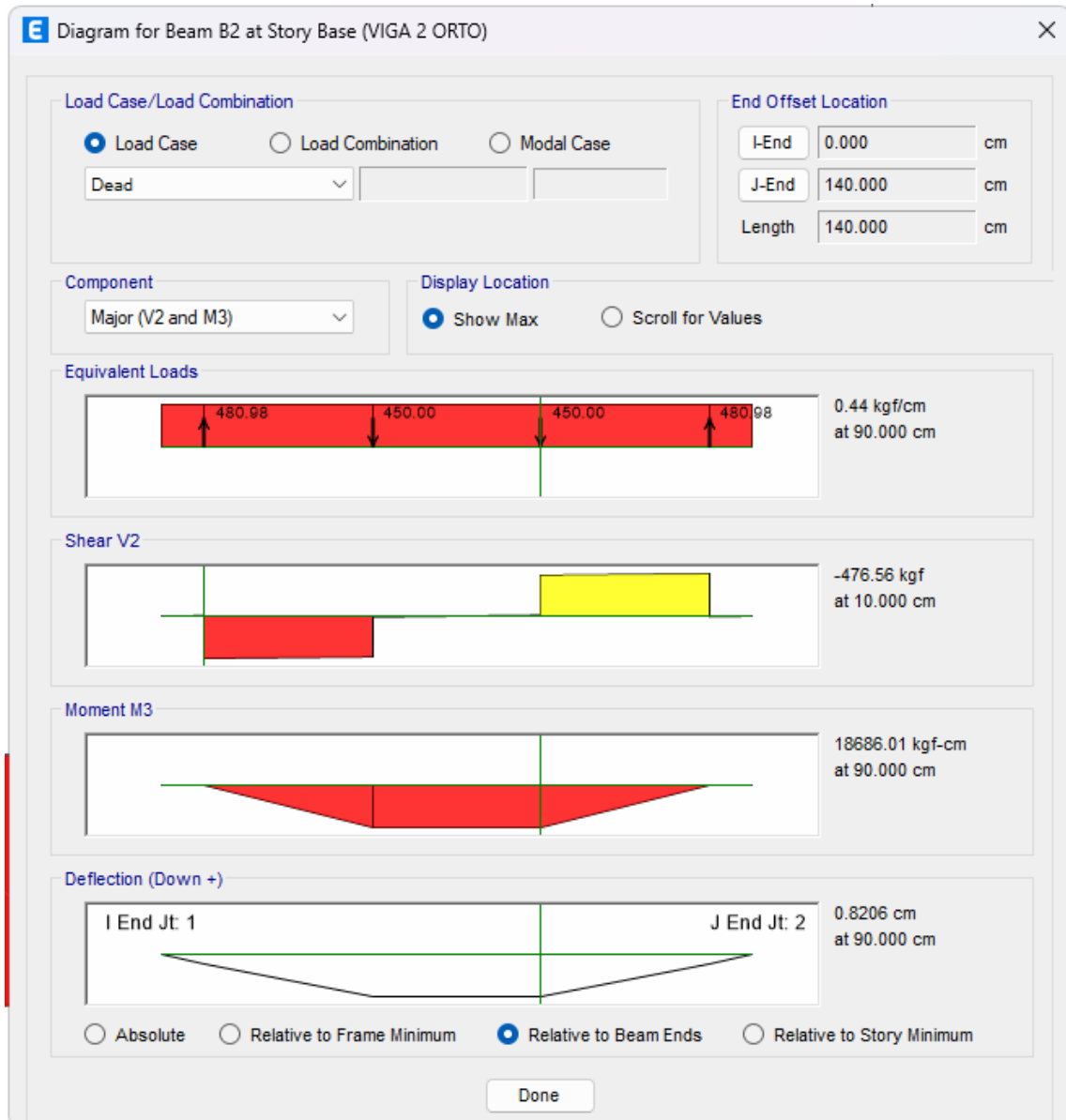
2.5. Probeta A02.1 con carga de 595,1 kgf/cm²



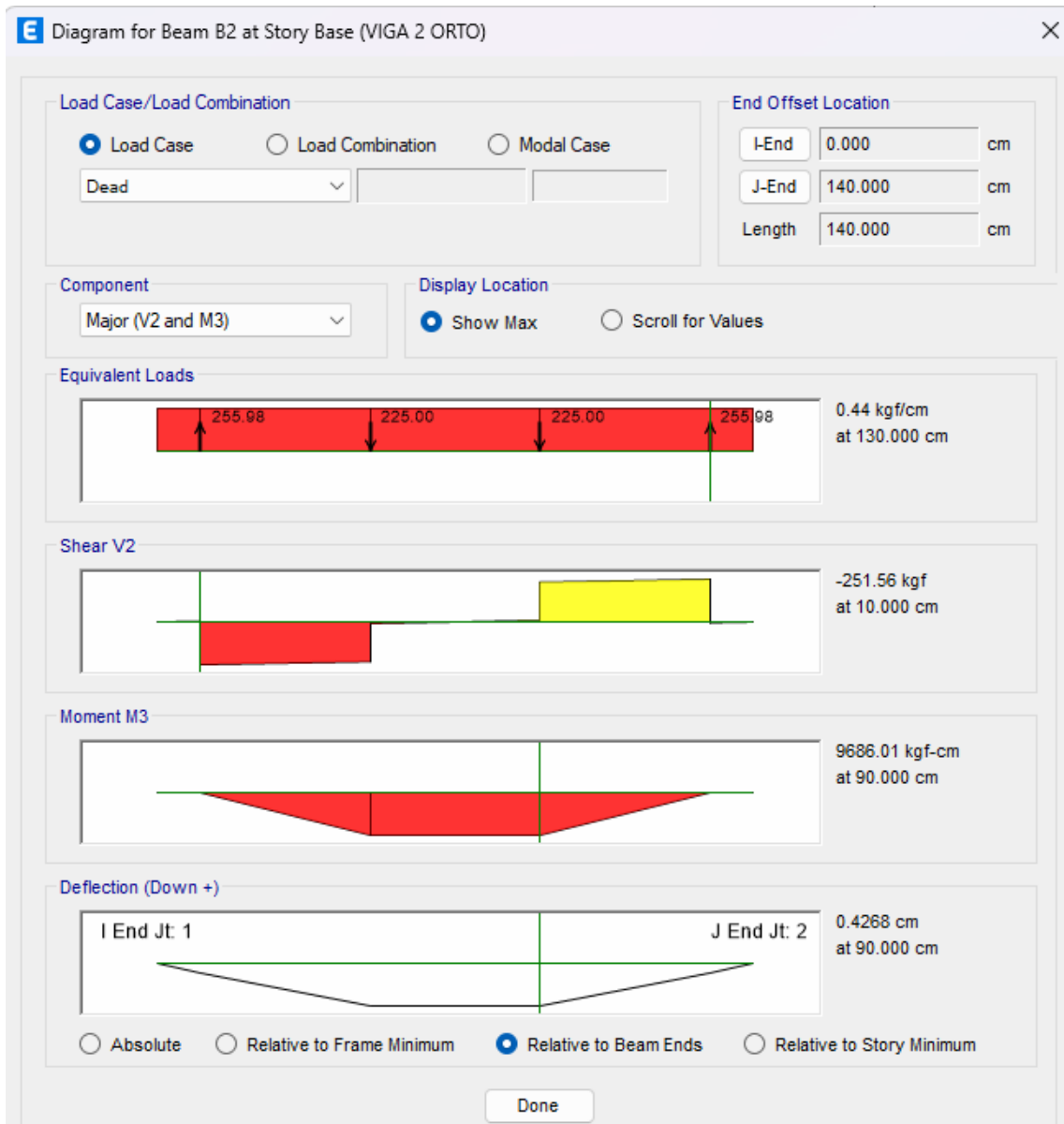
2.6. Probeta A02.2 con carga de 297,55 kgf/cm²



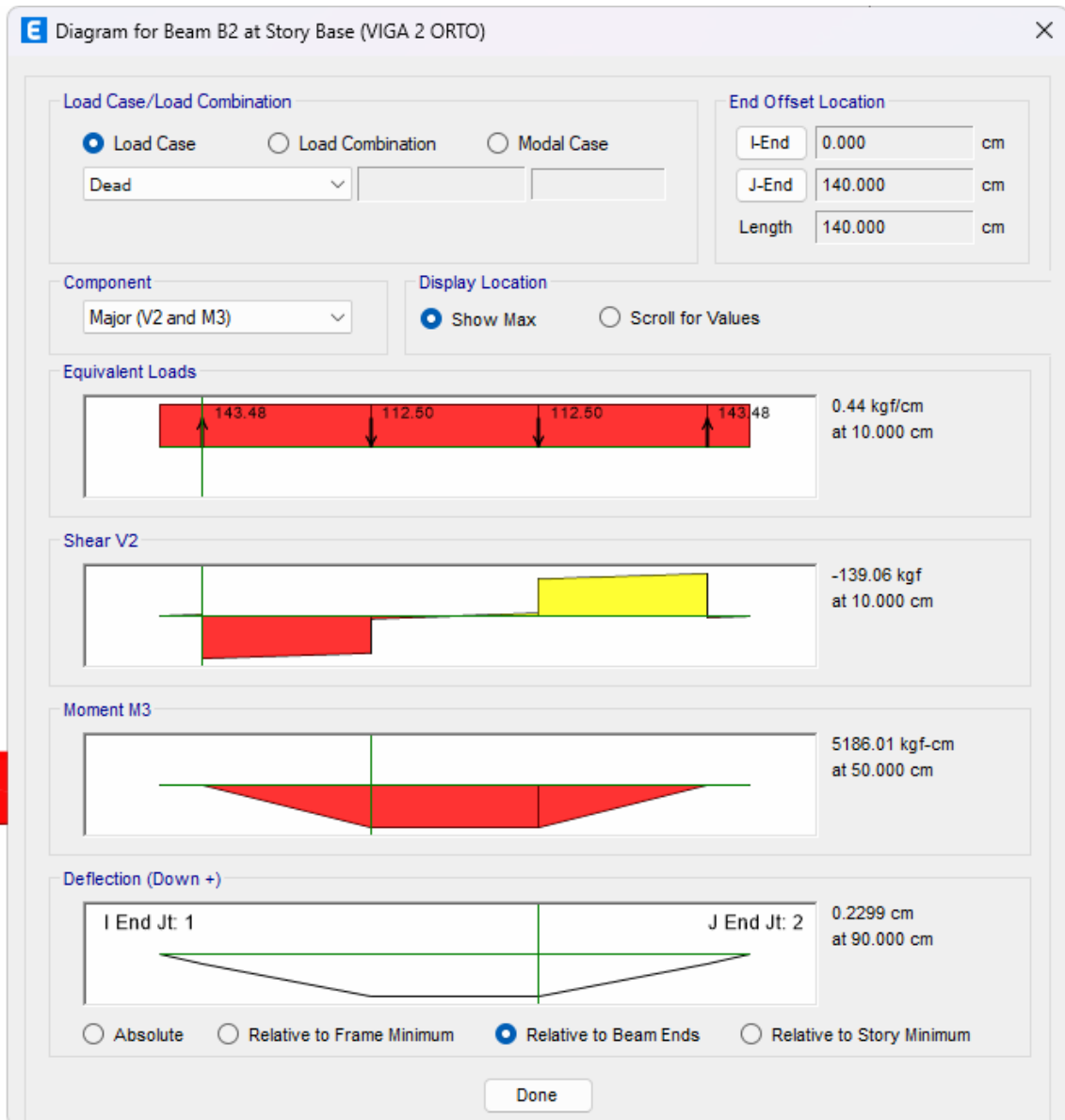
2.7. Probeta A03 con carga de 900 kgf/cm²



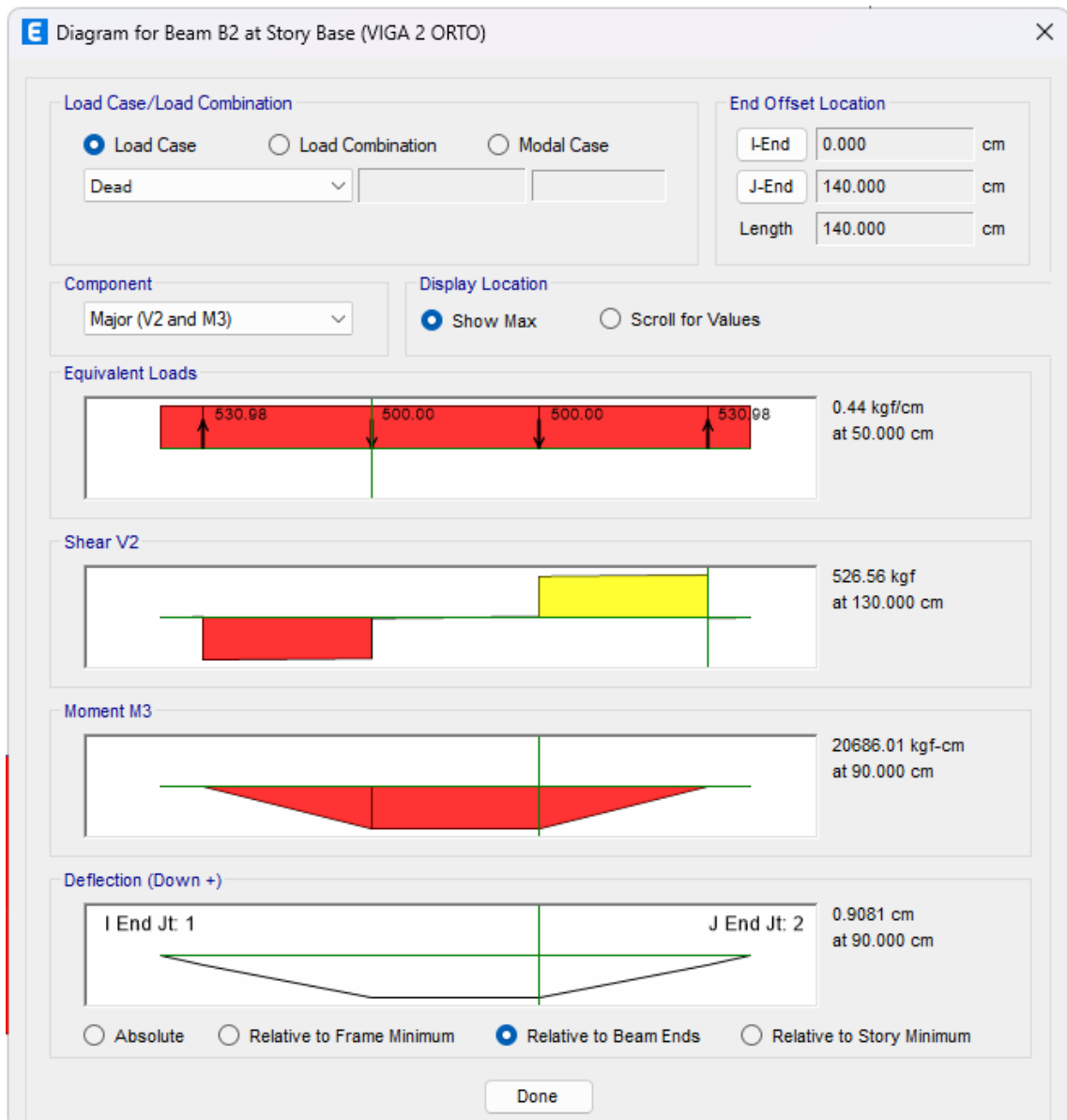
2.8. Probeta A03.1 con carga de 450 kgf/cm²



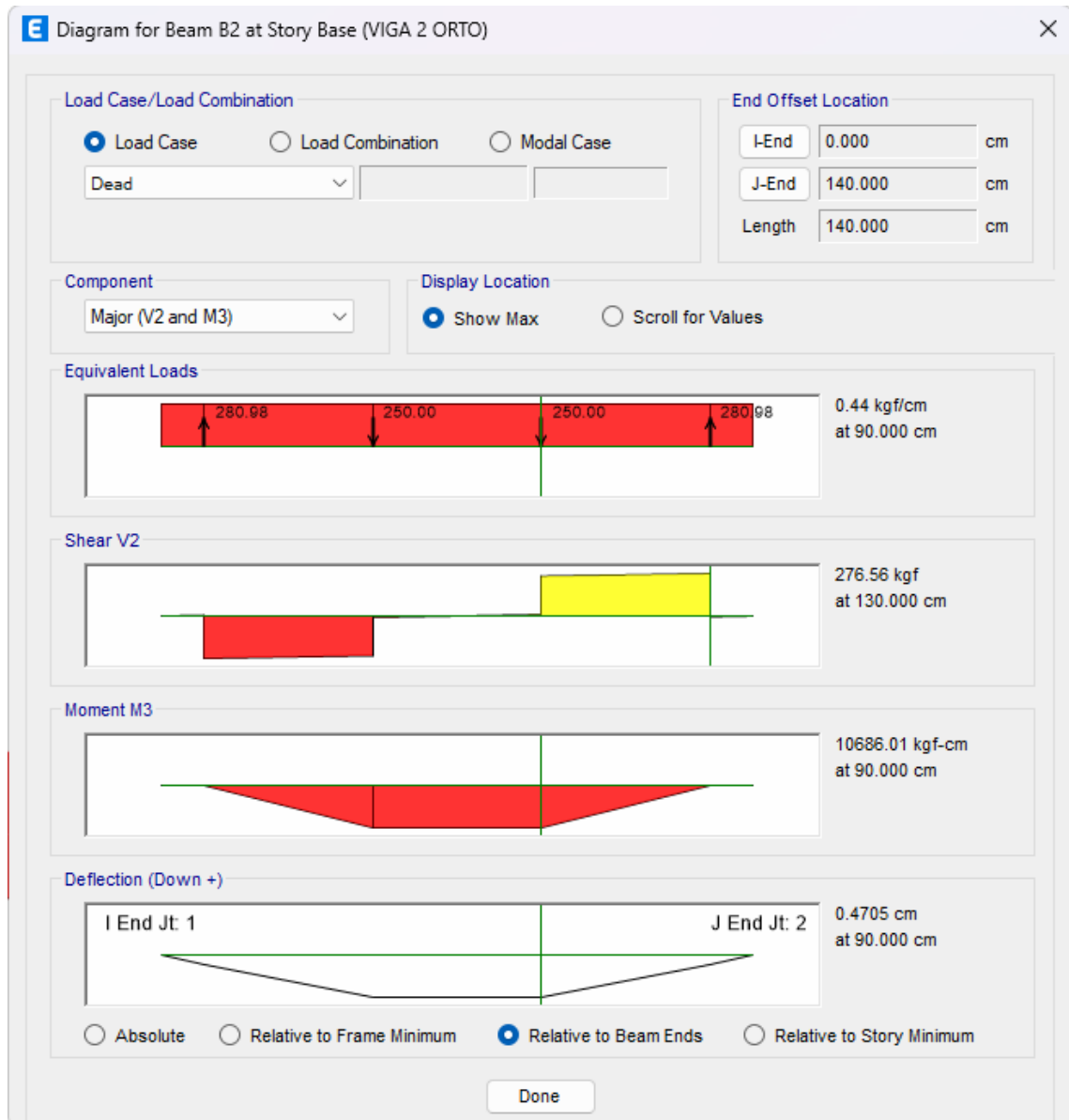
2.9. Probeta A03.2 con carga de 225 kgf/cm²



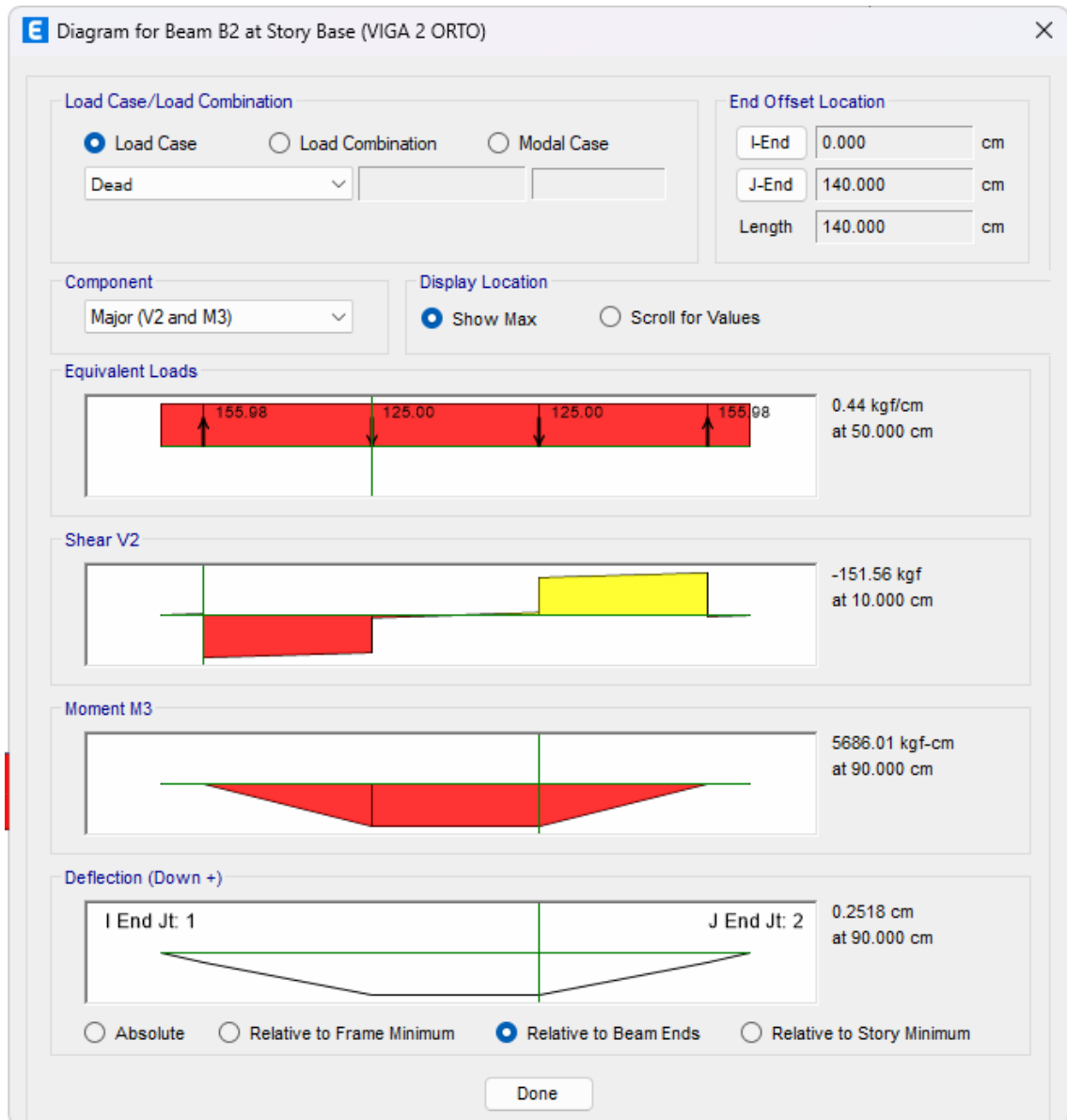
2.10. Probeta A04 con carga de 1000 kgf/cm²



2.11. Probeta A04.1 con carga de 500 kgf/cm²



2.12. Probeta A04.2 con carga de 250 kgf/cm²



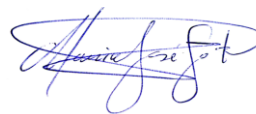
AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotras, **Lizbeth Carolina Neira Banegas** y **María José Soto Cárdenas** portadoras de las cédulas de ciudadanía N.º 0107621617 y 0106449721. En calidad de autoras y titulares de los derechos patrimoniales del proyecto de titulación **“Modelado ETABS de Estructuras de Viviendas con Elementos de Madera de Pino (Pinus Radiata)”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este proyecto de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 15 de abril de 2024



F:
Lizbeth Carolina Neira Banegas
0107621617



F:
María José Soto Cárdenas
0106449721