

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



ESTRUCTURAS DE MADERA APLICADAS AL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN EN EL PERÚ

Tesis para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta las bachilleres:

Ordoñez García, Patricia Katherine
Lugo Chávez, Yessenia Katerine

ASESOR: MSc. Luis Antonio Zegarra Ciquero

Lima, Abril de 2016

RESUMEN

Tomando como antecedente el bajo consumo de la madera como material estructural para la construcción debido a la escasa información actual sobre las propiedades de la misma en nuestro país, la presente memoria investiga el comportamiento de un sistema estructural en base a la madera.

Considerando que los bosques de nuestro país cubren una superficie de 73 millones de hectáreas, lo que representa el 57% de la superficie del territorio nacional y que el 30% del territorio nacional es apto para la extracción de madera, es posible decir que el Perú es un país potencialmente forestal. Bajo este escenario, resulta interesante evaluar a la madera como material estructural en un país como el Perú, donde se ha centralizado al hormigón y el adobe como materiales exclusivos para la construcción.

En una primera etapa de la presente investigación, se realizó ensayos mecánicos de flexión, resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra y resistencia al corte paralelo a la fibra aplicados a especímenes de madera (especie: Pino Radiata). Con estos resultados y evaluando el proceso de agrupamiento de la madera en el Perú, se verificó la posibilidad de clasificar esta especie en la NORMA E.010 MADERA. Los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas fueron comparados con las propiedades de especies nacionales con características similares. Esto con el fin de incentivar la promoción de nuevas especies diferentes a las actualmente comercializadas, lo que evitaría la extracción selectiva y la posible extinción de las más conocidas.

En una segunda etapa, se evaluó el comportamiento sísmico, aplicando la señal sísmica de mayo 1970 a un prototipo en escala real de una vivienda de tres pisos de madera. Dicho prototipo se construyó en base a entramados de madera compuestos por bastidores de pino radiata y cerramientos de paneles de OSB (Oriented Strand Board), fijados bajo un esquema de clavado específico. En esta etapa se pudo comprobar la excelente capacidad del entramado de madera para resistir carga horizontal (corte) debido al sismo. Finalmente se modeló el sistema con ayuda del software SAP 2000 para comparar los resultados con los experimentales.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Estructuras de Madera aplicadas al Sector de la Construcción en el Perú.
Área : Estructuras - Madera
Asesor : Luis Zegarra Ciquero
Alumno : PATRICIA KATHERINE ORDOÑEZ GARCIA
Código : 2008.0463.412
Alumno : YESSENIA KATERINE LUGO CHÁVEZ
Código : 2009.0240.412
Tema N° : 386
Fecha : Lima, 23 de noviembre 2015



1. RESUMEN

Se estudiará el comportamiento de la madera como sistema estructural. Se realizarán ensayos mecánicos a especímenes de Pino radiata para ver la posibilidad de clasificarlo en alguno de los grupos de maderas de la Norma Técnica E.010 MADERA. En una segunda fase se analizarán los resultados de un ensayo en la mesa vibradora de un modelo de tres pisos compuesto por bastidores de pino radiata y paneles de OSB.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

Antecedentes

En nuestro país hay escasa información sobre el empleo de maderas de nuestra región. Solo se cuenta con la información de la amplia investigación realizada por la Junta del Acuerdo de Cartagena sobre nuestras maderas tropicales.

Justificación

La presente Tesis debe presentar las razones por las que es conveniente el empleo de la madera como un material alternativo, diferente del concreto o la albañilería, para mitigar el déficit de viviendas existente en nuestro país.

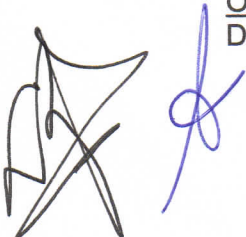
4. OBJETIVOS

Objetivo general

Promover el uso de la madera como material de construcción para viviendas en nuestro país, considerando el alto recurso forestal que existe en el Perú.

Objetivos específicos

Determinar si la especie Pino radiata es adecuada para la construcción en el Perú.



Analizar el agrupamiento de esta madera en los grupos de la Norma Técnica Peruana E.010.

Analizar el comportamiento sísmico de una vivienda de madera, mediante un ensayo en la mesa vibradora.

5. ALCANCES

Se determinarán las propiedades mecánicas del Pino radiata mediante ensayos. Se evaluará el comportamiento sísmico de un módulo de vivienda de tres pisos compuesto por bastidores de pino radiata y paneles de OSB, aplicando la señal sísmica de Mayo de 1970. Se preparará una Memoria con los resultados obtenidos.

6. METODOLOGIA Y PLAN DE TRABAJO

Se revisará la bibliografía referente a este tema.

Se estudiarán los antecedentes y estado actual de la producción y empleo de la madera en el Perú..

Se estudiarán las propiedades de la madera y el procedimiento para colocarla en uno de los grupos de la NTE E.010.

Se realizará el modelamiento y análisis del módulo de vivienda a ensayarse en la mesa vibradora y se compararán los resultados obtenidos.

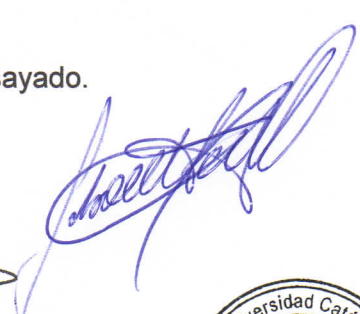
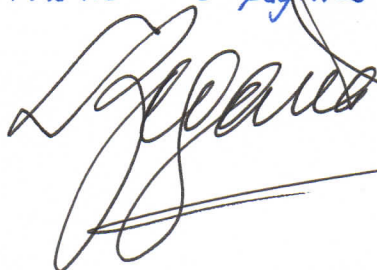
Plan de Trabajo

- Revisión de la bibliografía existente.
- Estudio de las propiedades del Pino radiata.
- Proceso de industrialización de las viviendas de madera.
- Análisis en computadora del módulo de vivienda de tres pisos.
- Análisis de los resultados del ensayo en la mesa vibradora.
- Conclusiones y Recomendaciones.

7. PRODUCTOS A ENTREGAR

- Memoria de cálculo.
- Planos del módulo de vivienda ensayado.

Máximo: 100 páginas



AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría que estas líneas sirvieran para expresar nuestro más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo.

En primer lugar, agradecemos a nuestras queridas familias quienes a lo largo de nuestras vidas han apoyado y motivado nuestra formación académica. También expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a nuestro asesor MSc. Luis Zegarra Ciquero por su apoyo y asesoramiento del presente estudio; al PhD. Hugo Scaletti, quien con su ayuda desinteresada, nos brindó tiempo e información relevante y de vital importancia, al Ing. Edgar Barreto por mostrar especial interés en nuestra tesis, apoyándonos en todo momento; a nuestros queridos profesores la Ing. Gladys Villagarcía y el Ing. Cesar Huapaya, a quienes les debemos parte de los conocimientos fundamentales con los que hoy contamos, gracias por el apoyo brindado y finalmente dirigimos un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual abre sus puertas a jóvenes como nosotras, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

A todos ustedes, nuestro mayor reconocimiento y gratitud.

DEDICATORIA

A Dios, Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud y la fuerza para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor,

A mi madre, quien ha sabido formarme con buenos sentimientos y valores pero sobretodo con amor, mostrándome siempre su apoyo incondicional,

A mi padre, por ser el pilar y ejemplo fundamental en mi vida,

A mi mejor amigo, Hualpita, por apoyarme siempre en cada paso importante en mi vida y finalmente,

A mi novio, Richard, compañero inseparable de cada jornada, quien no solo representa para mí el amor de pareja sino el tesón en momentos de decline y cansancio.

“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar.” - Thomas Chalmers.

Patricia Ordoñez García

DEDICATORIA

A Dios, Por haberme dado la vida y permitirme dar este paso importante en mi formación profesional. Gracias Señor, por tu infinita misericordia e incomparable amor. Sigue guardándome como a la niña de tus ojos y sustentando mis pasos en tus caminos, para que mis pies no resbalen.

A mi madre, por ser el pilar más importante en mi vida y demostrarme siempre su amor y apoyo incondicional. Gracias por ser ejemplo digno de imitar. Doy gracias a Dios, por bendecirme con una madre como tú. ¡Te amo mamá!

A mi padre, por estar presente en mi vida, apoyándome y brindándome su comprensión y amor. Gracias porque a pesar de la distancia física que existe, estás presente cuando te necesito y finalmente,

A mi hijo, mi compañerito eterno, mi más hermosa bendición y mi fuente de inspiración y motivación para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor, sostenido siempre bajo la mano de Dios, nuestro Padre Celestial.

“Y todo lo que hacéis, sea de palabra o de hecho, hacedlo todo en el nombre del Señor Jesús, dando gracias a Dios Padre por medio de él.”

Colosenses 3:17

Yessenia Lugo Chávez

CONTENIDO

RESUMEN	1
AGRADECIMIENTOS	2
DEDICATORIA	3
DEDICATORIA	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
LIMITACIONES DEL ESTUDIO	2
JUSTIFICACIÓN	3
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	4
1.1. ANTECEDENTES GENERALES	4
1.2. LA MADERA EN EL PERU: SITUACION FORESTAL ACTUAL.....	5
1.2.1. PRODUCCIÓN DE MADERA	5
1.2.2. ESPECIES Y USOS PROBABLES DE LA MADERA EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.	12
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	13
2.1. INTRODUCCIÓN: GENERALIDADES DE LA MADERA.....	13
2.2. PROPIEDADES FISICAS.....	13
2.2.1. CONTENIDO DE HUMEDAD (CH)	13
2.2.2. DENSIDAD BÁSICA	15
2.3. PROPIEDADES MECANICAS DE LA MADERA.....	15
2.3.1. RESISTENCIA A LA COMPRESION PARALELA.....	15
2.3.2. RESISTENCIA A LA COMPRESION PERPENDICULAR	15
2.3.3. RESISTENCIA AL CORTE.....	16
2.3.4. RESISTENCIA A LA FLEXION.....	16
2.4. PROPIEDADES ELASTICAS DE LA MADERA.....	17
2.4.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD (Ef).....	17
2.4.2. MÓDULO DE CORTE (G).....	18
2.5. AGRUPAMIENTO DE ESPECIES SEGÚN SUS PROPIEDADES MECANICAS: COMPARATIVO DEL PROCESO EN PERU Y CHILE.....	18
2.5.1. PROCESO DE AGRUPAMIENTO ESTRUCTURAL EN PERU: (NTP. E.010)	19
2.5.2. PROCESO DE AGRUPAMIENTO EN CHILE	20
2.6. COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE LA MADERA COMO MATERIAL ESTRUCTURAL.....	22
2.6.1. INTRODUCCIÓN: SISMICIDAD EN EL PERU	22

2.6.2.	<i>NIVELES DE DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE</i>	22
2.6.3.	<i>RELACIÓN DAÑO – DERIVA</i>	23
2.6.4.	<i>LA MADERA FRENTE A UN MOVIMIENTO SÍSMICO</i>	23
2.6.5.	<i>DESEMPEÑO DE ENTRAMADOS DE MADERA FRENTE A SISMOS</i>	27
CAPÍTULO 3 ENTRAMADO DE MADERA PARA MODULO EN ESTUDIO		30
3.1.	<i>PROPIEDADES DEL BASTIDOR: PINO RADIATA</i>	30
3.2.	<i>PROPIEDADES DEL TABLERO DE RECUBRIMIENTO</i>	30
3.3.	<i>ELEMENTOS CONSTITUYENTES DEL ENTRAMADO DE MADERA</i>	31
3.4.	<i>PROPIEDADES DE LAS UNIONES</i>	32
3.4.1.	<i>DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA UNIÓN DEL MURO A LA FUNDACIÓN.</i>	33
3.4.2.	<i>DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA UNIÓN ENTRE PIES DERECHOS Y SOLERAS.</i>	33
3.4.3.	<i>DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA UNIÓN BASTIDOR-TABLERO.</i>	34
CAPÍTULO 4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN MÓDULO DE MADERA		36
4.1.	<i>PREPARACIÓN DEL PISO</i>	36
4.1.1.	<i>ESTRUCTURA</i>	36
4.1.2.	<i>INSTALACIONES SANITARIAS</i>	37
4.2.	<i>PREPARACIÓN DE MUROS</i>	38
4.2.1.	<i>ESTRUCTURA</i>	38
4.2.2.	<i>INSTALACIONES ELÉCTRICAS Y SANITARIAS</i>	39
4.2.3.	<i>UNIONES</i>	39
4.2.4.	<i>CERRAMIENTOS</i>	40
4.2.5.	<i>TRANSPORTE Y ENSAMBLAJE</i>	41
CAPÍTULO 5 ENSAYOS APLICADOS AL PINO RADIATA PARA DETERMINAR SUS PROPIEDADES		43
5.1.	<i>PROPIEDADES FÍSICAS</i>	43
5.1.1.	<i>DENSIDAD BÁSICA</i>	43
5.2.	<i>PROPIEDADES MECÁNICAS</i>	43
5.2.1.	<i>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELA</i>	44
5.2.2.	<i>RESISTENCIA A LA COMPRESION PERPENDICULAR</i>	44
5.2.3.	<i>RESISTENCIA AL CORTE</i>	44
5.2.4.	<i>RESISTENCIA A LA FLEXION</i>	45
5.3.	<i>PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LA MADERA</i>	45
5.3.1.	<i>MÓDULO DE ELASTICIDAD (E)</i>	45
5.3.2.	<i>MÓDULO DE CORTE (G)</i>	47
5.4.	<i>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES</i>	47
5.4.1.	<i>PROPIEDADES MECANICAS DE LA ESPECIE</i>	47
5.4.2.	<i>AGRUPAMIENTO DE LA MADERA</i>	50

CAPÍTULO 6 COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UNA VIVIENDA DE MADERA DE 3 PISOS	52
6. ENSAYO DE SIMULACIÓN SÍSMICA DE UNA VIVIENDA DE MADERA DE 3 PISOS	52
6.1. CARACTERÍSTICAS.....	52
6.1.1. MURO EXTERIOR E INTERIOR (DIVISORIOS):	52
6.1.2. TECHO	52
6.1.3. PLATAFORMA DE PISOS.....	53
6.2. DIMENSIONES, MODULACIÓN, PESO.....	53
6.3. ESQUEMA FÍSICO DEL PROYECTO	53
6.4. EQUIPO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTACION.....	57
6.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MESA VIBRADORA.....	57
6.4.2. INSTRUMENTACION DE SENSORES.....	57
6.5. EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS	57
6.5.1. VIBRACIÓN LIBRE.....	57
6.5.2. SEÑAL SÍSMICA	57
6.5.3. FASES DE LOS ENSAYOS.....	58
CAPÍTULO 7 ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	60
7. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS MÓDULOS.....	60
7.1. RESPUESTA EN VIBRACION LIBRE	60
7.1.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO	62
7.1.2. DETERMINACIÓN DEL PERIODO NATURAL DE VIBRACION.....	63
7.2. RESPUESTA EN ENSAYO DINÁMICO	64
7.2.1. FASE 1 ($A_0 = 0.25g$):.....	64
7.2.2. FASE 2 ($A_0 = 0.50g$):.....	65
7.2.3. FASE 3 ($A_0 = 0.90g$).....	66
7.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	67
7.3.1. VALORES MÁXIMOS.....	67
7.3.2. FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICO (F.A.D.).....	68
7.3.3. PERIODO DE VIBRACIÓN Y COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO.....	68
7.3.4. CORTANTE BASAL MAXIMA VS. DESPLAZAMIENTO RELATIVO	69
7.3.5. DERIVA MÁXIMA DE ENTREPISO.....	71
CAPÍTULO 8 MODELAMIENTO DEL MODULO ENSAYADO MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA SAP2000	72
8. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS ANALITICOS	72
8.1. SUPUESTOS DE MODELACIÓN	72
8.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	73
8.3. SECCIONES	74
8.4. APOYOS.....	76
8.5. CARGAS.....	77
8.6. SEÑAL SÍSMICA.....	78
8.7. RESULTADOS.....	80
CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS.....	82
BIBLIOGRAFÍA	88

TABLAS DE ILUSTRACIONES Y GRÁFICOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

<i>ILUSTRACIÓN 1. 1 CUADRO ESTADÍSTICO DEL DÉFICIT HABITACIONAL EN EL PERÚ, INEI 2007 ..</i>	5
<i>ILUSTRACIÓN 1. 2 PRODUCCIÓN DE MADERA EN EL PERÚ EN EL 2012. DGFFS MINISTERIO DE AGRICULTURA.....</i>	6
<i>ILUSTRACIÓN 1. 3 IMPORTANCIA RELATIVA DE LA EXTRACCIÓN DE MADERA ROLLIZA EN BOSQUES NATURALES Y EN PLANTACIONES EN CHILE Y PERÚ</i>	10

CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO

<i>ILUSTRACIÓN 2. 1 DIAGRAMA DE RANGOS DE HUMEDAD DONDE OCURREN CAMBIOS DIMENSIONALES Y DE RESISTENCIA FUENTE: GONZÁLEZ, 2008</i>	14
<i>ILUSTRACIÓN 2. 2 PROBETA DE CORTE PARALELA. MÉTODO DE LA NTP 251.013:2004.</i>	16
<i>ILUSTRACIÓN 2. 3 ESPÉCIMEN PARA ENSAYO DE FLEXIÓN ESTÁTICA.....</i>	17
<i>ILUSTRACIÓN 2. 4 DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS SOBRE UNA ESTRUCTURA EN RESPUESTA A UN MOVIMIENTO SÍSMICO.....</i>	23
<i>ILUSTRACIÓN 2. 5 MURO DE CORTE DE ESTRUCTURA DE MADERA. APA-THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION.</i>	25
<i>ILUSTRACIÓN 2. 6 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN CRIPPLE WALLS.</i>	29

CAPÍTULO 3. ENTRAMADO DE MADERA PARA ESPECIE EN ESTUDIO

<i>ILUSTRACIÓN 3. 1 DIAFRAGMA RIGIDIZADO POR PLACA.....</i>	31
<i>ILUSTRACIÓN 3. 2 UNIONES METÁLICAS DE LA SOLERA INFERIOR DEL PRIMER MÓDULO CON LA FUNDACIÓN</i>	33
<i>ILUSTRACIÓN 3. 3 UNIONES DE ENTRE LOS PIES DERECHOS Y SOLERAS.....</i>	34
<i>ILUSTRACIÓN 3. 4 UNIÓN BASTIDOR – TABLERO.....</i>	34

CAPÍTULO 4. INDUSTRIALIZACION DE LA VIVIENDA DE MADERA: CASO MODULAR

<i>ILUSTRACIÓN 4. 1 PROCESO CONSTRUCTIVO DEL ARMADO DE LOS PISOS.....</i>	38
<i>ILUSTRACIÓN 4. 2 DETALLE DE ANCLAJE DEL MÓDULO A LA CIMENTACIÓN (CORTE).....</i>	39
<i>ILUSTRACIÓN 4. 3 DETALLE DEL ÁNGULO METÁLICO DE FIJACIÓN (PL1)</i>	39
<i>ILUSTRACIÓN 4. 4 DETALLE DE LA UNIÓN ENTRE NIVELES; MÓDULOS APILADOS</i>	40
<i>ILUSTRACIÓN 4. 5 PROCESO CONSTRUCTIVO DEL ARMADO DE LAS PAREDES.</i>	41

CAPÍTULO 5. COMPORTAMIENTO MECANICO Y FISICO DEL PINO RADIATA

<i>GRÁFICO 5. 1 MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA EL ESPÉCIMEN 01.....</i>	46
<i>GRÁFICO 5. 2 MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA EL ESPÉCIMEN 02.....</i>	46
<i>GRÁFICO 5. 3 MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA EL ESPÉCIMEN 03.....</i>	46
<i>GRÁFICO 5. 4 ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA.....</i>	48

GRÁFICO 5. 5 ENSAYO DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA 6.....	48
GRÁFICO 5. 6 ENSAYO AL CORTE PARALELO A LA FIBRA.....	49
GRÁFICO 5. 7 ENSAYO DE FLEXIÓN.....	49

CAPÍTULO 6. COMPORTAMIENTO MECANICO Y FISICO DEL PINO RADIATA

ILUSTRACIÓN 6. 1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS TÍPICAS (EN PLANTA) DE LOS MÓDULOS.....	54
ILUSTRACIÓN 6. 2 PLANOS DEL MÓDULO A ENSAYAR. ESTRUCTURA MURO. LADO SUR.	54
ILUSTRACIÓN 6. 3 PLANOS DEL MÓDULO A ENSAYAR. ESTRUCTURA PISO.	54
ILUSTRACIÓN 6. 4 PLANOS DEL MÓDULO A ENSAYAR. ESTRUCTURA TECHO.....	54
ILUSTRACIÓN 6. 5 FOTO DEL MÓDULO REAL. PROCESO DE COLOCACIÓN DE CARGA VIVA EN EL 3ER NIVEL.....	55
ILUSTRACIÓN 6. 6 DETALLES DE ELEMENTOS QUE COMPONEN EL SISTEMA DE ENTRAMADO DE MADERA	56
ILUSTRACIÓN 6. 7 DISTRIBUCIÓN DE ACELERÓMETROS Y LVDT'S EN EL MÓDULO.....	59

CAPÍTULO 7. ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

ILUSTRACIÓN 7. 1 ESQUEMA DEL DECREMENTO LOGARÍTMICO PARA UNA SEÑAL.	62
ILUSTRACIÓN 7. 2 DISTRIBUCIÓN DE SENSORES EN EL MÓDULO ENSAYADO	64
ILUSTRACIÓN 7. 3 FASE 3. DESCUADRAMIENTO DE LAS UNIONES DE LA CONEXIÓN CIMENTACIÓN- MÓDULO.....	66
GRÁFICO 7. 1 DESPLAZAMIENTO DE LA PLATAFORMA DE LA MESA EN CADA FASE PARA EL MÓDULO DE MADERA DE TRES PISOS.	60
GRÁFICO 7. 2 ACELEROGRAMA DE LAS TRES FASES REGISTRADAS EN LA MESA VIBRATORIA PARA EL MÓDULO DE MADERA DE TRES PISOS.	61
GRÁFICO 7. 3 SEÑAL REGISTRADA DURANTE LA VIBRACIÓN LIBRE PARA EL ENSAYO.	62
GRÁFICO 7. 4 VARIACIÓN DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN POR FASE.....	68
GRÁFICO 7. 5 CORTANTE BASAL MÁXIMA –VS- DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS RESPECTO A SUELO.	70

CAPÍTULO 8. MODELAMIENTO DEL MODULO ENSAYADO MEDIANTE EL SAP

ILUSTRACIÓN 8. 1 ASIGNACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA MADERA OSB EN TONF Y M.	73
ILUSTRACIÓN 8. 2 ASIGNACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA MADERA PINO RADIATA EN TONF Y M	73
ILUSTRACIÓN 8. 3 ASIGNACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA MADERA OSB TECHO EN TON Y M....	74
ILUSTRACIÓN 8. 4 ASIGNACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ACERO EN TONF Y M.....	74
ILUSTRACIÓN 8. 5 SECCIONES TIPO FRAME.....	74
ILUSTRACIÓN 8. 6 ASIGNACIÓN DE LAS SECCIONES DE ÁREA PARA LA CUBIERTA DE MURO, PISO Y TECHO DEL 3ER PISO (UNIDADES EN M).....	75
ILUSTRACIÓN 8. 7: ESQUEMAS Y VISTAS	76
ILUSTRACIÓN 8. 8 ASIGNACIÓN DEL PESO PROPIO DE LA ESTRUCTURA.....	77

<i>ILUSTRACIÓN 8. 9 ASIGNACIÓN DE LA CARGA VIVA.....</i>	<i>77</i>
<i>ILUSTRACIÓN 8. 10 CARGA SÍSMICA SEGÚN NORMA PERUANA E.030.....</i>	<i>78</i>
<i>ILUSTRACIÓN 8. 11 ACELEROGRAMA DEL SISMO DE MAYO DE 197.....</i>	<i>78</i>
<i>ILUSTRACIÓN 8. 12 DEFINICIÓN DE CASOS DE CARGAS</i>	<i>79</i>
<i>ILUSTRACIÓN 8. 13 DEFINICIÓN DE LA FASES.....</i>	<i>79</i>

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

<i>ILUSTRACIÓN 9. 1 (IZQUIERDA) ESCUADRA METÁLICA UTILIZADA EN EL ENSAYO.....</i>	<i>86</i>
---	-----------

INDICE DE TABLAS

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

<i>TABLA 1. 1 PRODUCCIÓN DE LA MADERA ASERRADA EN EL PERÚ EN EL PERIODO 1997-2013.</i>	<i>7</i>
<i>TABLA 1. 2 PRODUCCIÓN DE LA MADERA ASERRADA SEGÚN ESPECIES EN EL PERÚ.....</i>	<i>7</i>
<i>TABLA 1. 3 EXPORTACIÓN DE LA MADERA ASERRADA EN EL PERÚ.</i>	<i>8</i>
<i>TABLA 1. 4 IMPORTACIÓN DE LA MADERA ASERRADA EN EL PERÚ.....</i>	<i>9</i>
<i>TABLA 1. 5 MATERIALES PREDOMINANTES PARA LA VIVIENDA EN EL PERÚ, INEI 2007.</i>	<i>11</i>

CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO

<i>TABLA 2. 1 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA NTP. E010, SEGÚN SU DENSIDAD BÁSICA.</i>	<i>19</i>
<i>TABLA 2. 2 AGRUPAMIENTO DE ESPECIES PERUANAS SEGÚN PROPIEDADES MECÁNICAS CONOCIDAS. NTP E010.</i>	<i>20</i>
<i>TABLA 2. 3 AGRUPAMIENTO DE ESPECIES CHILENAS PARA PROPIEDADES MECÁNICAS</i>	<i>20</i>
<i>TABLA 2. 4 CRITERIOS A SEGUIR CUANDO LOS GRUPOS RESULTANTES SON DIFERENTES ENTRE SÍ. NORMA CHILENA</i>	<i>21</i>
<i>TABLA 2. 5 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL SEGÚN SEAOC PARA DETERMINADAS ACELERACIONES.....</i>	<i>22</i>
<i>TABLA 2. 6 NIVELES Y DAÑO DE COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL - ELEMENTOS VERTICALES....</i>	<i>23</i>
<i>TABLA 2. 7 PERFORMANCE OF WOOD-FRAME CONSTRUCTION IN EARTHQUAKES.....</i>	<i>27</i>

CAPÍTULO 3. ENTRAMADO DE MADERA PARA ESPECIE EN ESTUDIO

<i>TABLA 3. 1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE ESPECIES MADERERAS CHILENAS. ESTADO SECO. CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA PINO RADIATA 2003.....</i>	<i>30</i>
---	-----------

CAPÍTULO 5. COMPORTAMIENTO MECANICO Y FISICO DEL PINO RADIATA

<i>TABLA 5. 1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD BÁSICA PARA UN ESPÉCIMEN DE PINO RADIATA. LABORATORIO DE ESTRUCTURAS PUCP.</i>	<i>43</i>
<i>TABLA 5. 2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA.</i>	<i>44</i>
<i>TABLA 5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA.....</i>	<i>44</i>
<i>TABLA 5.4 RESISTENCIA AL CORTE PARALELO A LA FIBRA.</i>	<i>45</i>

TABLA 5. 5 RESISTENCIA DE FLEXIÓN	45
TABLA 5. 6 AGRUPAMIENTO DE LA ESPECIE PINO RADIATA PERUANAS SEGÚN PROPIEDADES MECÁNICAS CONOCIDAS	50
TABLA 5. 7 AGRUPAMIENTO DE LA ESPECIE PINO RADIATA PERUANAS SEGÚN NORMA CHILENA.	51

CAPÍTULO 6. COMPORTAMIENTO MECANICO Y FISICO DEL PINO RADIATA

TABLA 6. 1 CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO ENSAYADO.....	53
TABLA 6. 2 PESO REGISTRADO DE LOS MÓDULOS (KGR).....	53
TABLA 6. 3 EQUIVALENCIA DE INTENSIDADES MMI CON VALORES NOMINALES DE ACELERACIÓN (AO) Y DE AMPLIFICACIÓN DE LA MESA VIBRADORA (DO).....	58

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

TABLA 7. 1 SOLICITACIONES MÁXIMAS REGISTRADAS EN LA MESA VIBRADORA	67
TABLA 7. 2 ACELERACIONES Y DESPLAZAMIENTOS ABSOLUTOS MÁXIMAS EN EL MÓDULO.	67
TABLA 7. 3 PERIODOS NATURALES EN VIBRACIONES LIBRES EN EL MÓDULO.	68
TABLA 7. 4 COEFICIENTES DE AMORTIGUAMIENTO EN VIBRACIONES LIBRES EN EL MÓDULO.....	69
TABLA 7. 5 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS MÁXIMOS PARA CADA SENSOR DE DESPLAZAMIENTO POR FASE. FUERZA CORTANTE EN CADA FASE.	70
TABLA 7. 6 DERIVA DE ENTREPISO POR FASE.	71

CAPÍTULO 8. MODELAMIENTO DEL MODULO ENSAYADO MEDIANTE EL SAP

TABLA 8. 1 PERIODOS Y FRECUENCIAS DEL MODELO ANALÍTICO	80
TABLA 8. 2 ACELERACIONES MÁXIMAS EN LOS ACELERÓMETROS A4, A5 Y A6.....	81

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

TABLA 9. 1 COMPARATIVO DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA ESPECIE PERUANA Y EL PINO RADIATA	83
TABLA 9. 2 RESUMEN DE RESULTADOS DE PROPIEDADES DINÁMICAS EN ENSAYO SÍSMICO.	84
TABLA 9. 3 TORSIÓN PARA CADA PISO CORRESPONDIENTE A LAS FASES DEL ENSAYO.....	85

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Perú existe una necesidad de mejoramiento de la vivienda, denominado déficit cualitativo, que afecta al 74 % de la población (INEI 2007). Es decir, en una gran mayoría de casos, las viviendas ya existen pero las condiciones de habitabilidad son inadecuadas. El presente estudio analiza la posibilidad de utilizar la madera como elemento estructural alternativo, diferente del hormigón o mampostería, para mitigar dicha situación.

Las investigaciones y datos acerca del comportamiento físico y mecánico de la madera no se tienen en cuenta por parte de los ingenieros, ya que los conocimientos de las técnicas empleadas al trabajar con éste material, los adquieren empíricamente¹. Hasta el presente trabajo, no se ha podido encontrar estudios y ensayos que compilen el comportamiento de las especies de madera con fines estructurales en nuestro país, así como su comportamiento frente a un eventual sismo.

¹ (Keenan, 1987)

OBJETIVO GENERAL

Proponer a la madera como material de construcción en un país con alto recurso forestal como el Perú, comprobando su buen comportamiento mecánico y sísmico según ensayos experimentales.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar si la especie pino radiata es adecuada para constituir el sistema constructivo basado en entramados de madera.
- Analizar las propiedades físicas y mecánicas de la especie Pino Radiata.
- Analizar, comparar y evaluar ensayos de propiedades mecánicas según la NTP E.010.
- Analizar el agrupamiento de la madera según la normativa peruana y chilena, con el fin de verificar la posibilidad de agrupar al Pino Radiata en el Perú.
- Analizar el comportamiento de un prototipo de vivienda de madera a escala real frente a solicitaciones sísmicas mediante un ensayo en el Laboratorio de estructuras PUCP.
- Contrastar el comportamiento del modelo numérico, modelado en programa SAP2000, con el modelo físico ensayado.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO

- La selección de materiales, el diseño estructural y los planos del prototipo de vivienda analizado, ya se encontraban definidos por la empresa de construcciones modulares financiante antes del inicio del presente estudio. Dicha empresa nos permitió estar presente durante los ensayos y de procesar la información necesaria a fin de realizar esta investigación.
- Únicamente se evaluará el comportamiento estructural y sísmico de una vivienda modular de 3 pisos a base de pino radiata y OSB. No se podrá definir con exactitud si resulta ventajoso construir una vivienda de madera en comparación a la construida con materiales tradicionales debido a que no se ha realizado un análisis exhaustivo de la viabilidad que incluye el análisis de costos, accesibilidad del recurso (madera) y tiempo.
- Además se deberá profundizar, en estudios posteriores a este, sobre el comportamiento de la madera frente al fuego, el confort térmico y acústico y el tratamiento respectivo frente a posibles ataques de insectos.

JUSTIFICACIÓN

La extensión del uso de la madera en la construcción de vivienda, tiene diferentes razones básicas, entre las cuales se encuentran:

- Facilidad de construcción con madera; ya que con un mínimo equipo se alcanzan grandes rendimientos y como consecuencia bajos costos en construcción, así se vuelve altamente competitiva ante cualquier material. Los elementos estructurales ensamblados a partir de piezas de madera, son igual o más competitivos que los sistemas rápidos de construcción como mampostería reforzada, casas prefabricadas de concreto y construcción con elementos metálicos.
- Según sus características, la madera y los materiales derivados de esta, se presentan como alternativa inmejorable para la construcción habitacional de calidad. Siendo algunas de sus ventajas las siguientes:
 - i) Versátil, es posible optimizar el ensamble, manejo y armado en terreno para la construcción;
 - ii) El confort y la estética del material a partir de su calidez, es de vital importancia en su uso.
 - iii) Excelente comportamiento sísmico, debido a la baja densidad que posee, siendo más liviano que otros materiales convencionales;
 - iv) Adecuado comportamiento frente al fuego, debido a la baja velocidad de carbonización, lo que permite conservar sus propiedades frente a elevadas temperaturas y a medida que se inflama.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

La madera ha sido uno de los principales materiales utilizados para fines estructurales. Además, se ha constituido como el único recurso natural renovable que posee buenas propiedades estructurales en el transcurso del tiempo.

Hoy en día, se observa un interés creciente por este material que obedece en gran parte a su naturaleza viva. Este interés se basa principalmente en el bajo consumo de energía que requiere su transformación como material de construcción, lo cual resulta ventajoso frente a otros materiales en respuesta a un escenario actual de una crisis energética y una progresiva contaminación ambiental.

Entre las principales limitaciones que presenta el uso y comercialización de las viviendas de madera, se encuentran la calidad e imagen que se ha ido desarrollando en base a apreciaciones erróneas y en gran medida infundadas en todos los niveles socio-económicos de nuestra sociedad, relativos al riesgo de incendio, a la destrucción prematura por pudrición y a un carácter temporal y provisorio.

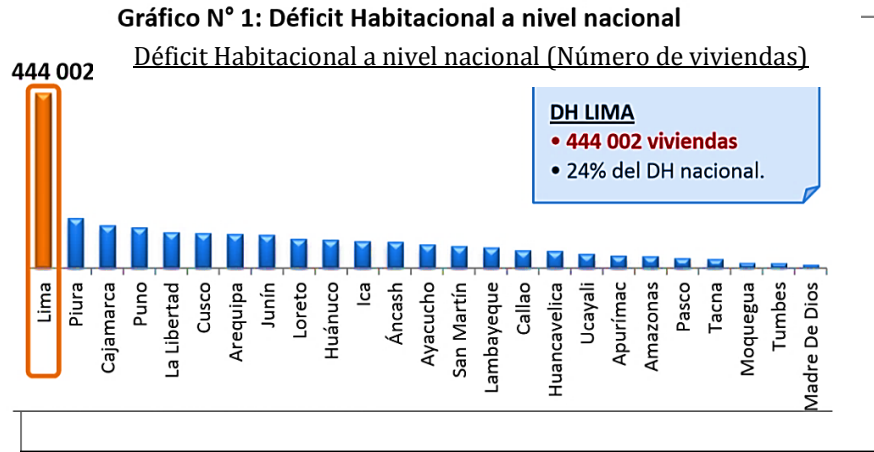
Sin embargo, en la mayoría de los países desarrollados se alcanzan niveles altísimos porcentuales del uso de la madera como material estructural. Por ejemplo, Estados Unidos y Canadá alcanzan el 90% y en Nueva Zelanda el 60% del total de viviendas². Además existe una relación directa entre las viviendas de madera con el confort y la seguridad que proporcionan. En contraste a países como el nuestro, donde una vivienda de madera se relaciona con la idea de algo provisorio, de mala calidad y poco durable.

En paralelo a esta situación, el déficit habitacional en nuestro país, que da cuenta de la problemática en que se encuentra parte de las viviendas habitadas existentes en el país. Según INEI 2007, el Perú cuenta con un 24% de déficit del total de viviendas en el país. Al observar la *Ilustración 1.1* se concluye que el departamento de Lima es el que presenta un mayor déficit habitacional con 444 mil viviendas, seguido de Piura con 127 mil 776 viviendas, Cajamarca con 108 mil 361 viviendas, Puno con 103 mil 800 viviendas y La Libertad con 91 mil 340 viviendas. Otros departamentos con valores de déficit habitacional elevados son: Cusco con 88 mil 718 viviendas, Arequipa con 86 mil 817 viviendas y Junín

² (Jacobo G. J.)

con 84 mil 734 viviendas. En el otro extremo los departamentos con menor déficit habitacional son: Moquegua con 13 mil 609 viviendas, Tumbes con 12 mil 680 viviendas y Madre de Dios con 8 mil 835 viviendas.³

Ilustración 1. 1 Cuadro estadístico del Déficit Habitacional en el Perú, INEI 2007



1.2. LA MADERA EN EL PERU: SITUACION FORESTAL ACTUAL

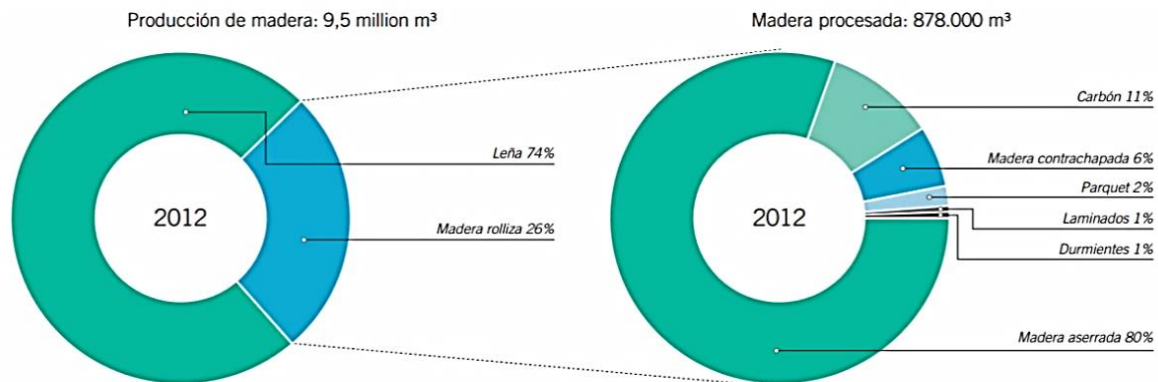
El Ministerio de la Producción (Produce) señaló que el Perú es el segundo país en América del Sur con potencial de bosques naturales y el noveno en el mundo, por lo que el recurso forestal puede convertirse en un nuevo motor de crecimiento del país. Aunque un poco más de la mitad de la superficie del Perú (57%) está cubierta por bosques, el valor económico del sector forestal es bajo comparado con el de otros países forestales, y este sector no es una fuente principal de riqueza y bienestar.

1.2.1. PRODUCCIÓN DE MADERA

Según datos estadísticos, se observa que la mayor producción de madera se destina a la leña y el resto a madera rolliza. Esto quiere decir que, mientras los recursos forestales son una parte importante de las estrategias de vida de mucha gente, éstos no se explotan a la escala y de una manera que genere valor adicional a la economía.²

³ (INEI), Dirección Técnica de Demografía y Estudios Sociales del Instituto Nacional de Estadística e Informática, Diciembre 2009.

Ilustración 1. 2 Producción de madera en el Perú en el 2012. DGFFS Ministerio de Agricultura

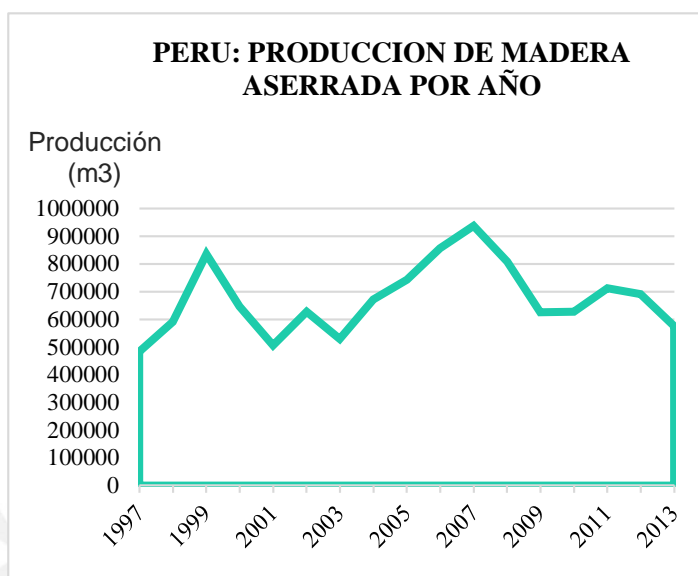


1.2.1.1. MADERA ASERRADA

La madera aserrada es el más simple de los productos de madera procesada obtenidas por el aserrado del árbol, generalmente escuadradas, es decir con caras paralelas entre sí y cantos perpendiculares a las mismas el más fácil de producir y el que se utiliza desde hace más tiempo. La cifra récord en la producción de madera aserrada se presenta el año 2007, con un total de 9,4 millones de m³; sin embargo, debido a la crisis que afectó a Estados Unidos a fines de la década anterior, la producción disminuyó drásticamente, llegando en el año 2009 con solo una producción de 6,3 millones de m³; es decir, una caída de 33,2% en relación al año 2007. Luego, la producción se fue recuperando, creciendo sostenidamente hasta el año 2011. Luego se observa nuevamente una caída para llegar al 2013 con 5.8 millones de m³.

Tabla 1. 1 Producción de la madera aserrada en el Perú en el periodo 1997-2013.

PRODUCCIÓN DE MADERA ASERRADA	
AÑO	m ³
1997	482,269
1998	590,274
1999	834,671
2000	646,164
2001	506,054
2002	626,668
2003	528,292
2004	671,229
2005	743,428
2006	856,339
2007	936,667
2008	807,834
2009	625,769
2010	628,051
2011	711,628
2012	691,311
2013	575,262



Fuente: INEI 2014

Tabla 1. 2 Producción de la madera aserrada según Especies en el Perú.

Especie forestal	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013 P/
Total	856 339	936 667	807 834	625 769	628 051	711 628	691 311	575 262
Caoba	18,648	7,723	3,568	2,740	1,230	745	310	328
Catahua	33,837	36,309	24,550	16,599	12,181	16,415	11,552	6,607
Cedro 1/	80,758	89,877	33,483	16,971	17,794	12,779	10,484	15,718
Copaiba	23,413	32,544	27,197	20,769	15,319	18,099	15,131	14,457
Cumala	98,643	133,592	145,396	63,249	64,051	111,905	88,443	77,428
Eucalipto	52,966	54,335	56,288	40,779	49,826	53,025	53,949	47,060
Ishpingo	5,111	5,900	3,655	3,561	2,274	2,918	2,936	2,155
Mohena	30,585	29,429	24,929	21,332	22,203	22,698	15,565	14,736
Roble	4,250	1,888	2,702	3,139	11,074	10,451	14,497	12,836
Tornillo	109,882	114,105	109,996	104,364	99,173	113,973	107,696	112,936
Otras especies 2/	398,246	430,965	376,070	332,266	332,926	348,620	370,748	271,001

P/ Preliminar.

1/ Cedrela odorata.

2/ Incluye: Alfaro, capirona, caraña, congona, diablo fuerte, huayruro, cachimbo, higuera, leche leche, lupuna, lagarto caspi, mata palo, nogal, paca, roble amarillo, ulcumano, utucuro y otros.

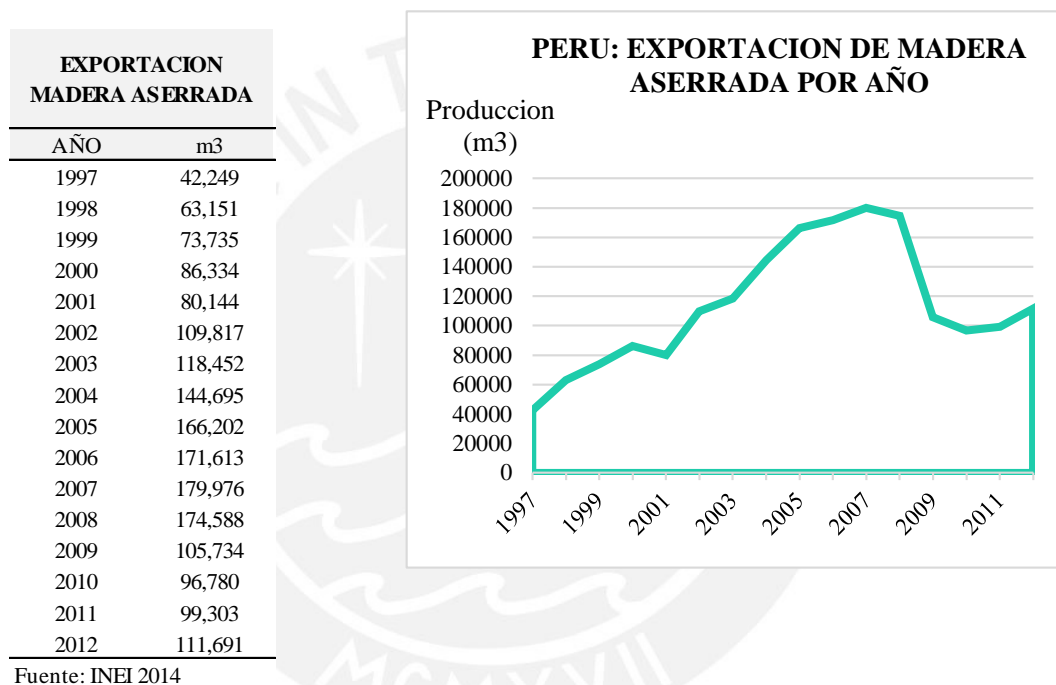
Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego - Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre.

1.2.1.2. DESTINO DE LA PRODUCCIÓN

La madera aserrada que se produce en el país tiene dos destinos: el mercado nacional y el mercado externo. Al mercado interno se destina aproximadamente el 80% de la madera aserrada, , mientras que al mercado externo se comercializa un 20% restante.⁴

En el 2009 una suma de factores afectaron las exportaciones de madera, al punto que las ventas al exterior cayeron, rompiendo el crecimiento sostenido que mantenía desde el 2003, (Asociación de Exportadores, ADEX).

Tabla 1. 3 Exportación de la madera aserrada en el Perú.



⁴ (Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre - DGFFS Ministerio de Agricultura , 2012)

Tabla 1. 4 Importación de la madera aserrada en el Perú.

IMPORTACION MADERA ASERRADA	
AÑO	m ³
1997	2,252
1998	3,143
1999	5,350
2000	7,303
2001	10,195
2002	13,852
2003	17,045
2004	21,596
2005	22,810
2006	25,867
2007	39,816
2008	52,826
2009	48,145
2010	73,804
2011	78,662
2012	86,261

Fuente: INEI 2014



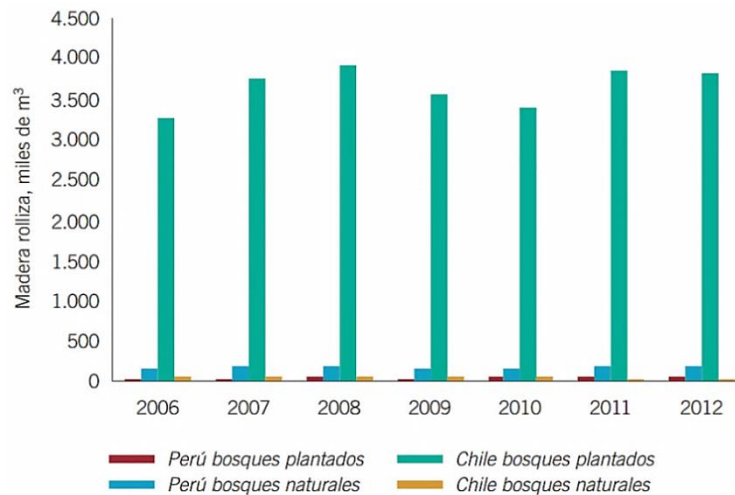
Se observa un notable crecimiento que posiblemente se deba a que el segmento de la construcción está orientándose a comprar los productos terminados y está creciendo la dependencia de las tiendas de retail como proveedores.⁵

1.2.1.3. RECURSO FORESTAL Y PLANTACIONES

Actualmente hay más de 40 mil hectáreas de plantaciones en el Perú. Sin embargo, el área de plantaciones manejadas comercialmente es probablemente mucho menor. Este número es muy pequeño comparado con Chile, por ejemplo, que cuenta con 2 millones de hectáreas de plantaciones a escala industrial y es el motor de la economía forestal.

⁵ De acuerdo al “Estudio de Mercado nacional de madera para el sector de la construcción MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN y CITE MADERA.

Ilustración 1. 3 Importancia relativa de la extracción de madera rolliza en bosques naturales y en plantaciones en Chile y Perú⁶



El éxito del Pino chileno y su ingreso al país bajo distintas formas de presentación, seca, acondicionada, normalizada y a bajo precio, pone en evidencia un nivel de sofisticación que ha sido impulsado aún más por las tiendas de retail dedicadas a la venta de artículos para el hogar y la construcción.

1.2.1.4. INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Para tener una visión más precisa del uso de la madera para viviendas en el Perú, es posible analizar el Censo elaborado en el 2007 (*Tabla 1.5*), donde del total de viviendas particulares con ocupantes presentes que suman 6 millones 400 mil 131 viviendas, en comparación con el censo realizado en 1993 hay un crecimiento anual del 4.6% en viviendas hechas con bloques de cemento así como el 1.1% de adobe o tapial y un 4,9% en madera entre otros. A pesar de que el porcentaje de crecimiento sea positivo, solamente un 9.7% de las viviendas usan madera en comparación con un 46.7% del ladrillo o bloque de cemento.⁷ En respuesta a estos números se busca explicar las ventajas de la madera y el por qué resulta beneficioso considerarla como material de construcción.

⁶ Las especies plantadas son eucalipto y pino. Fuente: DGFFS, Perú Forestal en Números, 2012. Instituto Nacional Forestal de Chile, El Sector Forestal Chileno 2012.

⁷ ((INEI), Dirección Técnica de Demografía y Estudios Sociales del Instituto Nacional de Estadística e Informática, Diciembre 2009)

Tabla 1. 5 Materiales predominantes para la vivienda en el Perú, INEI 2007.

Material predominante en paredes exteriores	1993		2007		Incremento anual	Tasa de crecimiento anual
	Absoluto	%	Absoluto	%		
Total	4,427,517.0	100.0	6,400,131.0	100.0	140,901.0	2.6
Ladrillo o bloque de cemento	1,581,355.0	35.7	2,991,627.0	46.7	100,733.7	4.6
Adobe o tapia	1,917,885.0	43.3	2,229,715.0	34.8	22,273.6	1.1
Madera	310,379.0	7.0	617,742.0	9.7	21,954.5	4.9
Quincha	207,543.0	4.7	183,862.0	2.9	-1,691.5	-0.8
Estera	148,029.0	3.3	144,511.0	2.3	-251.3	-0.2
Piedra con barro	136,964.0	3.1	106,823.0	1.7	-2,152.9	-1.7
Piedra, sillar con cal o cemento	54,247.0	1.2	33,939.0	0.5	-1,450.6	-3.2
Otro material	71,115.0	1.6	91,912.0	1.4	1,485.5	1.8

Fuente: : Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) - Censos Nacionales de Población y Vivienda 1993 y 2007.

El sector de construcción participa con el 11%⁸ del índice de la Producción Nacional. Este crece a tasas superiores al 10%, inclusive a ritmos mayores que la tasa de crecimiento del PBI global y se ha convertido en uno de los sectores más dinámicos de la economía peruana. Han influido en éste, la expansión de la demanda interna como consecuencia del aumento de la población y el crecimiento de la economía, así como por el aumento de la inversión privada.

Los productos de mayor demanda son puertas, marcos de ventanas y pisos. Según el “Estudio del mercado nacional de madera y productos para el sector construcción” (SNV, 2009) se estima que la demanda de madera aserrada del sector de construcción es aproximadamente el 23% del mercado de madera en el país; y cuando se hace el cálculo en función a madera aserrada y manufacturas de madera, la demanda alcanzaría los 355,571 m³ que equivalen al 45% del mercado nacional de madera y sus manufacturas.⁹

En otra parte del estudio, el 82% de los empresarios de la construcción consideran que sería importante tener estándares de producción que permitan normalizar la producción

⁸ Promedio obtenido del PBI sector de construcción desde el 2006 hasta el 2014. (INEI, 2014)

⁹ (Identificación de las necesidades de innovación tecnológica en la MYPE de la madera y el mueble en el Perú, 2009).

de productos de la construcción. Esto permitiría reducir costos en obras de gran dimensión, ya que no necesitarán hacer un tratamiento adicional a los productos de madera adquiridos.

1.2.2. ESPECIES Y USOS PROBABLES DE LA MADERA EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.

El “Tornillo”, actualmente es una de las especies más utilizadas en el sector de la construcción, seguido por la “Caoba” y el “Cedro” a nivel de preferencias; sin embargo, se evidencia un mayor uso de especies alternativas (SNV, 2009). La Confederación Peruana de la Madera (2008) realizó un estudio a 64 especies madereras en el Perú analizando las características cualitativas y propiedades relacionadas con el uso como la densidad básica, resistencia mecánica, módulo de elasticidad, trabajabilidad y vetado de la madera. Revisar ANEXO 1.

La combinación de estas características y propiedades sirven para la determinación de los usos. Para seleccionar la mejor madera para una aplicación particular, es necesario saber los requerimientos mínimos de uso y conocer las características y propiedades de las maderas. En base a ello y conociendo los principales fines de las maderas comerciales (cedro, caoba y tornillo), se determinaron los usos probables (ANEXO 1). Para esto se ha considerado únicamente las especies clasificadas en el Reglamento Nacional de Edificaciones.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN: GENERALIDADES DE LA MADERA

La madera es un material natural muy complejo, de poco peso y buena resistencia, pero de propiedades y características que no dependen sólo de su composición sino cómo se encuentran colocados u orientados los diversos elementos que la conforman. Aunque el material es combustible, sus propiedades mecánicas no se afectan con el fuego, como sí ocurre con los materiales metálicos como el acero y el aluminio. Es muy susceptible a los cambios de humedad y al ataque de insectos; sin embargo esta desventaja puede eliminarse con tratamientos químicos de inmunización.

En esta sección se presentan conceptos básicos y necesarios para comprender apropiadamente el comportamiento de la madera desde el punto de vista estructural. Se expondrán definiciones y características respecto a la madera en general. En capítulos siguientes se explicarán los resultados de los ensayos realizados en la investigación, con el fin de estudiar las características y propiedades mecánicas de la especie en estudio (Pino Radiata).

2.2. PROPIEDADES FÍSICAS

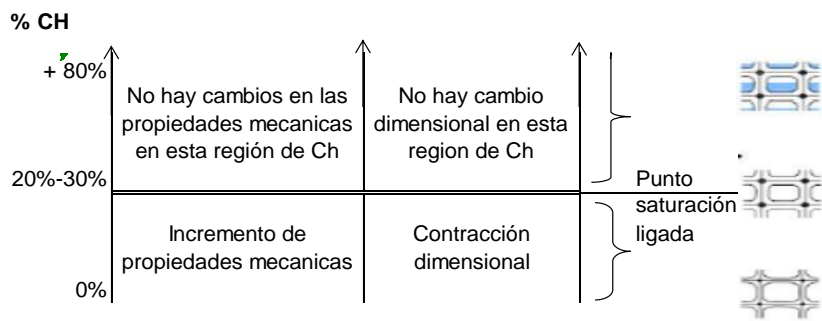
2.2.1. CONTENIDO DE HUMEDAD (CH)

Es un parámetro de relevancia que influye sobre las propiedades físicas y mecánicas. La madera contiene una importante cantidad de humedad. Esta se encuentra bajo tres formas:

- Agua libre en el interior de las cavidades celulares;
- Agua higroscópica, contenida en las paredes celulares y
- Agua de constitución, inherente a su naturaleza orgánica.

Cuando la madera es expuesta al medio ambiente, entrega agua libre contenida en sus cavidades y después agua higroscópica. En el caso del agua de constitución solo se pierde en combustión. Al término del intercambio del agua de la madera al medio ambiente se denomina Punto de Saturación de las fibras (PSF), con un CH entre 25-35%.

Ilustración 2. 1 Diagrama de rangos de humedad donde ocurren cambios dimensionales y de resistencia Fuente: González, 2008



La *ilustración 2.1* muestra la variación del contenido de humedad en la madera y su efecto sobre las propiedades mecánicas y dimensionales. Cuanto menor sea el contenido de humedad mayor será la resistencia mecánica de la madera y la contracción dimensional aumentará (González, 2008). Cabe resaltar que el contenido de humedad no toma en cuenta el agua de constitución que es inherente a la madera. Para determinar la humedad en la madera, se calcula el siguiente cociente:

$$CH \% = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso anhidro}}{\text{Peso anhidro}} \times 100 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación (1)}$$

Dependiendo del contenido de humedad obtenido en la madera, se puede diferenciar tres estados: **madera verde**, cuando solo se ha perdido agua libre y su porcentaje de humedad es mayor que 30%; **madera seca**, si ha perdido también una parte del agua higroscópica y su porcentaje de humedad es menor a 18%; y **madera seca anhidra**, que ha perdido toda el agua libre e higroscópica donde el porcentaje de humedad es igual a 0% tras haber sido secado en la estufa a 105 °C.

La madera recién extraída posee alrededor de 50% a 70% de humedad. Por otra parte, es deseable que la madera destinada a la construcción tenga un contenido de humedad similar a la humedad de equilibrio del lugar en que ella preste servicio. En muchas ocasiones no será necesario el secado de la madera según la temperatura ambiente y la humedad, lo que nos lleva a un ahorro importante de tiempo y dinero.

2.2.2. DENSIDAD BÁSICA

La densidad de un cuerpo, es el cociente formado por la masa y su volumen. Debido a que tanto la masa como el volumen de una madera varían significativamente de acuerdo al contenido de humedad, es necesario indicar el CH con el cual se calculará la densidad básica.

2.3. PROPIEDADES MECANICAS DE LA MADERA

La madera, al igual que los demás materiales, debe poseer condiciones de resistencia para soportar los esfuerzos con los cuales es sometida sin llegar a fatiga. Las propiedades de elasticidad y resistencia son variables debido a la complejidad de su estructura. Además, el grado de contenido de humedad influye en su resistencia ya que la madera seca posee mayor resistencia que la húmeda.

2.3.1. RESISTENCIA A LA COMPRESION PARALELA

La Resistencia a la comprensión paralela es la fuerza que se genera en la madera contra las tensiones de compresión a lo largo de sus fibras. La norma Peruana (NTP 251.014:2004)¹⁰, establece para la realización de este ensayo, probetas de sección transversal de 5x5x20 cm. Esta capacidad portante inherente del espécimen está limitada por el pandeo de las fibras más que por su propia resistencia al aplastamiento. Cuando se tratan de elementos que tienen una relación de esbeltez¹¹ menor que 10, como las columnas, por ejemplo, desarrollan toda su resistencia al esforzar la sección a su capacidad máxima; mientras que para elementos más esbeltos, lo que predomina en la resistencia es la capacidad a resistir el pandeo lateral, el cual depende en su totalidad de su geometría.

La resistencia a la compresión paralela a las fibras en la madera es aproximadamente la mitad que su resistencia a la tracción.¹²

2.3.2. RESISTENCIA A LA COMPRESION PERPENDICULAR

La Resistencia a la comprensión perpendicular es la fuerza (capacidad de carga) que se genera en la madera contra las tensiones de compresión perpendiculares a sus fibras. Al aplicar una carga perpendicular a las fibras éstas sufren un esfuerzo perpendicular a su eje,

¹⁰ NTP 251.014:2004 - Método para determinar la compresión axial o paralelo al grano.

¹¹ La esbeltez es la relación que existe entre la longitud o luz y el lado mínimo del elemento estructural considerado.

¹² (Padt-Refort 1984).

que tienden a comprimir las pequeñas cavidades contenidas en ellas. Al aumentar la carga la pieza se va comprimiendo, aumentando su densidad y su misma capacidad de carga.¹³

2.3.3. RESISTENCIA AL CORTE

La Resistencia al corte es la fuerza que se genera en la madera en reacción a las fuerzas que se aplican sobre ella generando deslizamiento. El esfuerzo de corte perpendicular al grano es resistido por el aumento de la resistencia de las fibras mediante el cizallamiento; mientras que el esfuerzo de corte paralelo al grano, es resistido por la lignina, sustancia cementante. Perpendicularmente a las fibras la resistencia es alrededor de tres a cuatro veces mayor que en la dirección paralela.¹⁴ En el ensayo de cizalle paralelo a las fibras, se distinguen dos tipos de sollicitaciones, según la ubicación del plano de falla respecto a las anillos de crecimientos.

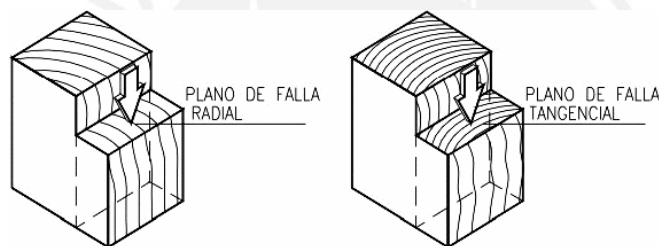


Ilustración 2. 2 Probeta de Corte Paralela. Método de la NTP 251.013:2004.¹⁵

La resistencia al corte en el sentido paralelo a la fibra varía entre 25 y 200 kg/cm², este valor aumenta con la densidad aunque en menor proporción que la resistencia a la compresión, también depende mucho del tamaño de los elementos. La N.T.P. E.010 especifica la forma de realizar el ensayo y las dimensiones de la probeta a ensayar.

2.3.4. RESISTENCIA A LA FLEXION

La resistencia a la flexión de la madera es la capacidad portante que esta da, cuando este elemento está sometido a fuerzas transversales.

¹³ NTP 251.016:2004 - Método para determinar la compresión perpendicular al grano.

¹⁴ (Junta del Acuerdo de Cartagena, 1984).

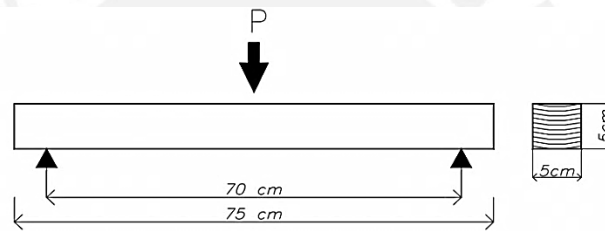
¹⁵ NTP 251.013:2004 - Método para determinar el cizallamiento paralelo al grano.

Dichas solicitaciones, combinan el comportamiento simultáneo de tracción, compresión y corte de la madera, las fibras más alejadas de la neutra son las que están sometidas a los máximos esfuerzos.

Como la resistencia a la compresión es menor que a la tensión, la falla se inicia en la zona de compresión, lo que hace que se incrementen las deformaciones en la zona comprimida, y que el eje neutro se desplace a la zona de tracción, aumentando rápidamente las deformaciones totales hasta que la pieza falla por tensión.

Durante el ensayo normalizado para determinar la resistencia a flexión de la madera se debe someter al elemento a una carga puntual perpendicular al medio del mismo y que se encuentre simplemente apoyada en ambos extremos.

Ilustración 2. 3 Espécimen para Ensayo de Flexión Estática.¹⁶



2.4. PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LA MADERA

La madera se deforma elásticamente, hasta el límite proporcional por encima del cual la deformación es de tipo plástica hasta el punto de rotura.

El módulo de elasticidad, el de corte y el de Poisson, son los parámetros que definen sus características elásticas. La madera como material ortotrópico (propiedades mecánicas o térmicas son únicas e independientes en tres direcciones perpendiculares entre sí), tiene tres módulos de elasticidad y tres módulos de corte, orientados y dirigidos según los tres ejes ortogonales.

2.4.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD (E_f)

Es la medida de la rigidez del material. Su cálculo se basa en la razón entre el esfuerzo por unidad de superficie y la deformación por unidad de longitud experimentada por una probeta sometida a flexión. Constituye un valor indicativo de la rigidez y es aplicable solamente a condiciones de trabajo dentro de la zona elástica de la curva versus deformación.

¹⁶ NTP 251.017:2004 - Método para determinar la flexión estática.

La fórmula matemática que permite calcular el Módulo de Elasticidad en flexión se obtiene del análisis estructural de una viga simplemente apoyada con carga aplicada al centro de la luz, resultando lo siguiente:

$$E_f = \frac{P * L^3}{\Delta * 4 * a * h^3} \dots\dots\dots Ecuación (2)$$

Donde:

P/Δ : Pendiente obtenida del gráfico Fuerza aplicada vs Deformación asociada

L : Longitud o luz del elemento

a : Ancho de la sección del elemento

h : Altura de la sección del elemento

2.4.2. MÓDULO DE CORTE (G)

El módulo de corte relaciona las distorsiones con los esfuerzos de corte aplicados al espécimen. La madera por ser material ortotrópico posee diferentes módulos de corte en cada una de las direcciones.

En la madera, la mayoría de las coníferas muestran que el módulo de corte radial-tangencial (GRT) es aproximadamente un 10% de los valores del módulo de corte longitudinal-tangencial (GLT), mientras que en el caso de las latifoliadas, debido a su alta densidad, es de un 40% del GLT. Así también, para este material, la relación de Poisson es muy pequeña y difícil de determinar.¹⁷

2.5. AGRUPAMIENTO DE ESPECIES SEGÚN SUS PROPIEDADES MECANICAS: COMPARATIVO DEL PROCESO EN PERU Y CHILE

El agrupamiento de la madera según sus propiedades resistentes, consiste en crear un conjunto de especies madereras hipotéticas con características semejantes. De este modo, cualquier madera puede identificarse dentro de tal conjunto, como equivalente a una de tales especies madereras hipotéticas. Para el agrupamiento de una especie nueva o foránea se debe considerar el proceso según el país en donde se desea utilizar.

¹⁷ (Bodig, J.; Goodman, J. R. Prediction of Elastic Parameters for Wood. Wood Science, 1973)

2.5.1. PROCESO DE AGRUPAMIENTO ESTRUCTURAL EN PERU: (NTP. E.010)

La incorporación de especies a los grupos establecidos se hará en función de la densidad básica y de la resistencia mecánica obtenida mediante ensayos de flexión de vigas de madera de tamaño natural, según la norma NTP 251.107.¹⁸

- Se deberá ensayar un mínimo de 30 vigas provenientes por lo menos de 5 árboles por especie.
- Se identifican las especies en forma botánica y se efectúa la descripción anatómica de las muestras de madera.
- Se determina la densidad básica promedio de la especie, la cual se compara con los valores normalizados expuestos en la tabla 2.1, obteniéndose así un agrupamiento provisional.

Tabla 2. 1 Clasificación según la NTP. E010, según su densidad básica.

Grupo	Densidad Básica gr/cm ³
A	>0.71
B	0.56 a 0.70
C	0.40 a 0.55

- Se determinan los valores de la rigidez (Módulo de Elasticidad) y de la resistencia (Esfuerzo Admisible por flexión), a partir de vigas a escala natural que cumplan con los requisitos de la norma NTP 251.10419, ensayadas de acuerdo a la norma NTP 251.107²⁰.
- Comparar los resultados obtenidos con los valores establecidos en la NTP E010 (ver tabla 2.2). Si los valores alcanzan los de un grupo más resistente, se clasificará en el grupo superior. En caso contrario, si los valores no alcanzan a los del grupo provisional se la clasifica en el grupo inferior.

¹⁸ NTP 251.107:2004 MADERA ASERRADA. Madera aserrada para uso estructural. Método de ensayo de flexión para vigas a escala natural.

¹⁹ NTP 251.104:2004 MADERA ASERRADA: Madera aserrada para uso estructural. Clasificación visual y requisitos.

²⁰ NTP 251.107:2004 MADERA ASERRADA. Madera aserrada para uso estructural. Método de ensayo de flexión para vigas a escala natural.

Tabla 2. 2 Agrupamiento de especies peruanas según propiedades mecánicas conocidas. NTP E010.

Grupo	Esfuerzos Admisibles MPa (kg/cm ²)				
	Flexión	Tracción Paralela ft	Compresión Paralela fc//	Compresión Perpendicular fc'	Corte Paralelo fv
A	20,6 (210)	14,2 (145)	14,2 (145)	3,9 (40)	1,5 (15)
B	14,7 (150)	10,3 (105)	10,8 (110)	2,7 (28)	1,2 (12)
C	9,8 (100)	7,3 (75)	7,8 (80)	1,5 (15)	0,8 (8)

Grupo	Módulo de Elasticidad (E) MPa (kg/cm ²)	
	Emínimo	Epromedio
	A	9 316 (95 000)
B	7 355 (75 000)	9 806 (100 000)

2.5.2. PROCESO DE AGRUPAMIENTO EN CHILE²¹

La norma Nch 1989 establece prescripciones que se aplican a las propiedades resistentes obtenidas de madera en estado verde (H>30%) y las provenientes de madera en estado seco (H=12%). Esta norma se aplica tanto a maderas de coníferas como de latifoliadas.

- El grupo de una especie maderera se determina según el valor medio del módulo de rotura a la flexión obtenido del ensayo especificado en la Norma NCh 987. Los grupos establecidos son los señalados en la Tabla 2.3. según el contenido de humedad. Para cada uno se define valores mínimos del módulo de rotura a la flexión Rf, del módulo de elasticidad a la flexión Ef, y de la tensión máxima de compresión paralela Rc.

Tabla 2. 3 Agrupamiento de especies chilenas para propiedades mecánicas

Propiedad	Contenido de Humedad (%)	Grupo y Valor mínimo en Mpa para la media de la propiedad que se indica						
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
		ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7
Rf	≥30	86.00	73.00	62.00	52.00	43.00	36.00	30.00
	12	130.00	110.00	94.00	78.00	65.00	55.00	45.00
Ef	≥30	16,300.00	13,100.00	10,500.00	8,100.00	5,900.00	4,300.00	2,800.00
	12	19,860.00	16,160.00	13,200.00	10,250.00	7,850.00	6,000.00	4,150.00
Rc	≥30	40.00	34.00	29.00	24.00	20.00	17.00	14.00
	12	77.00	65.00	55.00	46.00	38.00	32.00	26.00

²¹ NCH 1989: Maderas – Agrupamiento de Especies Madereras Según su Resistencia

- De acuerdo al contenido de humedad de la madera en el momento del ensayo, obtener de la **Tabla 2.3** el grupo que a ese valor le corresponde.
- Repetir este procedimiento para los promedios del módulo de elasticidad a la flexión y para la tensión máxima de compresión paralela, obtenidos según las normas NCh987²², y NCh973²³, respectivamente.
- Si las propiedades que rigen el procedimiento originan grupos diferentes, dar mayor énfasis al módulo de rotura a la flexión y al módulo de elasticidad de flexión, siguiendo el criterio señalado en la **Tabla 2.4**.
- El grupo x-1 es más resistente que el grupo x. Por lo tanto designar el grupo E4 como x significa que el grupo E3 queda identificado por x-1 y el grupo E5 por x+1, el cual es más débil que E4. Aplicaciones de este criterio aparecen en la tabla 5 y en el anexo C.

Tabla 2. 4 Criterios a seguir cuando los grupos resultantes son diferentes entre sí. Norma Chilena

CRITERIOS A SEGUIR CUANDO LOS GRUPOS RESULTANTES SON DIFERENTES ENTRE SI			
Grupo determinado según			Asignación Final
Rf	Ef	Rc	
x	x	x-1	x
x	x	x+1	x
x	x-1	x	x-1
x	x+1	x+1	x
x	x-2	x-1	x-1
x	x+2	x+1	x+1
x	x+1	x	x

22 NCH 987: Madera – Determinación de las propiedades mecánicas. Ensayo de flexión estática.

23 NCH 973: Madera. Determinación de las propiedades mecánicas. Ensayo de compresión paralela.

2.6. COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE LA MADERA COMO MATERIAL ESTRUCTURAL

2.6.1. INTRODUCCIÓN: SISMICIDAD EN EL PERU

El Perú se encuentra ubicado al borde del encuentro de dos placas tectónicas, la Sudamericana y la de Nazca, en donde se produce el efecto de subducción, el que ha provocado un gran número de sismos de gran poder destructivo en la parte occidental de nuestro territorio, y es la causante de todos los procesos orogénicos que se desarrollan en el continente. La primera de estas placas se desplaza hacia el Este con una velocidad aproximada de 8 cm/año ²⁴y es causante del plegamiento y levantamiento del borde occidental de Sudamérica dando origen a una superficie topográfica muy accidentada que alcanza alturas de 7000 metros sobre el nivel del mar. Esta estructura es conocida como Cordillera de los Andes.

2.6.2. NIVELES DE DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE

Siguiendo la propuesta del Comité Visión 2000 (Structural Engineers Association of California (SEAOC), 1999 es posible definir los objetivos de desempeño para edificios comunes en la costa peruana. El resumen de los objetivos para la componente estructural se resume en la *Tabla 2.5*.

Tabla 2. 5 Comportamiento estructural según SEAOC para determinadas aceleraciones.

SISMO	Aceleración asociada, para la costa del Perú	COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL
Sismo frecuente (45 años)	0.20 g	Perfectamente elástico
Sismo ocasional (75 años)	0.25 g	Prácticamente elástico
Sismo raro (475 años)	0.40 g	Importantes incursiones inelásticas con pérdida de resistencia y rigidez. La estructura podría repararse.
Sismo muy raro (970 años)	0.50 g	Severas incursiones inelásticas perdida caso total de rigidez y resistencia. no es posible reparar la estructura

²⁴ Demets, C., Gordon, R., Aarhus, D. y Stem S. (1990). Current place Motions.

2.6.3. RELACIÓN DAÑO – DERIVA

Para asociar el daño esperado con el desplazamiento de entrepiso de la estructura, una de las opciones es utilizar las tablas del Hazus (Hazards-United States), el cual es un programa desarrollado por el FEMA. Las tablas relacionan la deriva asociada a diferentes niveles de daño y el nivel de diseño considerado para el edificio.

Tabla 2. 6 Niveles y daño de comportamiento estructural - Elementos verticales

SISTEMA ESTRUCTURAL	TIPO	Niveles de comportamiento estructural		
		Prevención al colapso*	Resguardo de Vida	Ocupación Inmediata**
Muros de concreto	Deriva	2.0% temporal o permanente	1.0% temporal; 0.5% permanente	0.5% temporal; Permanente despreciable
Muros de mampostería reforzados	Deriva	1.5% temporal o permanente	0.6% temporal; 0.6% permanente	0.2% temporal; 0.2% permanente
Muros de madera	Deriva	3.0% temporal o permanente	2.0% temporal; 1.0% permanente	1.0% temporal; 0.25% permanente

* **Daño Severo:** La estructura posee resistencia y rigidez residual mínima, pero las cargas gravitacionales son soportadas. Presenta grandes deformaciones permanentes. Las paredes podrían tener daño extenso y algunas fallas locales podrían ocurrir. La edificación está cerca de experimentar colapso.

****Daño Leve:** La estructura permanece con la resistencia y rigidez original. Ocurren fisuras menores en paredes y elementos estructurales. Los sistemas contra incendios y elevadores están en funcionamiento.

2.6.4. LA MADERA FRENTE A UN MOVIMIENTO SÍSMICO

A lo largo del tiempo se ha demostrado que el comportamiento de la madera frente a eventuales sismos es óptima, ya que ésta absorbe las fuerzas dinámicas mejor que otros materiales convencionales. La utilización de la madera con estrategias antisísmicas, ya era habitual en la construcción tradicional de los países del área mediterránea.

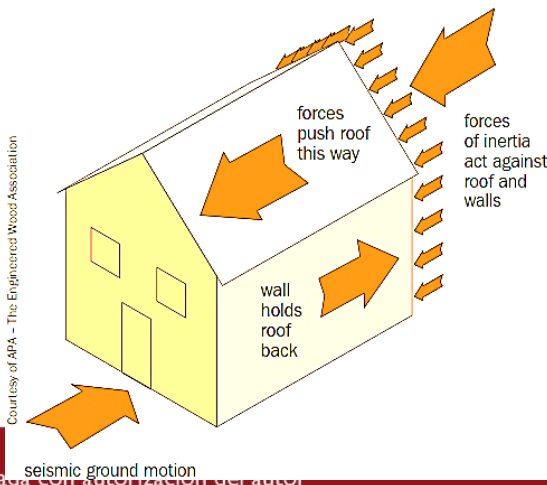


Ilustración 2. 4 Distribución de fuerzas sobre una estructura en respuesta a un movimiento sísmico.

El sismo genera esfuerzos máximos con duraciones muy cortas donde la madera presenta la ventaja de una mayor resistencia frente a otros materiales convencionales. El diseño de las uniones es fundamental para alcanzar un grado aceptable de ductilidad en el comportamiento del conjunto de la estructura. Cuando esta se apoya en elementos metálicos auxiliares tales como pernos, pasadores, etc. permiten grandes deformaciones que disipan la energía producida por el sismo. La ligereza propia de la madera, confiere un comportamiento frente al sismo mejor que otros sistemas más pesados.

Se han realizado diversos estudios sobre las características del sistema de construcción de madera concluyendo en algunos puntos significativos:²⁵

- Poseen gran cantidad de conexiones pequeñas en lugar de pocas de gran capacidad para las fijaciones del recubrimiento y acabados. Si una conexión está sobrecargada, su participación puede ser recogido por conexiones adyacentes.
- La madera tiende a ser más ligera que otros tipos de materiales. La ligereza es una ventaja frente a un sismo.
- Las conexiones clavadas en los sistemas de madera y armazón permiten que el edificio se flexione y pueda disipar la energía producida en un sismo mediante las uniones.

Las fuerzas generadas en el sismo dependen del peso del edificio y con qué rapidez se acelera el suelo. Las fuerzas inerciales son mayores cuando los objetos son más pesados por ende las fuerzas sísmicas será más altas. Del mismo modo, aceleraciones más altas crean más tensión en la estructura. Los sismos afectarán según las características del movimiento del suelo y de la estructura del edificio. La forma en que un edificio responde a un sismo depende de su altura y de sus características de rigidez.

Las fuerzas en el techo y en el suelo deben ser resistidas por los muros de la estructura, además se debe tener especial cuidado con las conexiones de la estructura con la cimentación. Los siguientes componentes de la construcción con estructura de madera son esenciales para la resistencia de las fuerzas sísmicas:

²⁵ (Wood-Frame Construction-Meeting the Challenges of Earthquakes Council, The Canadian Wood Council, 2003)

- Adecuado anclaje de la estructura a la cimentación,
- La ductilidad de los muros,
- La resistencia y la continuidad del suelo y techos, y
- La interconexión de todos los elementos de encuadre.

Los techos y los pisos se comportan como diafragmas y las paredes del edificio serán como muros de corte. El diseño de muros de corte y diafragmas incluye asegurar que:

- El revestimiento de madera estructural (OSB o contrachapado) es lo suficientemente gruesa como para resistir las fuerzas de un sismo,
- El clavado es adecuado para transferir las fuerzas de corte del revestimiento del muro al marco inferior,
- Los elementos del bastidor de todo el perímetro de los diafragmas y muros de corte son lo suficientemente fuertes para resistir las fuerzas de tensión y compresión.

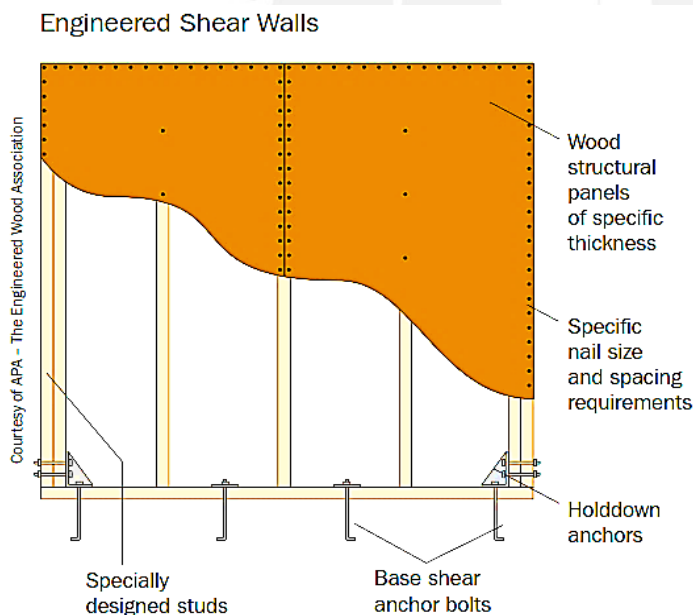


Ilustración 2. 5 Muro de corte de estructura de Madera. APA-The engineered Wood Association.

Los edificios con estructura de madera presentan un buen comportamiento ante sismos como se ha mencionado anteriormente, aunque para garantizarlo, se deben seguir las buenas prácticas de construcción. Algunas de estas se describen en los siguientes puntos:

- **Resistencia y rigidez:** Muros arriostrados o muros de corte son fundamentales para proporcionar resistencia durante un sismo. Las paredes construidas con madera contrachapada u OSB entablado estructural son muy eficaces ya que presenta una elevada resistencia a las fuerzas cortantes de sismos. En las zonas propensas a sismos fuertes, la rigidez y la resistencia de las paredes pueden ser optimizadas mediante el incremento del espesor de los paneles estructurales. Además, diversos estudios han demostrado que los elementos "no estructurales" contribuyen a la resistencia lateral de la estructura. Por ejemplo, acabados interiores, tabiques, y muchos tipos de revestimiento exterior.
- **Ductilidad:** En comparación con otros materiales tales como mampostería y hormigón que tienen que ser diseñados y detallados cuidadosamente para asegurar un buen desempeño sísmico, los sistemas de madera son inherentemente más dúctiles. La ductilidad es la capacidad de la estructura para deformarse sin llegar al colapso. Es deseable que un edificio tenga una cierta capacidad de flexión cuando se somete a las cargas repentinas de un sismo, porque la flexión permite que el edificio disipe la energía. Las numerosas uniones clavadas son muy eficaces en el suministro de ductilidad a los edificios de madera y armazón.
- **Peso:** Los marcos de madera son livianos. Los muros de hormigón utilizados son 7 veces más pesados que las paredes típicas de un armazón de madera. Las fuerzas en un sismo son proporcionales al peso de la estructura, entonces se observa una ventaja competitiva.
- **Redundancia:** Los edificios que tienen numerosas rutas de carga se consideran estructuralmente redundantes y proporcionan un nivel adicional de seguridad frente a los sismos. Una construcción típica de estructura de madera se compone de cientos de elementos estructurales y miles de conexiones. Esto significa que el fallo de una trayectoria de carga a menudo puede ser compensado por los miembros y las articulaciones adyacentes.
- **Conectividad:** Paredes de madera forradas pueden resistir las fuerzas cortantes de sismos, pero también deben ser diseñados y construidos para resistir deslizamiento o volcaduras. En cualquier caso, el edificio debe estar asegurado de manera adecuada a la cimentación. La conexión del encuadre de paredes, pisos y techo de la vivienda genera una sola estructura sólida.

2.6.5. DESEMPEÑO DE ENTRAMADOS DE MADERA FRENTE A SISMOS

Encuestas sobre el comportamiento de una estructura de madera frente a eventos sísmicos muestra un notable nivel bajo de mortalidad (*Tabla 2.6*). El éxito en estos edificios en altura radica en el diseño de nudos que permiten la redistribución de rigideces entre las distintas plantas. El comportamiento de las estructuras de madera en sismos recientes (Italia, Haití, Chile, Japón) fue excepcionalmente bueno.

Tabla 2. 7 Performance of Wood-frame construction in earthquakes

Terremoto	Force		No. Aproximado de vidas perdidas		No. Construcciones con plataformas de madera fuertemente sacudido (estimado)
	Escala de Richter M	Pico maximo de aceleracion medido (g)	Total	En edificios de entramados de madera (Fallas de plataformas)	
San Fernando, CA, 1971	6.7	0.60g	63	4	100,000
Edgecumbe NZ, 1987	6.3	0.32g	0	0	7,000
Saguenay QC, 1988	5.7	0.15g	0	0	10,000
Loma Prieta CA, 1989	7.1	0.50g	66	0	50,000
Northridge CA, 1994	6.7	1.00g	60	16+4*	200,000
Kobe Japan, 1995	6.8	0.80g	6300	0**	8,000**

* 16 deaths occurred in the collapse of one apartment building. Four deaths were from foundation failures that caused collapse of buildings on hillsides.

**Pertains to modern N.A. style wood-frame houses in the affected area.

***Numbers taken from Rainer and Karacabeyli document.

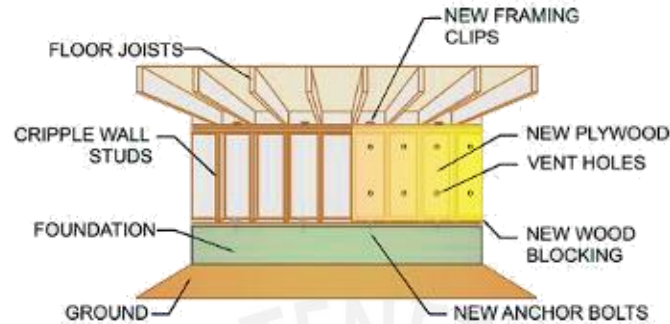
En general, la mayoría de las viviendas de madera y entramados se comportaron apropiadamente, sobre el punto de vista de la seguridad. Los daños más graves incluían deslizamiento de cimientos, colapso de los denominados “cripple walls” o colapso de chimeneas de mampostería. También aquellas estructuras de “pisos blandos” donde se muestra una reducción significativa en la rigidez lateral respecto a los demás pisos de la estructura, es más crítico cuando ocurre en el primer piso, porque las fuerzas sísmicas son generalmente más grandes en este nivel. El colapso más trágico (Northridge 1994) trajo consigo 16 muertes para un edificio con piso blando, el diseño de este edificio fue incorrecto para el tipo de suelo.

La evaluación del rendimiento del edificio ha identificado problemas con algunos edificios de armazón de madera. Estas deficiencias se describen en breve, para proporcionar una comprensión de modos de fallo y cómo pueden ser evitados.

- **Piso blando en planta baja.** En base a los sismos ocurridos, se deberá evitar pisos blandos, sobretudo en el primer piso. Otro punto esencial es proporcionar paredes arriostradas adecuadamente ya que garantiza la seguridad en una estructura de madera. En caso existiese aberturas excesivas, estas se deberán diseñar y reforzar adecuadamente según lo requiera, con el fin de evitar que la falta de capacidad de la pared conduzca a grandes distorsiones y un eventual colapso.
- **Las conexiones a cimentaciones.** Los pernos de anclaje se utilizan para evitar que una estructura se mueva fuera de su cimentación. Además aquellas estructuras de madera ancladas a sus cimentaciones no tratadas para soportar los agentes atmosféricos o de plagas, se comportan débilmente, caso contrario, aquellas maderas tratadas (pino impregnado) o de mayor densidad (nativas), que técnicamente tienen una mayor durabilidad y resistencia al deterioro.
- **En relación al tipo de suelo,** aquellas construcciones emplazadas sobre rellenos granulares o de arenas con un bajo grado de compactación, tendieron a amplificar la onda sísmica, (fenómeno llamado “licuefacción”) sometiendo a las estructuras de madera a un esfuerzo mayor a las que fueron concebidas. En cambio, las viviendas fundadas en terrenos rocosos, evidentemente disiparon con mayor eficiencia y en forma directa la energía sísmica hacia las edificaciones, haciendo que se soliciten esfuerzos a las estructuras en forma monolítica, trabajando como un todo y en forma solidaria con el suelo.
- **Cripple Walls:** son las paredes de entramado cortos, que se encuentran entre la parte superior de la cimentación y el primer piso de una vivienda. Muchos edificios antiguos que tenían estos elementos sin refuerzo sostenido sufrieron daños estructurales durante

los sismos de California. Se deberá realizar el fortalecimiento de las paredes con entablados de madera estructural para un arrostramiento eficaz de dichos elementos.

Ilustración 2. 6 Elementos que conforman un Cripple Walls.



➤ **Mobiliario ilimitados, Componentes y Accesorios:**

Resulta altamente riesgoso, para un evento sísmico, que una edificación de madera presente mobiliario libre el cual podría generar daños, ya que durante el desarrollo del movimiento sísmico, estos juegan el papel de “proyectiles”. Esto se puede evitar utilizando muebles arriostrados.

CAPÍTULO 3 ENTRAMADO DE MADERA PARA MODULO EN ESTUDIO

3.1. PROPIEDADES DEL BASTIDOR: PINO RADIATA

El bastidor está formado por pies derechos y soleras de pino radiata, especie conífera. También conocido como pino Monterrey, es cultivado extensivamente en el hemisferio sur principalmente en Chile, Nueva Zelanda, Australia y Sur África. El crecimiento de los árboles en las plantaciones alcanza hasta 30 m de altura en 20 años.

La madera es trabajable aunque las fibras tienden a rasgarse alrededor de los grandes nudos. El pino radiata se pega o se apuntilla fácilmente, se pinta y es fácil darle un buen acabado. La albura es propensa al ataque de la mancha de hongo y a la perforación de los insectos. Sin embargo la albura es comúnmente preservada con insecticidas en las plantaciones. El pino radiata puede ser usado con los mismos propósitos de los otros cultivos de pinos de los Estados Unidos, estos usos son veteados, laminados, pulpa, tableros de fibra, construcción, cajas, y carpintería.

Tabla 3. 1 Propiedades mecánicas de especies madereras Chilenas. Estado seco. Centro de Transferencia Tecnológica Pino Radiata 2003.

Propiedades físicas:		Propiedades mecánicas: (Madera libre de defectos (ASTM))	
Densidad:	448 kg/m ³	Módulo de ruptura:	657 kg/m ²
Contracción:	Medianamente nerviosa	Módulo de elasticidad:	85.3 ton/cm ²
Coeficientes de contracción (ASTM):	Total Unitario	Compresión paralela máx.:	370 kg/m ²
Volumétrica:	14,5% (0,42)	Compresión perpendicular:	135 kg/m ²
Tangencial:	7,4% (0,25)	Cortante:	76 kg/m ²
Radial:	4,2% (0,16)		
Dureza:	1,8 Semidura		

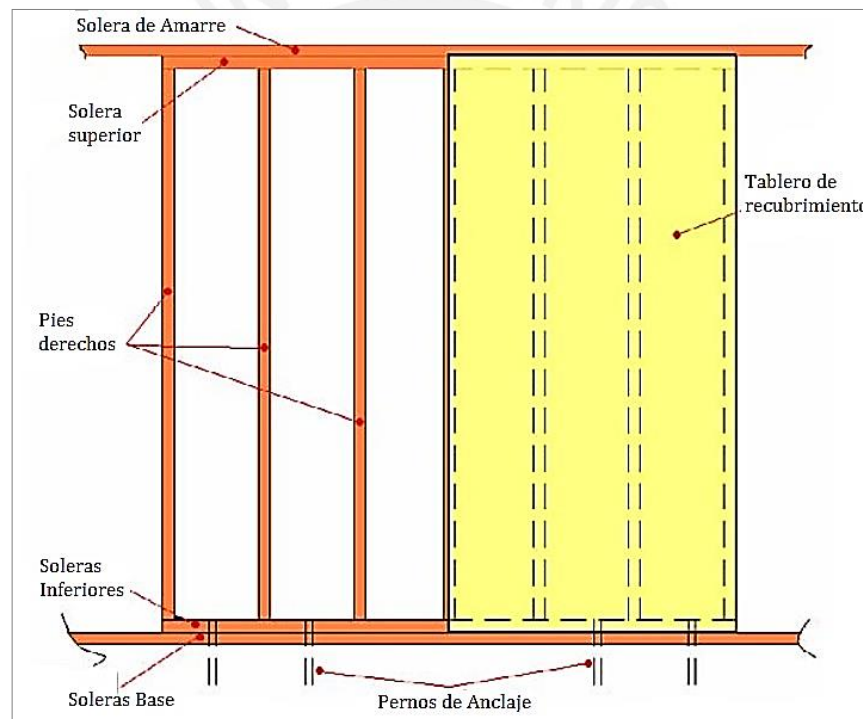
3.2. PROPIEDADES DEL TABLERO DE RECUBRIMIENTO

Tableros de hebras orientadas (OSB) son fabricados en base a hebras de madera rectangulares, adheridas con ceras y adhesivos fenólicos. Dispuestas en tres capas orientadas perpendicularmente entre sí, prensadas a alta temperatura y presión, cortadas, selladas en los cantos y embaladas. El uso de resinas fenol formaldehído (resistentes al agua) les confiere elevadas características de resistencia física y mecánica. Se recomiendan especialmente para aplicaciones estructurales en elementos verticales, inclinados y horizontales. Los formatos y espesores de estos tableros y su forma de colocación y fijación a los entramados de madera, se indicarán más adelante.

3.3. ELEMENTOS CONSTITUYENTES DEL ENTRAMADO DE MADERA

Los módulos de madera en estudio están compuestos por muros configurados con diferentes elementos y materiales, como son los pies derechos, soleras, placas de OSB, clavos, tornillos y conectores metálicos. Estos elementos se comportan de manera distinta conforme a sus propiedades y al tipo de carga al que están sometidos. Es por esto que al estudiar los módulos es necesario conocer las cualidades de cada elemento para lograr resultados satisfactorios en el análisis y en el modelo. La rigidez de la pared de corte, al igual que su fuerza, depende de la rigidez combinado de sus tres componentes: la madera, revestimiento y sujetadores.²⁶

Ilustración 3. 1 Diafragma rigidizado por placa



- **Pie derecho:** Elemento vertical estructural de madera, transmite cargas provenientes de niveles superiores a la cimentación además de servir como soporte para los revestimientos exteriores e interiores.

²⁶ (Timothy P. McCormick, Shear walls)

- **Solera superior:** Elemento horizontal estructural de madera que sirve de unión superior a las piezas verticales y distribuye las cargas provenientes de los techos y pisos superiores hacia los pies derechos.
- **Solera inferior:** Elemento horizontal estructural de madera que sirve de unión inferior a las piezas verticales y distribuye las cargas concentradas verticales hacia la solera de anclaje.
- **Solera de anclaje:** Elemento estructural de madera, anclada al sobrecimiento o nivel de piso inferior, mediante pernos de anclaje u otro elemento de unión. Sirve de elemento de apoyo para la solera inferior y distribuye las cargas provenientes de la estructura, hacia la cimentación.
- **Solera de amarre:** Pieza de madera que sirve de amarre a todo el sistema de diafragmas verticales.
- **Revestimientos:** Son elementos envolventes para un diafragma vertical. Son aquellos constituidos en base a placas de subproductos derivados de la madera, tales como tableros de contrachapado, OSB, fibras, u otros materiales. Es además aislante acústico y corta-fuego.

3.4. PROPIEDADES DE LAS UNIONES.

El factor más influyente en la capacidad de resistencia al corte de los muros de madera corresponde al comportamiento de los sistemas de uniones, los cuales se pueden identificar por:

- a) Unión del muro con la cimentación.
- b) Unión entre pies derechos y soleras.
- c) Unión entre el revestimiento y el marco.

La unión (a) aporta a la rigidez del muro al impedir la flexión de la solera inferior. La unión (b) tiene un funcionamiento tipo rótula y no tiene mayor influencia en la resistencia del panel. En cambio, la unión (c) es determinante en el comportamiento estructural del panel frente a solicitaciones externas, pues es ésta la que permite que el tablero (elemento rígido) pueda trabajar conjuntamente con el bastidor (elemento flexible). La zona más afectada de la unión (c) corresponde a la unión revestimiento-solera inferior y revestimiento-pie derecho central.

Experimentalmente se ha determinado que los clavos presentan un comportamiento no lineal²⁷, lo que sumado al hecho de que la madera falla en forma frágil, la ductilidad de los muros revestidos ha de asegurarse mediante un apropiado diseño (numero, tipo y proporción) de los clavos que fijan la placa contra el marco, además de los elementos de anclaje. Con esto se pretende que la falla en el muro se deba al aflojamiento de los clavos o elementos de anclaje, en lugar que ocurra en la madera (corte en el tablero, falla en el bastidor, etc.).²⁸

3.4.1. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA UNIÓN DEL MURO A LA FUNDACIÓN.

Esta es la unión que aporta la rigidez al muro al impedir la flexión de la solera inferior junto con el levantamiento del borde traccionado del panel. Se utilizaron conectores metálicos, que transmiten directamente la carga del pie derecho a la fundación.

Ilustración 3. 2 Uniones metálicas de la solera inferior del primer módulo con la fundación



3.4.2. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA UNIÓN ENTRE PIES DERECHOS Y SOLERAS.

Las uniones son clavadas. Se utiliza pistolas neumáticas y clavos espiralados de 2 ½” en rollo, cuyo eje de fijación coincide con el eje del pie derecho y cuya disposición es la más comúnmente utilizada en la construcción de paneles. Se fijan asientos metálicos que

²⁷ (Análisis no Lineal de Muros de Madera Mediante Modelos de Elementos Finitos., 1994)

²⁸ (Antecedentes Básicos sobre el Comportamiento Estructural de Diafragmas Verticales Solicitados por Cargas Horizontales Inducidas en su Plano. , 1989)

aportarán en el soporte de las viguetas. Estos asientos se aprecian sobre la vigueta puesto que el conjunto aún está invertido, de cabeza.

Ilustración 3. 3 Uniones de entre los pies derechos y soleras



3.4.3. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA UNIÓN BASTIDOR-TABLERO.

Esta unión es determinante en el comportamiento estructural del panel frente a sollicitaciones externas, pues es ésta la que permite que el tablero (elemento rígido) pueda trabajar conjuntamente con el bastidor (elemento flexible).

Específicamente, la unión se encuentra sometida a esfuerzos de corte producto del traspaso de fuerzas entre el marco y las placas de OSB. Esta transferencia de esfuerzos involucra una serie de fenómenos, tales como la extracción, flexión, fluencia, y principalmente el corte en los clavos, más el aplastamiento tanto del tablero como de los elementos del bastidor. De acuerdo a Pérez (1983) la capacidad resistente a extracción lateral de un clavo que une OSB con madera de pino radiata es de 32Kg, este valor es independiente de la dirección de la sollicitación.²⁹ Para el caso analizado, el OSB es pegado y clavado a la estructura de piso.

Ilustración 3. 4 Unión bastidor – tablero.



²⁹ (Manual de cálculo de construcciones en madera. Instituto Forestal., 1983)

La flexibilidad de la madera lleva a pensar que los diafragmas contruidos con este material deben ser considerados como flexibles; hay que tener muy claro que el tipo de diafragma no depende de las características del material, sino de la estructuración de los sistemas horizontales de entresijos. En los entramados, el OSB es clavado directamente a los bastidores, por lo cual la resistencia y la rigidez depende de la separación entre clavos y si el diafragma esta fijo o no. Además, cualquiera que sea el sistema, los elementos verticales (columnas, paredes, muros, etc.) trabajan a compresión, mientras los diafragmas (entresijos/techo) trabajan a flexión-cortante en la forma de una viga o placa sometida a cargas perpendiculares a su plano.

En general, los entramados se comportan como **diafragmas**, porque trabajan como una sola pieza transmitiendo los esfuerzos que reciben dentro de su mismo plano como lo haría un muro de carga o losa maciza de hormigón. El diafragma transmite los empujes horizontales a otros diafragmas o a otros elementos estructurales arriostrados. En el caso de muros de entramado, el efecto diafragma transmite el empuje horizontal a su base. Si es un forjado el efecto diafragma transmite el empuje a los muros o diafragmas laterales.³⁰

³⁰ (Construcción de estructuras de Madera, pág. 120)

CAPÍTULO 4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN MÓDULO DE MADERA

En el presente capítulo se explicará el proceso constructivo general de la elaboración de los entramados de madera. (Capítulo 6).

FABRICACIÓN, ENSAMBLAJE Y TRANSPORTE DE LOS MÓDULOS DE MADERA.

4.1. PREPARACIÓN DEL PISO

4.1.1. ESTRUCTURA

- Se preparan y se colocan las viguetas de piso y las costaneras a las medidas exactas para el pre armado, el cual se efectuara con la parrilla invertida (de cabeza) ya que de esa forma se facilita la colocación de soportes y de enchape inferior a piso de los módulos. Esta se debe colocar luego en su correcta orientación. Se verifica mediante cintas métricas y que cumpla con la ISO 9001³¹.
- Para la aprobación de cada elemento estructural se debe verificar su escuadra. Para ello, se mide el perímetro y diagonales de la estructura, revisando que ambas medidas sean iguales a la proyectada en los planos o estar dentro de la tolerancia establecida; en el perímetro, 4 milímetros, y diagonales, 5 milímetros; de no ser así se debe recuadrar.
- Luego, se conforma el marco de la parrilla de piso cuyas uniones son clavadas mediante el uso de pistolas neumáticas y clavos espiralados de 2 ½” en rollo.
- Las viguetas costaneras se encolan para adherir firmemente la segunda vigueta que completará el marco de piso y las viguetas de borde también son clavadas, asegurando su unión. Las viguetas adicionales, se colocan en las zonas donde se apoyarán los muros.
- Posteriormente, se fijan asientos metálicos que contribuirán en el soporte de las viguetas. A continuación, se encola la cara visible para colocar la tapa de OSB que quedará al inferior de la parrilla. OSB es pegado y clavado a la estructura del piso.
- Culminado el fondo de piso, el elemento es izado y volteado a su posición final.

³¹ Norma internacional que se aplica a los sistemas de gestión de calidad (SGC).

4.1.2. INSTALACIONES SANITARIAS

- Se realiza el montaje de la batería en la ubicación donde se ha predispuesto instalaciones sanitarias. Las instalaciones de desagüe se realizan embebidas en la plataforma de piso, con la debida pendiente y diámetros requeridos. Los cruces de viguetas se realizan con tuberías de diámetro máximo de 2” para no afectar estructuralmente el elemento.
- Aquellas tuberías de más de 2” se recorren paralela a la estructuración de las viguetas y verticalmente en las bajadas o montantes de pisos superiores a través de ductos exclusivos para este fin.
- Se coloca la lana de vidrio, aislante térmico, en las cavidades de entre viguetas.
- Finalizado lo anterior, se procede al clavado de unos listones de madera terciada que servirán de soporte para los bordes de la plancha de terciado fenólico que servirá de piso al módulo.
- Los listones encajan en rebajes previamente preparados a fin de que todo quede al ras de las viguetas. Luego, se atornilla el panel de terciado a la estructura y se masillan las uniones de paneles de piso y cualquier agujero por cabeza de tornillo y se pule toda la superficie.
- Finalmente, se aplica el pegamento para piso de manera uniforme y se coloca sobre esta superficie el piso vinílico en rollo pre dimensionado sellando las uniones con material termo fusionado.

Ilustración 4.1 Proceso constructivo del armado de los pisos.



4.2. PREPARACIÓN DE MUROS

4.2.1. ESTRUCTURA

- La fabricación de muros es muy similar a la preparación del piso; sin embargo, en el proceso de elaboración se realiza con viguetas de madera de 4" de ancho x 2" de espesor.
- Montaje de muros sobre piso: se ensamblan los muros sobre la plataforma de piso y se fijan debidamente con tirafones, de igual manera se fijan los encuentros; estas fijaciones deben seguir estrictamente los detalles proporcionados en los planos.
- Montaje de techo sobre muros: la plataforma de techo se prepara en una línea de producción paralela, y su fabricación es muy similar a la del piso.
- Previamente al montaje, el techo es revestido con planchas de yeso cartón tipo "volcanita" resistente al fuego RF en la cara interior, cuyo acabado es similar al de los muros.

4.2.2. INSTALACIONES ELÉCTRICAS Y SANITARIAS

- Las instalaciones eléctricas, sanitarias y el aislamiento térmico-acústico se realizan sólo en una cara revestida de muros y techo en el módulo.
- Los diámetros de la canalización eléctrica no afecta la estructura. Se pueden realizar instalaciones adosadas visibles en canaletas plásticas en caso de tener excesivos circuitos.
- Las instalaciones sanitarias en muros se colocan de manera similar a las II.EE. pero en este caso se utilizan refuerzos de madera para evitar cualquier desprendimiento al momento de la colocación de los aparatos sanitarios.
- Se coloca la lana de vidrio en todas las cavidades entre parantes, tanto de muros como de techo y se tapan lo muros y techos con OSB atornillado a la estructura.
- Luego, se coloca el revestimiento pre dimensionado impermeabilizante de PVC en el techo.

4.2.3. UNIONES

El conjunto del Sistema modular para edificio de tres niveles, se apoya sobre cimentación de concreto armado. El módulo del primer nivel debe fijarse y anclarse a dicha cimentación mediante seis ángulos metálicos cuyo detalle se muestra a continuación.

Ilustración 4. 2 Detalle de anclaje del módulo a la cimentación (corte).

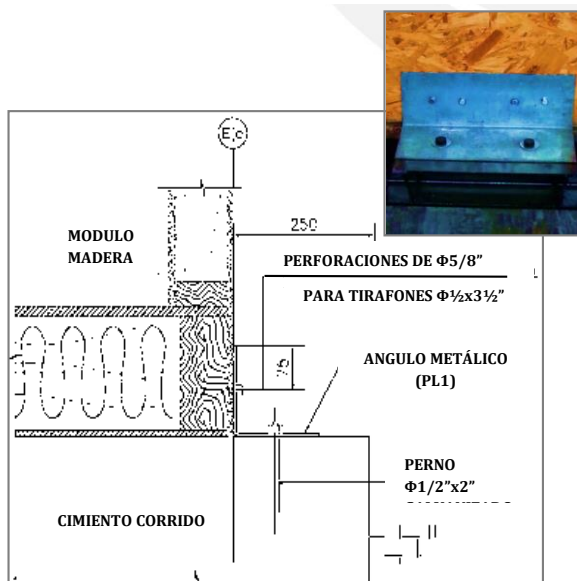
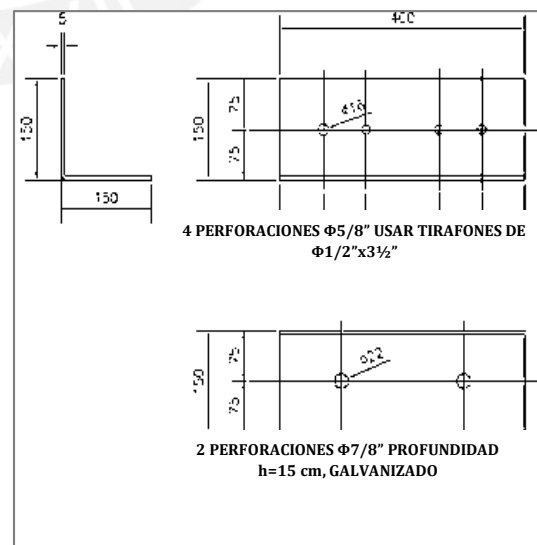
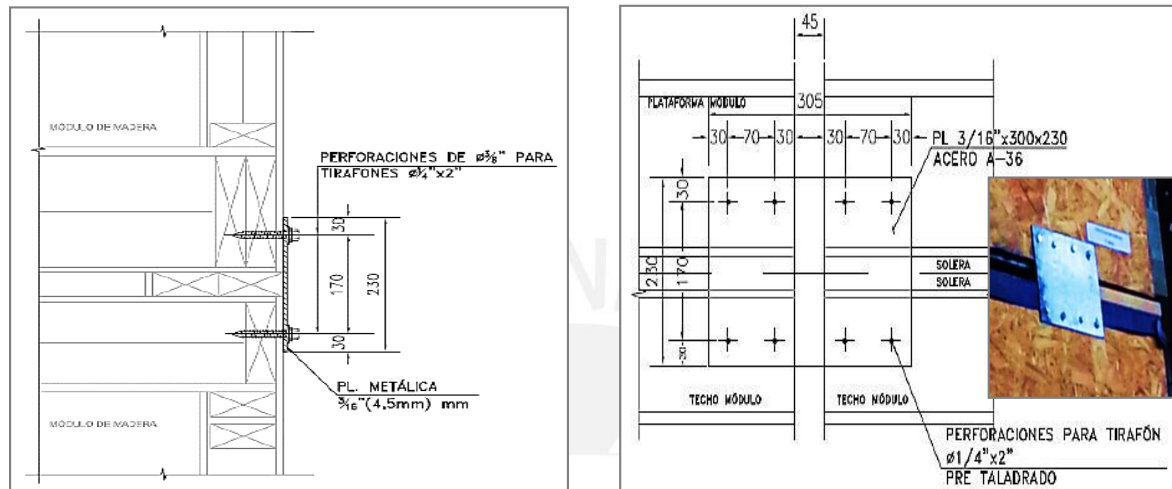


Ilustración 4. 2 Detalle del ángulo metálico de fijación (PL1)



Entre cada módulo apilado también se considera elementos de unión a fin de limitar el desplazamiento relativo entre módulos de distintos niveles. Se consideran seis elementos de unión para cada encuentro entre nivel, totalizando doce elementos para los tres niveles.

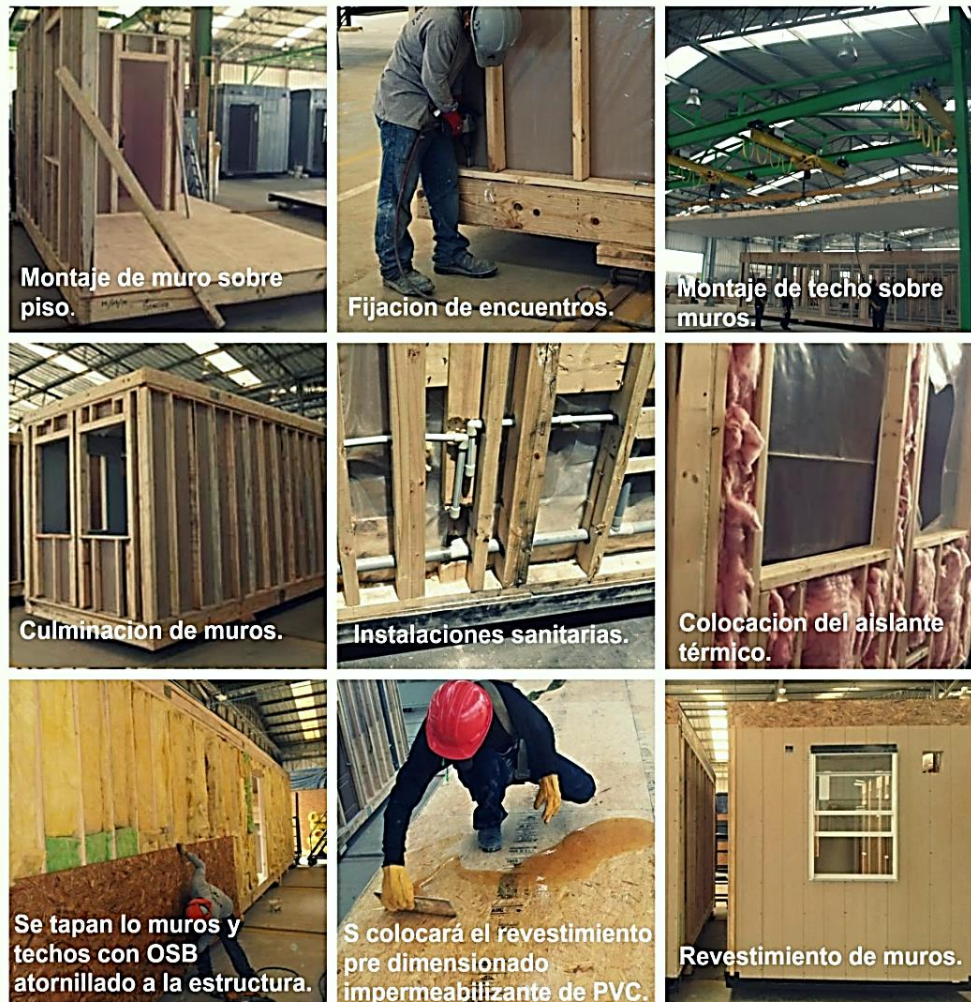
Ilustración 4.3 Detalle de la unión entre niveles; módulos apilados



4.2.4. CERRAMIENTOS

- Posteriormente, se realizarán los acabados interiores, colocación de equipos eléctricos y sanitarios, carpintería.
- Para terminar, se revisten los muros exteriores con OSB texturado, en formato y color dependiendo del tipo del proyecto y culminadas las inspecciones de Calidad los módulos quedan sellados y listos para ser transportados a obra.

Ilustración 4. 4 Proceso constructivo del armado de las paredes.³²



4.2.5. TRANSPORTE Y ENSAMBLAJE

- El transporte de los módulos se realizan sobre camiones plataforma, los cuales deben estar asegurados de tal manera que no exista deslizamiento durante el traslado. Se aconseja que la fijación de los módulos al camión plataforma deberá contar con un mínimo de dos estabilizadores de carga de 3” con trinquete en perfectas condiciones, sin picaduras ni cortes.
- El montaje de los módulos se realiza con grúa con capacidad de carga según el peso de los módulos a ensamblar, las dimensiones, las distancias y las facilidades que se tengan en el terreno de ejecución. Posteriori, se ejecutan los acabados exteriores.

³² Proceso constructivo de una empresa maderera en el país

Ilustración 4. 6 Proceso de transporte y ensamblaje de módulos. ³³



³³ Fuente: Empresa maderera en el país

CAPÍTULO 5 ENSAYOS APLICADOS AL PINO RADIATA PARA DETERMINAR SUS PROPIEDADES

RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYOS

5.1. PROPIEDADES FISICAS

5.1.1. DENSIDAD BÁSICA

Para la determinación de la densidad básica del espécimen en estudio se siguió el procedimiento especificado en la Norma ASTM D 143-14. En la siguiente tabla muestra el resumen de los datos obtenidos tras el ensayo y la determinación de la densidad básica para la especie Pino Radiata. Como este valor solo es calculado cuando la madera alcanza un contenido de humedad de 30% a más, solo se consideró las dimensiones tras 48 y 72 horas de ser sumergido, teniendo como resultado de 0.35 g/cm³ de densidad básica para la madera Pino Radiata. Cabe resaltar que únicamente se ha utilizado un espécimen para el ensayo por lo que el valor hallado es solo referencial.

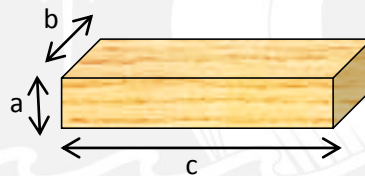


Tabla 5. 1 Resultados del ensayo de densidad básica para un espécimen de Pino Radiata. Laboratorio de Estructuras PUCP.

Estado	Lado a (mm)	Lado b (mm)	Lado c (mm)	Masa (g)	Contenido de humedad (%)	Densidad Básica (g/cm ³)
Anhidra	-	-	-	138.80	-	-
24 hr sumergido	-	-	-	169.80	22.30	-
48 hr sumergido	51.15	51.30	151.70	182.40	31.40	0.35
72 hr sumergido	51.05	51.00	151.70	187.10	34.80	0.35

5.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

A continuación se exponen los resultados obtenidos en los ensayos aplicados a tres especímenes de la especie Pino Radiata para determinar sus propiedades mecánicas, cumpliendo con los requerimientos de la norma ASTM D143.

5.2.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELA

La carga se aplicó a una velocidad constante del orden de 0.60 mm por minuto hasta alcanzar la falla.

Tabla 5.2 Resistencia a la compresión paralela a la fibra.

ENSAYO DE COMPRESION PARALELA A LA FIBRA								
#	L	A	E	Area Bruta	Carga máxima		f'a	
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ²)	(KN)	(KG)	(Mpa)	(Kg/cm ²)
1	20	5	5	25	71.9	7332.8	28.8	293.3
2	20	5	5	25	69.2	7052.7	27.7	282.1
3	20	5	5	25	65.3	6657.9	26.1	266.3
Promedio							27.5	280.6
Desv. Est.							1.3	13.6
C.V (%)							4.8	4.8

5.2.2. RESISTENCIA A LA COMPRESION PERPENDICULAR

La carga se aplicó a una velocidad constante del orden de 0.3 mm por minuto hasta alcanzar una deformación de 2.5 mm.

Tabla 5.3 Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra.

ENSAYO DE COMPRESION PERPENDICULAR A LA FIBRA								
#	L	A	E	Area Bruta	Carga máxima		f'a	
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ²)	(KN)	(KG)	(Mpa)	(Kg/cm ²)
1	15	5	5	25	20.1	2049.7	8.0	82.0
2	15	5	5	25	19.9	2027.8	8.0	81.1
3	15	5	5	25	21.4	2184.9	8.6	87.4
Promedio							8.2	83.5
Desv. Est.							0.3	3.4
C.V (%)							4.1	4.1

5.2.3. RESISTENCIA AL CORTE

La carga se aplicó a una velocidad constante del orden de 0.60 mm de por minuto de avance de la cizalla, hasta alcanzar la falla, solo se registra la carga máxima.

Tabla 5.4 Resistencia al Corte Paralelo a la fibra.

ENSAYO DE CORTE PARALELO A LA FIBRA									
#	H	A	a	e	Area de seccion en corte	Carga máxima			C
	(cm)	(cm)	(cm)		(cm ²)	(KN)	(KG)	(Mpa)	(Kg/cm ²)
1	5.6	4.9	5	5	24.5	17.9	1827.7	7.3	74.6
2	5.6	4.8	5	5	24	15.8	1610.4	6.6	67.1
3	5.6	4.9	5	5	24.5	17.1	1740.0	7.0	71.0
Promedio								7.0	70.9
Desv. Est.								0.4	3.8
C.V (%)								5.3	5.3

5.2.4. RESISTENCIA A LA FLEXION

La carga se aplicó a una velocidad constante del orden 2.5 mm de deformación por minuto hasta alcanzar la falla.

Tabla 5. 5 Resistencia de Flexión

ENSAYO DE FLEXIÓN									
#	L	A	E	Area Bruta	Lo	Carga máxima			T
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ²)	(cm)	(KN)	(KG)	(Mpa)	(Kg/cm ²)
1	75.9	4.8	5	24	71	7.6	776.4	67.6	689.0
2	75.9	5.2	5	26	71	7.2	737.0	59.2	603.8
3	75.9	5.2	5	26	71	5.7	578.7	46.5	474.1
Promedio								57.8	589.0
Desv. Est.								10.6	108.2
C.V (%)								18.4	18.4

5.3. PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LA MADERA

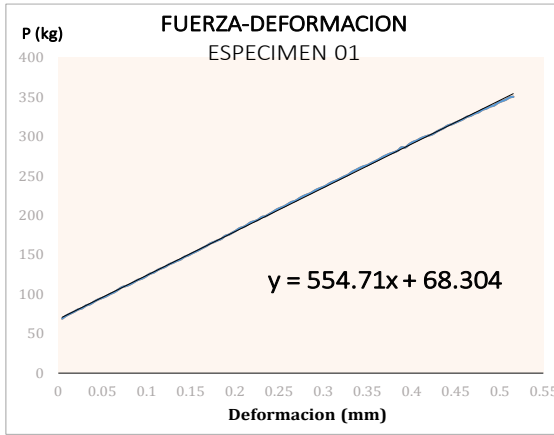
A continuación se muestran los cálculos para la obtención del módulo de elasticidad de la especie en estudio según el ensayo de Flexión.

5.3.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD (E)

Para calcular el módulo de elasticidad se determinó la pendiente de la curva fuerza-deformación de los tres especímenes y se reemplazó en la **ecuación 2** expuesta en el **apartado 2.4.1**, donde P/Δ se obtiene de la pendiente de los siguientes gráficos:

$$E_f = \frac{P * L^3}{\Delta * 4 * a * h^3}$$

Gráfico 5. 1 Módulo de Elasticidad para el espécimen 01.

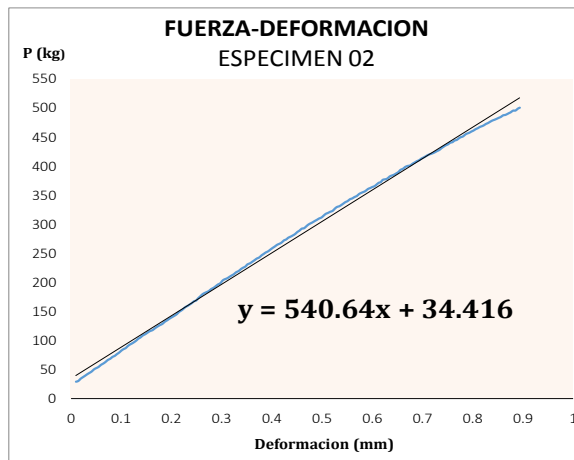


$$E_f = \frac{71.00^3}{4 \times 4.80 \times 5^3} \times 554.7$$

$$= 82,723.67 \frac{kg}{cm^2}$$

$$= 8,112.42 MPa$$

Gráfico 5. 2 Módulo de Elasticidad para el espécimen 02.

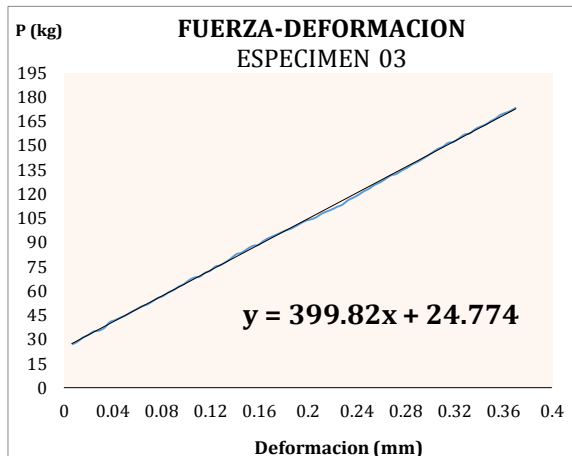


$$E_f = \frac{71.00^3}{4 \times 5.20 \times 5^3} \times 540.64$$

$$= 74,423.46 \frac{kg}{cm^2}$$

$$= 7,298.45 MPa$$

Gráfico 5. 3 Módulo de Elasticidad para el espécimen 03.



$$E_f = \frac{71.00^3}{4 \times 5.20 \times 5^3} \times 399.82$$

$$= 55,038.45 \frac{kg}{cm^2}$$

$$= 5,397.43 MPa$$

5.3.2. MÓDULO DE CORTE (G)

Para el presente proyecto se consideró 0,225 como módulo de Poisson y con él se evaluó el módulo de corte:

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} = \frac{70,728.50}{2 \times (1 + 0.225)} = 28,868.77 \frac{kg}{cm^2} = 2,831.06 MPa$$

El módulo de corte es de 2,831.06 MPa. Este último será utilizado para completar los datos requeridos para el modelamiento del módulo mediante el programa “Structural Analysis Program” (SAP2000 V17).

5.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.4.1. PROPIEDADES MECANICAS DE LA ESPECIE

➤ ENSAYO DE COMPRESIÓN

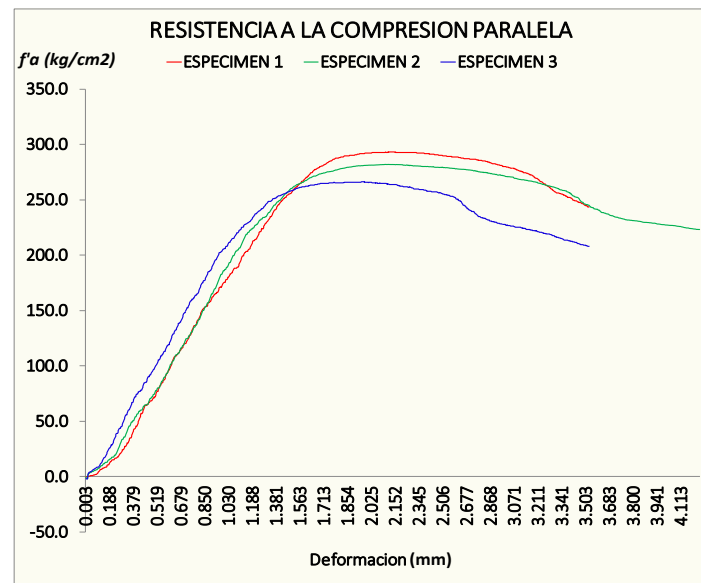
El valor del esfuerzo máximo a compresión en el pino radiata es dependiente de la dirección de las fibras. El esfuerzo máximo a la compresión paralela a la fibra es 3 veces mayor que el esfuerzo máximo a la compresión perpendicular a la fibra. Esta diferencia se presenta principalmente por la contribución de las fibras, las cuales en el ensayo de compresión paralela se encuentran en la misma dirección de la carga y confinadas por la matriz (parénquima).

➤ COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA

El esfuerzo de compresión paralelo al grano promedio determinado (σ_{CP}) para el pino radiata es de 280.60 kg/cm² con una desviación estándar de 13.6 kg/m³ y un coeficiente de variación de 4.8%. Como se observa, los tres especímenes presentan el mismo comportamiento con deformaciones máximas de 4.24 mm.

Según los resultados, podemos concluir que los especímenes ensayados estaban libres de defectos ya que la Relación σ - ϵ es prácticamente lineal en la primera fase y luego no lineal en la segunda. A continuación se expone la gráfica resultante del análisis.

Gráfico 5. 4 Ensayo de Compresión Paralela a la fibra



➤ COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA

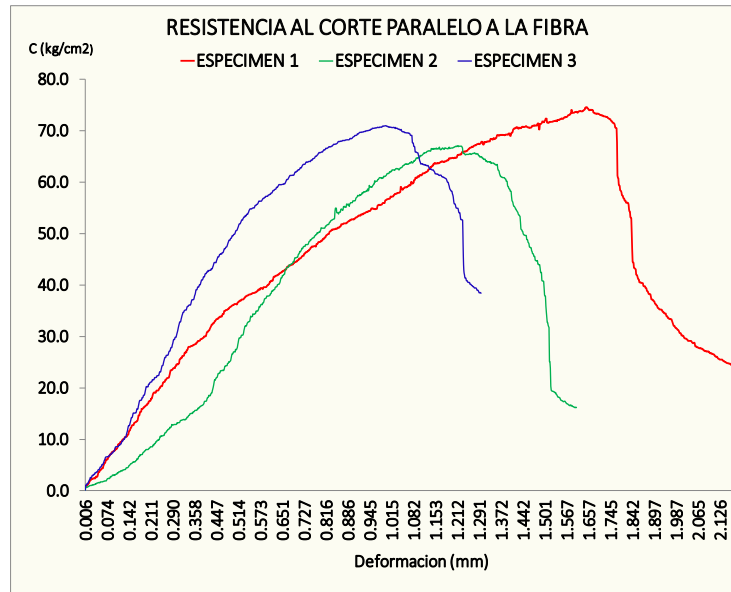
El esfuerzo de compresión perpendicular al grano promedio determinado (σ_{CN}) para el pino radiata es de 83.5 kg/cm² con una desviación estándar de 3.4 kg/m³ y un coeficiente de variación de 4.1. El comportamiento esfuerzo–deformación es lineal en una primera etapa y luego tiene una deformación plástica, debido al aplastamiento de la madera, sin llegar a la rotura clara. A continuación se expone la gráfica resultante de los datos del laboratorio de estructuras. Como se observa los tres especímenes presentan el mismo comportamiento con deformaciones máximas de 2.40 mm.

Gráfico 5. 5 Ensayo de Compresión Perpendicular a la fibra 6

➤ ENSAYO AL CORTE PARALELO A LA FIBRA

El esfuerzo de corte paralelo al grano promedio básico determinado (σ_{VP}) para el pino radiata es de 70.9 kg/cm² con una desviación estándar de 3.8 kg/m³ y un coeficiente de variación de 5.3%.

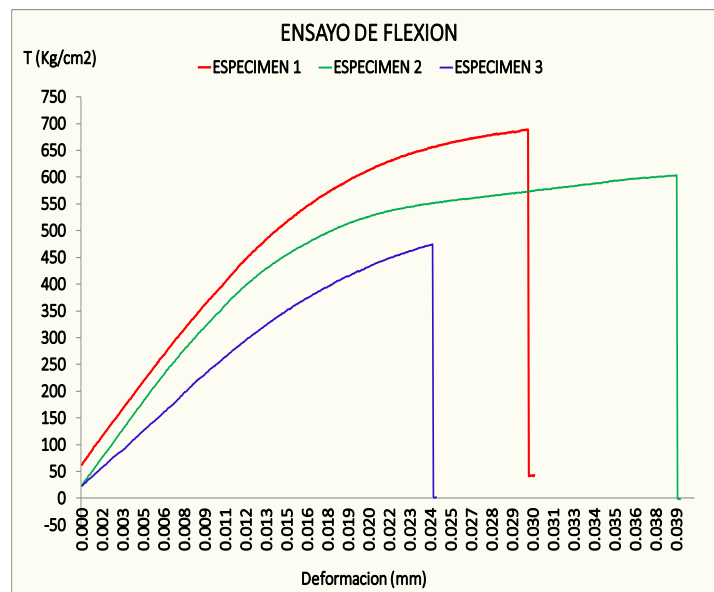
Gráfico 5. 6 Ensayo al Corte Paralelo a la fibra



➤ ENSAYO DE FLEXIÓN

El esfuerzo de flexión promedio básico determinado (σ_P) para el pino radiata es de 589 kg/cm² con una desviación estándar de 108.2.6 kg/m³ y un coeficiente de variación de 18.4%. El módulo de elasticidad encontrado para el pino radiata 70728 kg/cm² está muy cerca del propuesto por literatura consultada 80000 kg/cm².

Gráfico 5. 7 Ensayo de Flexión



5.4.2. AGRUPAMIENTO DE LA MADERA

- Al no realizar el procedimiento expuesto por la norma que consiste en ensayar un mínimo de 30 vigas provenientes por lo menos de 5 árboles por especie, resultaría inexacto clasificar la especie en la norma nacional debido a que la densidad obtenida en nuestro ensayo de densidad básica (0.35 g/cm³) está fuera del rango de la norma N.T.P E.010. Cabe resaltar que este valor se asemeja al expuesto en la bibliografía (0.39 gr/cm³).³⁴
- El módulo de elasticidad es de **6,936 MPa**, con este valor podríamos identificar el comportamiento del Pino Radiata como una madera de clasificación “C” en la NTP E.010. Según el artículo N°11 de la NTP E.010, existe la posibilidad, en un futuro, de clasificar la madera para densidades por debajo de 0.4 g/cm³ pero esto aun no se ha definido.

Tabla 5.6 Agrupamiento de la especie Pino Radiata peruanas según propiedades mecánicas conocidas

NTP. E.010		
Clasificación	Densidad básica (gr/cm ³)	Módulo de elasticidad a la flexión (Mpa)
A	>0.71	9,316
B	0.56 a 0.70	7,355
C	0.40 a 0.55	5,394
	0.35	9,911
Valores Obtenido	0.35	8,916
	0.35	6,594

- Además, según los resultados obtenidos, para un módulo de rotura a la flexión promedio de 58 Mpa la especie clasifica como ES6 según la Norma Chilena 1989. Para una tensión máxima de compresión paralela de 28.8 Mpa, la especie clasifica como ES7. En el caso del Módulo de elasticidad obtenemos valores con un promedio de $E_f = 6,936.1$ Mpa clasificando como una ES6. Según el criterio expuesto por la norma Chilena (ver *Tabla 5.7*), la clasificación final es de ES6.

³⁴ (JUNTA ACUERDO DE CARTAGENA. Descripción General y Anatómica de 105 Maderas del Grupo Andino. Lima-Perú. 1981. 442p)

Tabla 5. 7 Agrupamiento de la especie *Pino Radiata* peruanas según Norma Chilena

	Grupo	Módulo de rotura a la flexión	Módulo de elasticidad a la flexión	Tensión máxima de compresión paralela
Norma NCH1989	ES1	130	19,860	77
	ES2	110	16,160	65
	ES3	94	13,200	55
	ES4	78	10,250	46
	ES5	65	7,850	38
	ES6	55	6,000	32
	ES7	45	4,150	26
Valores Obtenido	ESPECIMEN 1	68	8,112	29
	ESPECIMEN 2	59	7,298	28
	ESPECIMEN 3	46	5,397	26
PROMEDIO		59	6,936	28
CLASIFICACION		ES6	ES7	ES6
CLASIFICACION FINAL		ES6		

- Cabe resaltar que la NCh1989 es una norma específica para la clasificación estructural del *Pino radiata* en Chile. Esta norma clasifica a la especie como ES5 para estado seco. Podemos justificar esta diferencia por la cantidad de especímenes a ensayar (03) en el presente estudio.

CAPÍTULO 6 COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UNA VIVIENDA DE MADERA DE 3 PISOS

ENSAYO DE SIMULACIÓN SÍSMICA DE UNA VIVIENDA DE MADERA DE 3 PISOS

El objetivo de este capítulo es conocer el comportamiento sísmico de diafragmas contruidos de madera. Para ello se realizaron ensayos de una vivienda de tres pisos a escala natural en el simulador sísmico del Laboratorio de Estructuras de la PUCP, la misma que fue sometida a sollicitaciones similares a las que se producen durante los sismos.

6.1. CARACTERÍSTICAS

La vivienda ensayada consistió en módulos de madera a escala natural, apilados uno sobre otro y ensamblados mediante uniones metálicas. El diseño de los módulos, proporcionado por una empresa maderera, fue simétrico para evitar efectos indeseables de torsión durante los ensayos.

En el caso que los elementos estructurales del edificio no estén dispuestos simétricamente en planta o cuando los centros de masas (CM) de los distintos niveles no estén contenidos en el mismo eje vertical, existirá rotación de la losa de los techos, torsionándose el edificio cuando actúe un sismo.³⁵

6.1.1. MURO EXTERIOR E INTERIOR (DIVISORIOS):

- **Sistema:** Estructura de madera (pie derecho y soleras) de pino radiata, H=12%, con dimensiones de 42mm x 90mm de sección, distribuidos verticalmente cada 406.6mm y con aislamiento térmico de lana de vidrio de 90mm (R-12).
- **Revestimiento:** En el interior, se usa placa de yeso-cartón empapelada de 15 mm RF (resistente al fuego); y en exterior se reviste con una membrana de Polietileno de 0.15mm impermeabilizante y plancha de OSB de 9.5 mm (encolada y clavado).

6.1.2. TECHO

Estructura de madera de pino radiata, con vigas de 42mmx140mm cada 406.6mm con aislamiento térmico de lana de vidrio de 90.0mm (R-12). El forro exterior es de OSB de 15mm (encolado y clavado).Hacia el interior es revestido con placa de yeso-cartón de 15mm tipo RF (resistente al fuego).

³⁵ (Bartolomé, 1998)

6.1.3. PLATAFORMA DE PISOS

La estructura del piso está compuesta por vigas de madera de pino radiata 42mmx190mm H=12%, colocadas cada 406.6mm, aislado térmicamente con fibra de vidrio de 90mm (R-12). La estructura se reviste con OSB de 9.5mm al exterior y terciado estructural de 15mm (encolado y atornillado) hacia el interior.

6.2. DIMENSIONES, MODULACIÓN, PESO

Las dimensiones de los elementos verticales del módulo en estudio son de altura constante de 2.44 m, correspondiente a la altura de piso a techo de cada unidad modular, y la longitud depende de la arquitectura definida, pudiendo ser hasta 14m de largo por la limitación en el transporte.

Tabla 6. 1 Características del módulo ensayado.

DIMENSIONES DE LOS MÓDULOS			
	Muros	Pisos	Techos
Largo (mm)	2200 - 4610	4610	4610
Altura (mm)	2446	3030	3030
Espesor (mm)	90	190	140
Peso (kg/m ²)	32.7	47.8	29.5

El módulo fue ensamblado sobre un anillo metálico de cimentación, de configuración rígida previamente construido, cuyo peso fue estimado en 570 kg. Cada módulo pesa 2500kg. El peso neto del sistema modular (incluyendo la sobrecarga de uso) por área en planta ($w = M_{\text{módulo de 3 pisos}} / A_{\text{Planta}}$, donde $A = 4 \times 3 = 12 \text{m}^2$) es $w = 1025 \text{ kg/m}^2$.

Tabla 6. 2 Peso registrado de los módulos (kgr)

Identificación del Módulo	Peso registrado de los módulos (Kgr)			Area (m ²)	Peso / Area $w = w_2 / A$
	w1	w2 + S/C	wt = w1 + w2 + S/C		
Módulo	Cimentación (Anillo metálico)	Módulo de 3 pisos + S/C (de 200 kg/m ²)	Total sobre la plataforma del Simulador de Sismos	Area en planta (4.0x3.0)	Peso Módulo / Area en planta (kg/m ²)
	570	7500 + 4800	12870	12	1025

6.3. ESQUEMA FÍSICO DEL PROYECTO

La planta rectangular del módulo es de 4.0 x 3.0 m, con tres niveles que darán una altura de 8.62 m en total. El modulo cuenta con conexiones metálicas típicas del proceso constructivo.

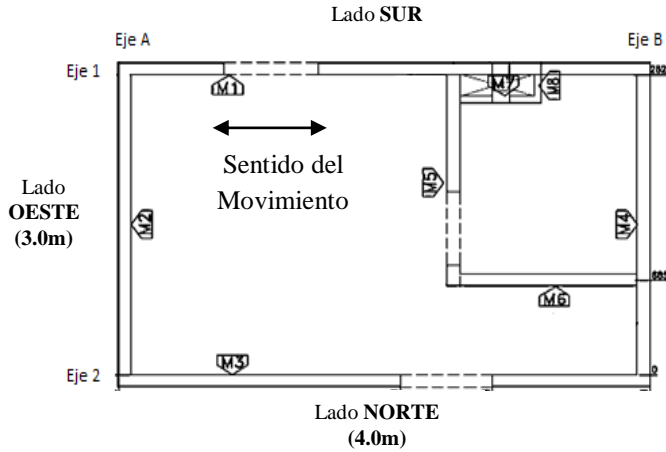


Ilustración 6. 1
Características geométricas
típicas (en planta) de los
módulos.

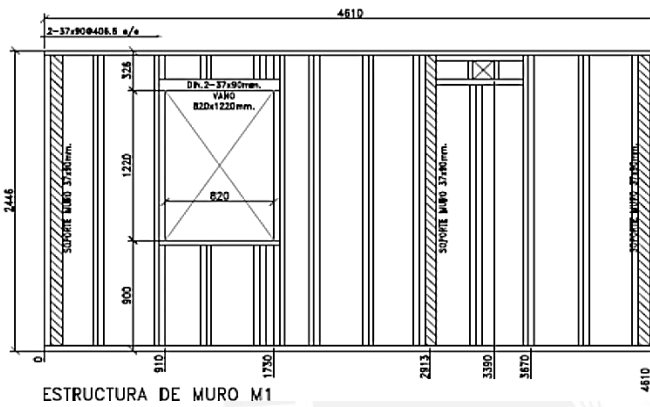


Ilustración 6. 2 Planos del módulo a
ensayar. Estructura muro. Lado
SUR.

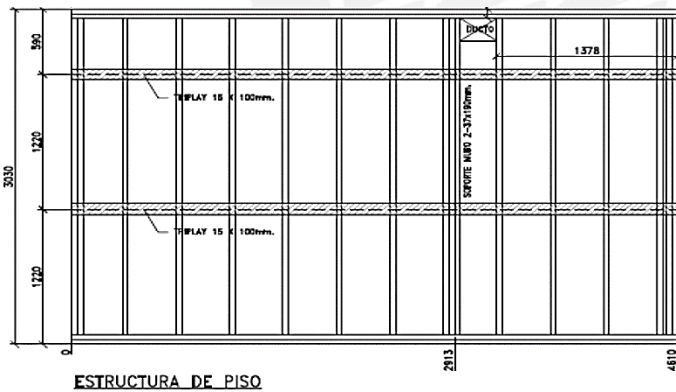


Ilustración 6. 3 Planos del módulo a
ensayar. Estructura piso.

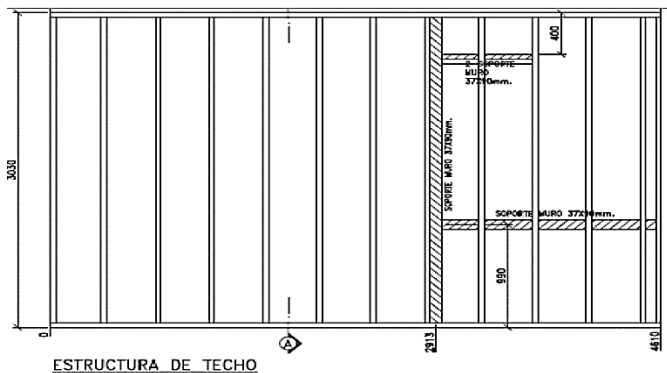
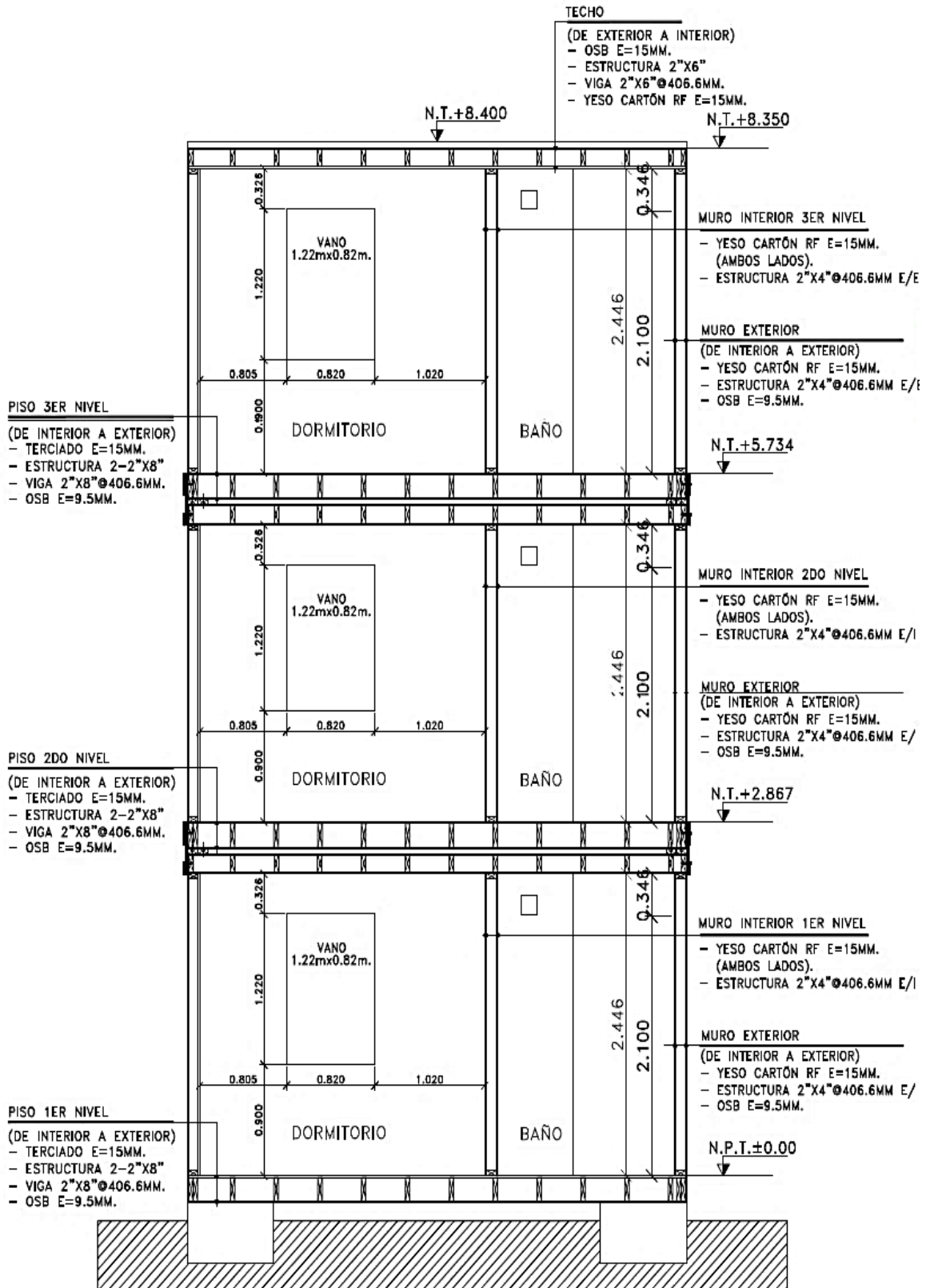


Ilustración 6. 4 Planos del módulo a
ensayar. Estructura techo.

Ilustración 6. 5 Foto del módulo real. Proceso de colocación de carga viva en el 3er nivel



Ilustración 6. 6 Detalles de elementos que componen el sistema de entramado de madera



6.4. EQUIPO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTACION

6.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MESA VIBRADORA

El movimiento de la mesa vibradora del laboratorio de estructuras es en dirección horizontal con una aceleración máxima de 1.6g y amplitud máxima de 150 mm aproximadamente. El peso máximo disponible a ensayar sobre la mesa es de 160 KN. Pesa alrededor de 18020 kgf y el área en planta del ensayo es de 4.4m x 4.4m. ³⁶

6.4.2. INSTRUMENTACION DE SENSORES

La instrumentación consistió en colocar 15 transductores de desplazamiento lineal (LVDT) y 6 de aceleración horizontal (acelerómetros) colocados en lugares específicos de los módulos ensayados, para medir tanto la excitación sísmica como la respuesta estructural. Estos midieron la sollicitación sísmica de entrada (Ao, Do, Fa) y la respuesta estructural del espécimen (A1 al A6 y del D1 al D15). La *Ilustración 6.7* presenta la ubicación específica de los instrumentos.

6.5. EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

6.5.1. VIBRACIÓN LIBRE

Antes y después de cada fase del ensay, el módulo es sometido a una prueba de vibración libre la cual consiste en la aplicación de 4 pulsos con una amplitud pequeña de 1.5 mm en la mesa vibratoria, dejando un tiempo suficiente entre cada pulso para que el módulo pueda vibrar libremente. El objetivo de esta prueba fue verificar la operatividad de los instrumentos y medir las propiedades dinámicas de los módulos (frecuencia, periodos naturales y amortiguados; y el factor de amortiguamiento del módulo).

6.5.2. SEÑAL SÍSMICA

Se usó la misma señal de desplazamientos para todos los ensayos. Esta señal fue derivada del registro (componente longitudinal) del sismo del 31 de Mayo de 1970 en la dirección N82E, captado en el Instituto Geofísico del Perú, correspondiente a las condiciones de suelo de la ciudad de Lima (grava densa). La parte del movimiento fuerte del registro de aceleraciones se filtró, integro numéricamente y normalizó de acuerdo a las especificaciones del sistema de control del simulador.

³⁶ Fuente: Laboratorio de Estructuras

6.5.3. FASES DE LOS ENSAYOS

La intensidad del movimiento fue variable para simular sismos tanto leves como moderados y severos. La **Tabla 6.3**, muestra las aceleraciones nominales (A_0) y los desplazamientos asociados (D_0), aplicados en el ensayo de simulación sísmica; sin embargo, estas equivalencias son referenciales y muestran información cualitativa de la severidad del movimiento sísmico simulado.

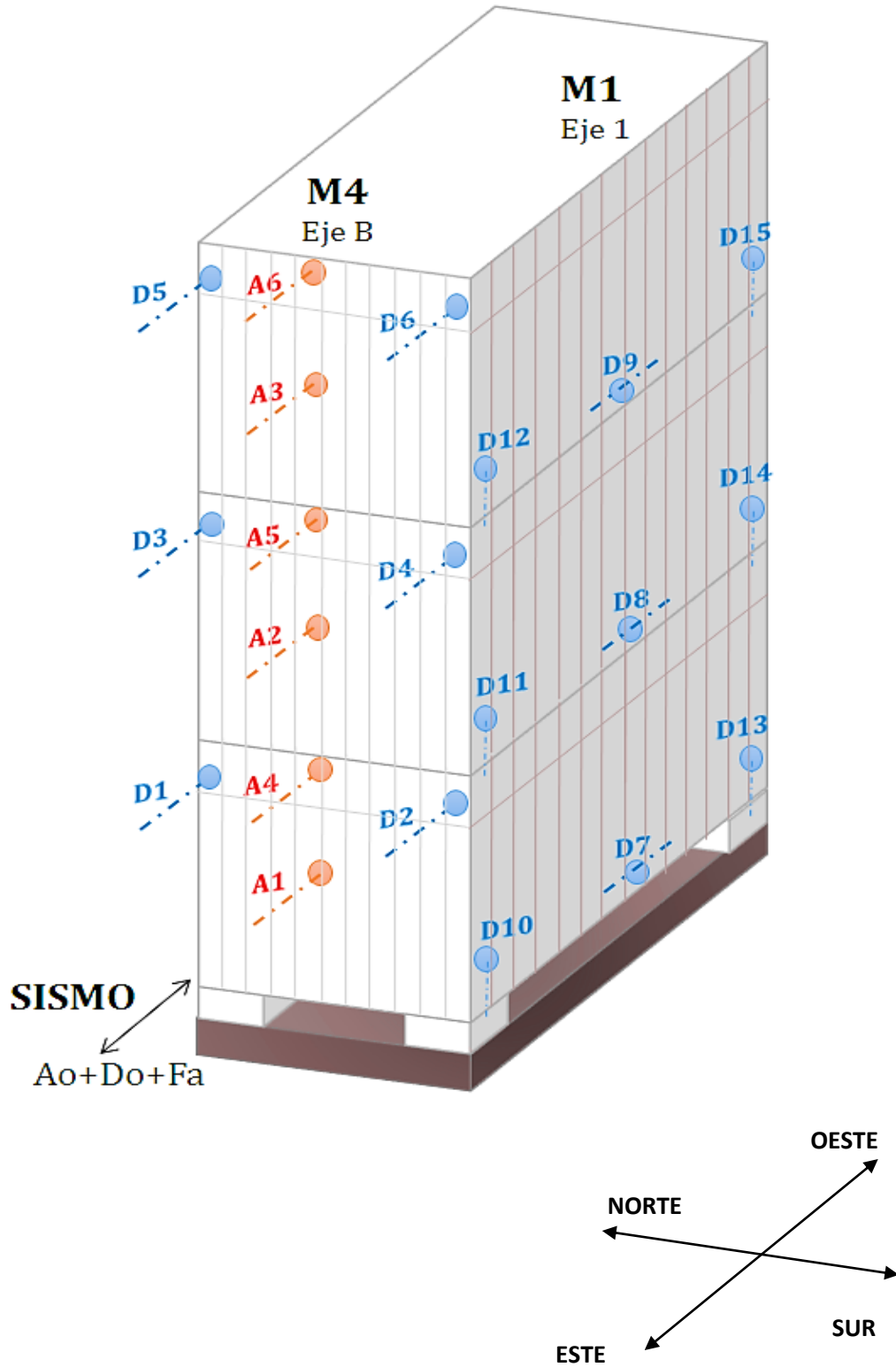
Tabla 6. 3 Equivalencia de Intensidades MMI con valores nominales de Aceleración (A_0) y de Amplificación de la mesa Vibradora (D_0).

Fase de Ensayo (Señal de comando)	Característica del Sismo	A_0 (g)	D_0 (mm)
1 ($\Delta = 25$ mm)	Frecuente o Leve, VI MM	0.25	25
2 ($\Delta = 50$ mm)	Poco frecuente Moderado (Ocasional), VII MM	0.5	50
3 ($\Delta = 90$ mm)	Intermedio entre Moderado y Severo, VIII	0.9	90

A continuación se muestra una breve explicación de la distribución de los LVDTs y acelerómetros:

- Los acelerómetros se encontraran ubicados en el Eje B M4, distribuidos según las siguientes alturas: A1 (1.34 m), A2 (4.207 m), A3 (6.974 m) miden la aceleración absoluta transversal del centro de cada nivel del módulo; mientras que los acelerómetros A4 (2.825 m), A5 (5.692 m) y A6 (8.333 m) miden la aceleración del módulo en cada piso.
- Los LVDT's ubicados en el Eje B M4: D1 y D2 (2.68 m), D3 y D4 (5.547 m) y D5 y D6 (8.214 m) miden el desplazamiento de cada nivel y el efecto torsional si existe diferencia entre ellos.
- Los LVDT's ubicados en el Eje 1 M1, distribuidos según las siguientes alturas: D10 y D13 (0.30 m), D11 y D14 (3.167 m) y D12 y D15 (6.034 m) miden la respuesta inferior del primer, segundo y tercer piso respectivamente.
- Los LVDT's ubicados en el Eje 1 M1, distribuidos según las siguientes alturas: D7 (0.30 m) miden la respuesta en el entrepiso (en el nivel de la conexión entre la cimentación y el modulo del primer piso); D8 (2.967 m) y D9 (5.84 m) miden la respuesta en el entrepiso (en el nivel de la conexión entre el modulo y modulo).

Ilustración 6. 7 Distribución de Acelerómetros y LVDT's en el módulo.



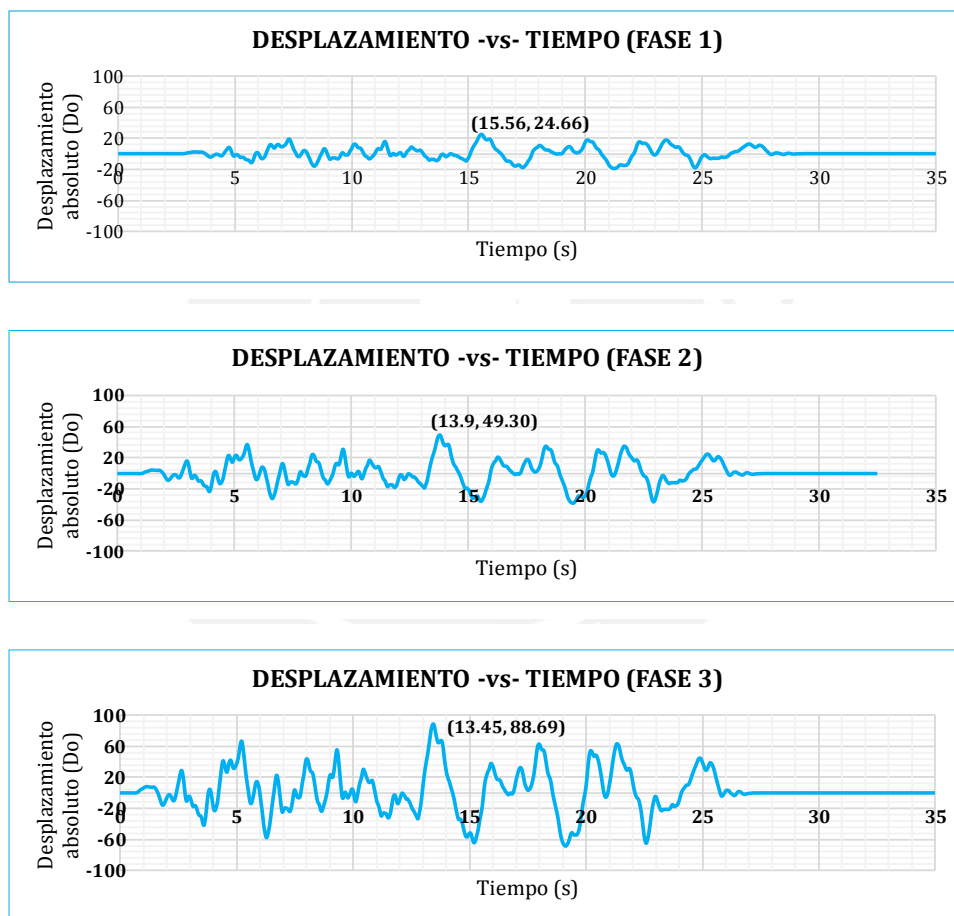
CAPÍTULO 7 ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS MÓDULOS

7.1. RESPUESTA EN VIBRACION LIBRE

Durante la ejecución de los ensayos se registró la respuesta del simulador ante la señal de comando utilizada (Mayo70) y se registraron los desplazamientos y aceleraciones en la plataforma d a mesa vibradora.

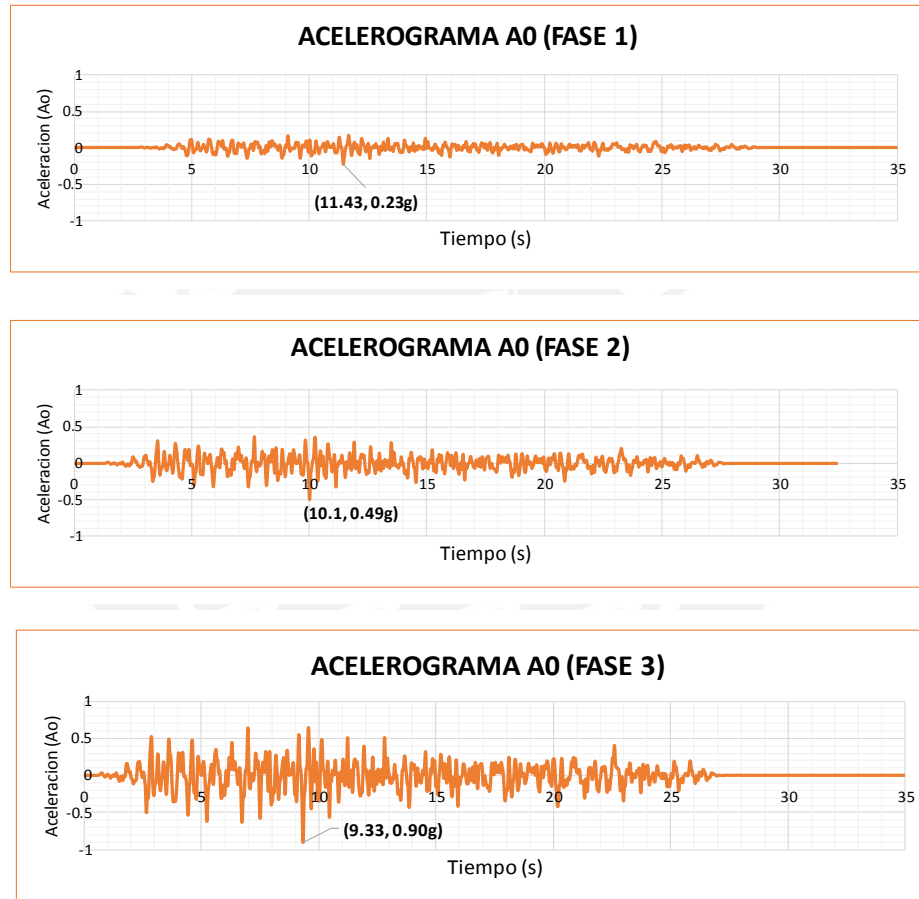
Gráfico 7. 1 Desplazamiento de la plataforma de la mesa en cada fase para el módulo de madera de tres pisos.



La respuesta del simulador fue bastante precisa al registrar valores muy cercanos a la señal de comando. A pesar que no hubo un determinado control sobre las aceleraciones, se pudo hallar una correlación entre los desplazamientos y las aceleraciones máximas de la mesa.

Para las tres fases de 25mm, 50mm y 90mm se registraron aceleraciones máximas aproximadas de 0.25g, 0.50g y 0.90g respectivamente en la mesa vibradora. Un factor de correlación aproximado entre desplazamiento y aceleraciones máximas podrá ser entonces 0.01g/mm.

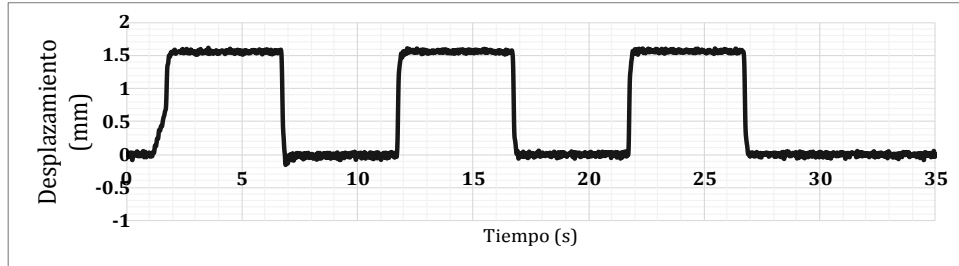
Gráfico 7.2 Acelerograma de las tres fases registradas en la mesa vibratoria para el módulo de madera de tres pisos.



La energía aplicada al módulo es de especial interés. En un sismo real se pueden producir movimientos en el suelo en hasta 6 direcciones (3 traslacionales y 3 rotacionales). Entonces es evidente que la energía aplicada al módulo durante un ensayo en la mesa vibradora con una dirección unidireccional no será la misma que una vivienda experimenta durante un sismo real con la aceleración de la misma magnitud. Además, también existen diversos factores que influyen durante un ensayo en la mesa vibradora como la mano de obra utilizada, las uniones reales y el procedimiento constructivo empleado.

Como se mencionó en el punto 6.5.1 se aplican pulsos a la estructura antes y después de realizar el ensayo sísmico. El objetivo de esta prueba fue verificar la operatividad de los instrumentos y medir las propiedades dinámicas de los módulos (frecuencia y periodos, naturales y amortiguados, y el factor de amortiguamiento del Módulo)

Gráfico 7.3 Señal registrada durante la vibración libre para el ensayo.

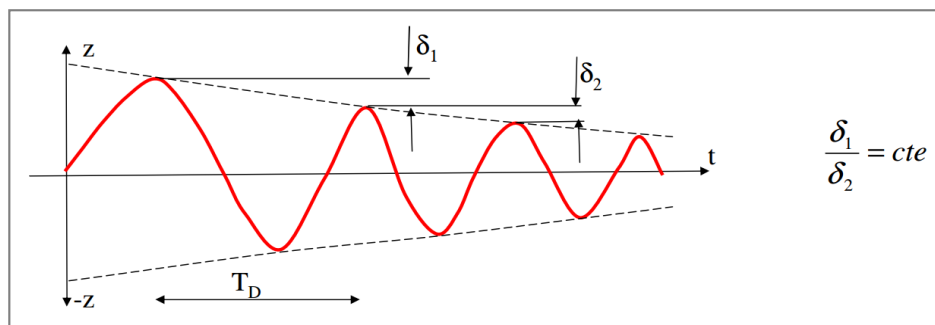


Durante la Vibración Libre (VL), la mesa se encontraba aun en movimiento lo que generan distorsiones. Sin embargo, se mantuvo la premisa en los cálculos de VL y las distorsiones que podrían influenciar en los resultados. Dado que la respuesta de una estructura en VL se define como la respuesta de la estructura cuando cesan las excitaciones dinámicas externas aplicadas a esta, se consideró como VL a parte de la señal inmediatamente posterior al pulso.

7.1.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO

El grado de amortiguamiento se evaluará mediante la fórmula del decremento logarítmico. El amortiguamiento es un mecanismo de la estructura que disipa la energía y reduce los desplazamientos de la respuesta de la estructura. Por lo tanto, una medida del decaimiento en la respuesta nos permite obtener el valor del amortiguamiento.

Ilustración 7.1 Esquema del decremento logarítmico para una señal.



En los movimientos vibratorios amortiguados la frecuencia natural de vibración es muy similar a la frecuencia natural sin amortiguamiento, por lo tanto en las aplicaciones prácticas generalmente se utiliza $w \approx w_D$ y por consiguiente $T \approx T_D$. A su vez la amplitud del movimiento está ligada a una ley de variación exponencial del tipo $z = e^{-(ct/2m)}$. La relación entre dos sucesivas amplitudes espaciadas en un periodo T_D es constante se denomina Decremento Logarítmico.

$$\delta = \ln\left(\frac{Y_1}{Y_2}\right) = 2n\pi\xi$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{2n\pi}$$

Dónde:

δ : Decremento Logarítmico

n : Número de ciclos entre picos

Y_i : Amplitud de desplazamiento o aceleración en un pico

ξ : Coeficiente de amortiguamiento

7.1.2. DETERMINACIÓN DEL PERIODO NATURAL DE VIBRACION

El periodo natural de la estructura T representa el tiempo necesario para completar una oscilación completa³⁷. Para determinar los periodos se analizaran los picos más representativos de las curvas en las fases de vibración libre. La frecuencia amortiguada, frecuencia natural y el periodo natural de vibración se relacionan entre sí con las siguientes ecuaciones:

$$T_d = Y_1 - Y_2$$

$$f_d = \frac{2n\pi}{T_d}$$

$$f_n = \frac{f_d}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}$$

$$T_n = \frac{2n\pi}{f_n}$$

Dónde:

f_d : Frecuencia amortiguada

T_d : Periodo amortiguado

ξ : Coeficiente de amortiguamiento

f_n : Frecuencia natural

T_n : Periodo natural de vibración

Y_i : Amplitud de onda

³⁷ (RUÍZ, 2003)

7.2. RESPUESTA EN ENSAYO DINÁMICO

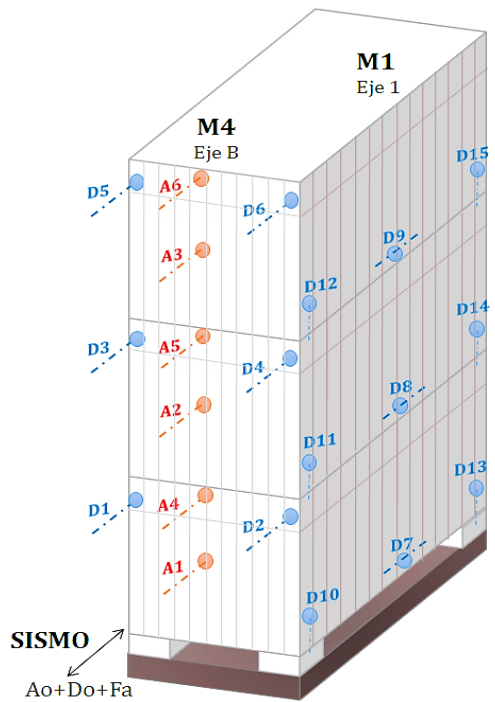


Ilustración 7.2 Distribución de sensores en el módulo ensayado

7.2.1. FASE 1 ($A_0 = 0.25g$):

- Desempeño sismo resistente esperado: Sismo Ocasional

Para la dirección XX del sismo, el desplazamiento máximo del techo en el tercer nivel fue de 3.45 cm y con 0.38% de deriva. El nivel de desempeño sísmico de la estructura frente a un sismo Ocasional sería de ocupación inmediata ya que permanece en estado elástico. No presenta daños y puede ocuparse inmediatamente.

- Análisis de Lazos Históricos

El comportamiento fue prácticamente elástico tal como se puede apreciar en los lazos históricos adjuntos en el Anexo. No se apreció fisuras adicionales a las de contracción de secado o pre-existentes.

- Análisis de deslizamientos horizontales.

Se apreciaron desplazamientos relativos entre los muros pero sin causar fisuras. El análisis de deslizamiento horizontal entre los módulos ha resultado casi imperceptible. El máximo desplazamiento observado en el sensor D8 es de 0.1867 mm regresando a su estado original. Ver ANEXO 2.

- **Análisis de deslizamientos verticales**

Los desplazamientos verticales máximos se encuentran en la base del primer piso con la cimentación, específicamente el sensor D13. Los demás sensores registran desplazamientos verticales de aproximadamente 0.5mm. Ver ANEXO 2.

7.2.2. FASE 2 (A_o = 0.50g):

- **Desempeño sismorresistente esperado: Sismo Raro**

Para la dirección XX del sismo, el desplazamiento máximo del techo en el tercer nivel fue de 6.80 cm y con 0.60% de deriva. El nivel de desempeño sísmico de la estructura frente a un sismo raro sería de ocupación inmediata ya que permanece en estado elástico. No presenta daños y puede ocuparse inmediatamente.

- **Análisis de Lazos Histeréticos**

Según los lazos histeréticos presentados en el ANEXO 2, se muestra que no se conserva la tendencia lineal de la Fase 1. Es probable que hubiese algún error en el registro de datos ya que el comportamiento sigue siendo lineal en la siguiente fase.

- **Análisis de deslizamientos horizontales.**

El máximo desplazamiento hallado se encuentra en el sensor D7 (conexión entre base del primer piso y la cimentación) con 0.72 mm pero no se encuentra muy lejos de los demás valores que arrojan los otros sensores D8 y D9 que en promedio tienen 0.4mm de desplazamiento horizontal. Ver ANEXO 2.

- **Análisis de deslizamientos verticales.**

En esta fase se puede observar que las uniones encargadas de ensamblar módulo con módulo tienden a desplazarse verticalmente. Las uniones más afectadas son la de la cimentación-módulo Piso 1. Estas al ser angulares y con poca rigidez, debido al espesor de 2.5 mm, buscan romper dicho ángulo de 90° para enderezarse. Al finalizar la fase (entre 26s hasta el fin) se ve que la estructura deja de vibrar pero no retorna a su estado original sino que se ha desplazado. El desplazamiento máximo se da en el sensor D13 con 9.27 mm. Los demás sensores presentan desplazamientos verticales menores a 1 mm. Ver ANEXO 2.

7.2.3. FASE 3 (A_o = 0.90g)

- **Desempeño sismorresistente esperado: Sismo Muy raro**

Para la dirección XX del sismo, el desplazamiento máximo del techo en el tercer nivel fue de 1.20 cm y con 0.90% de deriva. El nivel de desempeño sísmico de la estructura frente a un sismo muy raro sería de ocupación inmediata ya que permanece en estado elástico. No presenta daños ni grietas.

- **Análisis de Lazos Histeréticos**

En el Ver ANEXO 2 se observa un comportamiento lineal de la estructura en respuesta del sismo. No se observó fisuración y el sistema ha conservado.

- **Análisis de deslizamientos horizontales.**

El sensor que marca el máximo desplazamiento horizontal es el D7 con 1.29 mm. Los otros sensores D8 y D9 marcan aproximadamente 0.7 mm. Como se observa nuevamente la zona más propensa a fallar es la unión base del piso 1 con la cimentación. Ver ANEXO 2.

- **Análisis de deslizamientos verticales.**

Durante esta fase el bamboleo se ha incrementado de tal forma que los sensores D10 y D13 marcan entre 9mm y 18mm respectivamente. Los demás sensores marcan desplazamientos menores a 1mm. Se genera el descuadre de la unión que estaba fallando en las anteriores fases.



Ilustración 7.3 Fase 3. Descuadramiento de las uniones de la conexión cimentación- módulo.

7.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

7.3.1. VALORES MÁXIMOS

A continuación se resumen los valores máximos registrados en los instrumentos durante las fases del ensayo:

Tabla 7. 1 Solicitaciones máximas registradas en la mesa vibradora

Instrumento	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Ao (g)	0.165	0.496	0.903
Do (mm)	24.663	49.302	88.690
Fa (kN)	57.143	101.271	177.496
V (Ton)	3.626	5.923	8.131

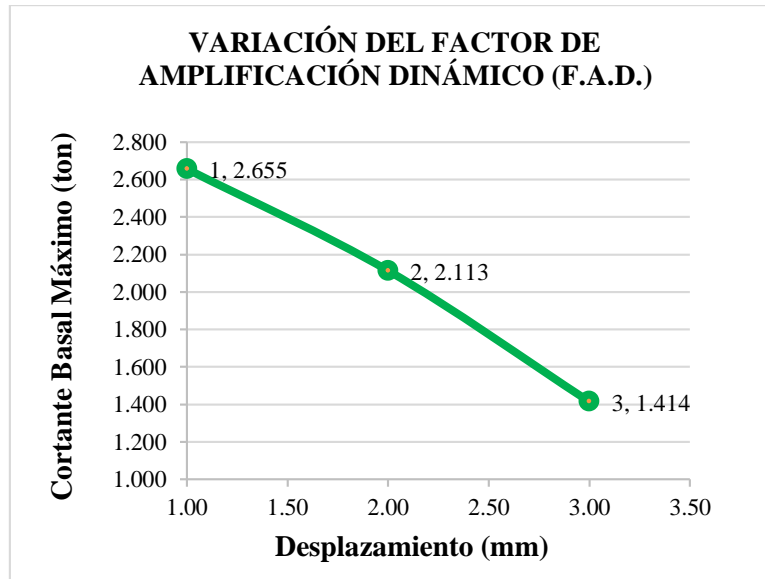
Tabla 7. 2 Aceleraciones y Desplazamientos absolutos máximos en el módulo.

INST.	FASE 1		FASE 2		FASE 3	
	MÁX.	t (s)	MÁX.	t (s)	MÁX.	t (s)
A0 (g)	0.229	11.43	0.496	10.01	0.903	9.33
A1 (g)	0.258	11.44	0.520	10.02	0.977	4.43
A2 (g)	0.299	10.14	0.566	10.11	0.998	4.41
A3 (g)	0.503	11.68	0.869	10.32	1.083	4.43
A4 (g)	0.295	7.34	0.520	5.11	0.988	4.43
A5 (g)	0.360	11.70	0.691	10.10	1.004	4.47
A6 (g)	0.607	11.69	1.049	10.33	1.277	2.90
D0 (mm)	28.386	15.58	51.707	13.84	89.956	13.49
D1 (mm)	27.047	15.58	49.602	13.84	87.261	13.48
D2 (mm)	30.979	15.59	55.483	23.00	96.198	6.28
D4 (mm)	30.195	15.59	53.746	22.99	94.454	6.29
D5 (mm)	33.882	15.60	66.193	23.00	111.932	22.68
D6 (mm)	34.497	15.06	67.688	23.00	116.646	22.68
D7 (mm)	0.137	11.46	0.740	9.51	1.295	22.43
D8 (mm)	0.188	10.99	0.552	9.58	0.801	4.96
D9 (mm)	0.131	11.21	0.256	9.62	0.355	4.97
D10 (mm)	1.859	11.67	5.227	4.51	9.902	4.17
D11 (mm)	0.994	15.54	2.155	9.74	2.265	3.88
D12 (mm)	0.079	11.16	0.238	9.93	0.343	9.48
D13 (mm)	3.253	19.09	9.329	9.53	18.055	4.21
D14 (mm)	0.569	17.24	0.950	9.56	1.472	4.40
D15 (mm)	0.141	15.24	0.255	9.79	0.355	9.99
Amax	0.607	11.69	1.049	10.33	1.277	2.90
FAD	2.655		2.113		1.414	

7.3.2. FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICO (F.A.D.)

El Factor de Amplificación Dinámico (FAD) asociado a la máxima respuesta-, desarrollado en cada una de las fases es:

Gráfico 7. 4 Variación del Factor de Amplificación por fase



7.3.3. PERIODO DE VIBRACIÓN Y COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO

A continuación se muestran los periodos naturales de vibración obtenidos durante las vibraciones libres:

Tabla 7. 3 Periodos naturales en vibraciones libres en el módulo.

Instrumento	PERIODO (seg)			
	INICIAL	POST FASE 1	POST FASE 2	POST FASE 3
A1	0.0954	0.0995	0.0922	0.0969
A2	0.0800	0.0881	0.0879	0.0923
A3	0.0824	0.0772	0.1068	0.0873
A4	0.0900	0.0942	0.0968	0.0873
A5	0.2090	0.3398	0.3744	0.3495
A6	0.0860	0.0847	0.0840	0.0916

En la **Tabla 7.3** se observa los periodos obtenidos en el ensayo. Debido a la poca masa del módulo, se obtuvo resultados pequeños y de orden similares; sin embargo, en el A5 se

observan valores fuera del rango que podría justificarse en algún desperfecto en el sensor. Para el sensor más representativo A6, ubicado en el techo del último nivel del módulo, se obtuvo un periodo promedio de **0.087 seg**. Este valor es pequeño y se justifica ya que el sistema de entramado ligero funciona como una estructura rígida. En consecuencia, los desplazamientos relativos al suelo también serán pequeños y ocasionarán menor daño.

Tabla 7. 4 Coeficientes de amortiguamiento en vibraciones libres en el módulo.

Instrumento	INICIAL	POST FASE 1	POST FASE 2	POST FASE 3
A4 (g)	6.09%	3.65%	4.06%	3.43%
A5 (g)	6.93%	6.22%	4.63%	5.38%
A6 (g)	18.00%	13.66%	12.95%	15.37%

7.3.4. CORTANTE BASAL MAXIMA VS. DESPLAZAMIENTO RELATIVO

Los datos obtenidos por el sensor de fuerza nos da la fuerza aplicada en cada instante para mover la plataforma de la mesa vibradora según la señal utilizada. Considerando únicamente las fuerzas de inercia en el sistema actuador-plataforma podemos obtener la fuerza cortante aplicada en la base del módulo, restando a este valor la masa de la plataforma y del anillo de cimentación multiplicados por la aceleración de la mesa. La ecuación es la siguiente:

$$V = Fa - (P_p + P_a)A_o$$

Donde:

V : Cortante basal del módulo (kN)

Fa : Fuerza aplicada a la plataforma (kN)

P_p : Peso de la plataforma = 176.58kN (18 020kgf)

P_a : Peso del anillo de cimentación (kN)

A_o : Aceleración de la plataforma de la mesa vibradora (g)

El desplazamiento relativo (DR) se obtuvo usando la siguiente ecuación:

$$DR_x = D_x - D_o$$

Donde:

DR_x : Desplazamiento relativo del instrumento x (mm) en el instante t .

D_x : Desplazamiento absoluto del instrumento x (mm) en el instante t .

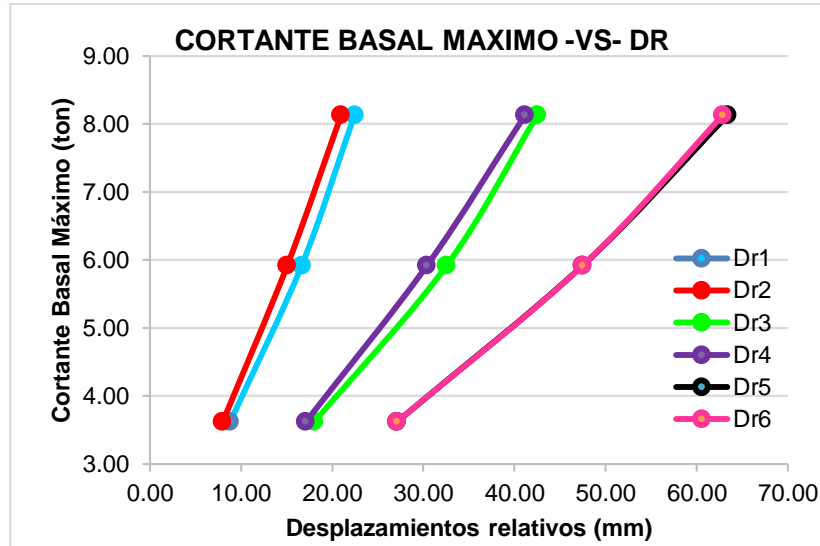
D_o : Desplazamiento de la plataforma de la mesa vibradora (mm) en el instante t .

A continuación se muestran los resultados determinados de los desplazamientos relativos máximos así como la determinación de la cortante Basal. Cabe resaltar que la cortante basal corresponde a todo el módulo.

Tabla 7. 5 Desplazamientos relativos máximos para cada sensor de desplazamiento por fase. Fuerza cortante en cada fase.

INST.	FASE 1 MÁX.	FASE 2 MÁX.	FASE 3 MÁX.
DR1 (mm)	8.811	16.644	22.431
DR2 (mm)	7.970	15.062	20.975
DR3 (mm)	18.037	32.588	42.551
DR4 (mm)	17.145	30.418	41.161
DR5 (mm)	27.109	47.498	63.403
DR6 (mm)	27.107	47.518	62.895
DR7 (mm)	24.616	49.393	88.289
DR8 (mm)	24.542	49.214	88.819
DR9 (mm)	24.612	49.273	88.770
DR10 (mm)	23.494	48.537	87.357
DR11 (mm)	23.729	48.471	87.479
DR12 (mm)	24.670	49.337	88.635
DR13 (mm)	22.271	47.368	86.860
DR14 (mm)	24.360	49.019	89.124
DR15 (mm)	24.600	49.302	88.677
V (ton)	3.626	5.923	8.131

Gráfico 7. 5 Cortante basal máxima –vs- Desplazamientos relativos respecto a suelo.



Cabe mencionar que únicamente se está analizando el comportamiento de los sensores que se encuentran en el eje B Muro4 (DR1-DR6). En el **Gráfico 7.5** se observa que en las fases hubo una tendencia similar y que la diferencia entre sensores ubicados al mismo nivel es insignificativa.

7.3.5. DERIVA MÁXIMA DE ENTREPISO

En la siguiente tabla se exponen los valores de las derivas máximas calculadas por cada fase. La deriva máxima expuesta por la Norma Técnica Peruana E-30 Art. 15.1 para la madera será de 0.010. Como observamos en la **Tabla 7.6** la deriva correspondiente a los desplazamientos relativos de cada piso cumplen y son menores a la establecida.

Tabla 7. 6 Deriva de entrepiso por fase.

DERIVA DE ENTREPISO			
	FASE 1	FASE 2	FASE 3
PISO 1	0.002925	0.00553	0.00757
PISO 2	0.00321	0.00566	0.007695
PISO 3	0.003645	0.00619	0.008875

CAPÍTULO 8 MODELAMIENTO DEL MODULO ENSAYADO MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA SAP2000

Para la elaboración del modelo analítico se utilizó el programa “Structural Analysis Program” (SAP2000 V17). Para ello, los valores de las propiedades de la madera han sido tomados de los ensayos estructurales realizados en la PUCP.

El modelo analítico se plasmó según las propiedades del real, que consta de tres módulos con dimensiones 3.00x4.60x2.40 m apilados entre si y unidos mediante planchas metálicas.

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS ANALITICOS

8.1. SUPUESTOS DE MODELACIÓN

Para realizar cualquier modelo computacional que intente predecir el comportamiento real de una estructura, se deben asumir ciertos supuestos que deben suceder:

- El tablero OSB se modeló como elemento ortotrópico variando el módulo de elasticidad de la dirección paralela y normal.
- No se consideró cambios de volumen de las piezas de madera producto de la condición de humedad.
- Por defecto en el programa SAP2000 no podremos considerar o modelar corrimientos relativos, o sea las uniones entre los elementos se consideran indeformables o rígidas frente a traslaciones, por lo que sabremos de antemano que las deformaciones del panel no coincidirán con los ensayos de laboratorio para un mismo rango de carga lateral.
- Las secciones transversales de los elementos en flexión no se deforman fuera de su plano o lo que se conoce como: “secciones planas permanecen planas”.
- Sólo se consideran deformaciones en el plano del panel que es donde se aplica la carga.
- Las placas de OSB se modelan como elementos membrana el que solo permite deformaciones en su plano, y el bastidor como elemento Frame, puesto que la longitud de estos elementos, no son comparables con su sección.
- Los materiales componentes del panel son considerados infinitamente elásticos en el programa.
- La unión de los pie derechos a la solera se consideran rotuladas debido a su incapacidad de transmitir momento, siendo esta última continua en toda su longitud (2440mm).

- Para el caso de los paneles de OSB en el piso, se modelan por un solo lado, pero considerando el doble de espesor; debido a que, de acuerdo a los supuestos, sólo se consideran deformaciones en el plano del panel.

8.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Se definieron cuatro materiales que componen la estructura: MADERA PINO RADIATA, OSB, OSB TECHO Y ACERO. Las características que se dieron a cada uno de los materiales se muestran en las *Ilustración 8.1* y *8.2* extraídas del modelo SAP2000.

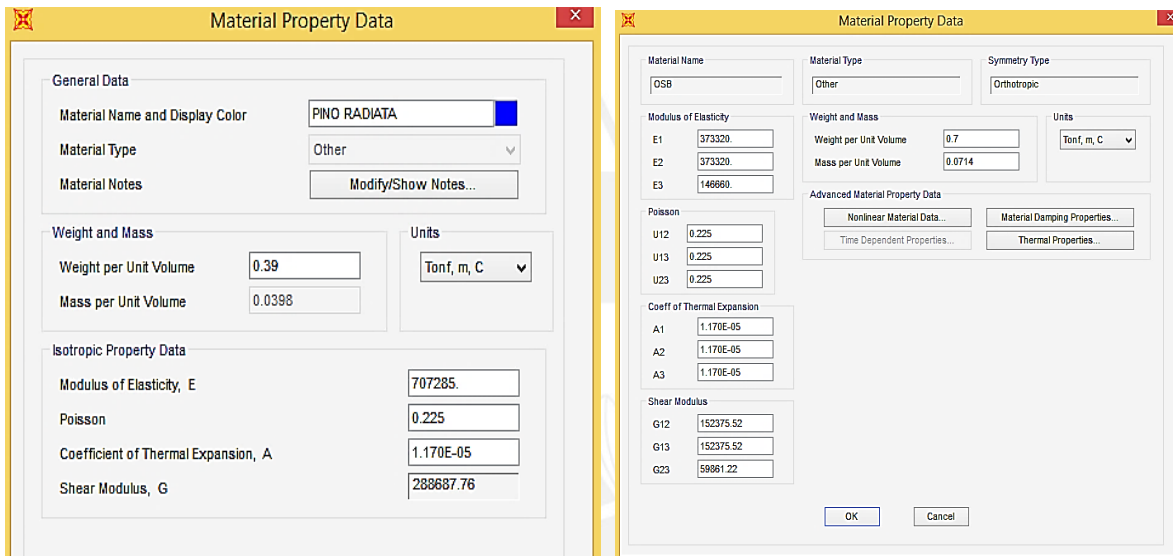


Ilustración 8. 1 Asignación de las propiedades de la madera OSB en Tonf y m.

Ilustración 8. 2 Asignación de las propiedades de la madera PINO RADIATA en Tonf y m

La información registrada para la madera en el modelo fue asignada de acuerdo a los datos extraídos de los ensayos estructurales realizadas en el Laboratorio de Estructuras PUCP y a los valores característicos del material. El módulo de Elasticidad fue tomado de los ensayos a flexión realizado en el Laboratorio. La relación de Poisson y la masa por unidad de volumen son datos características de la madera de Pino Radiata.

Las propiedades físicas y mecánicas registradas en el programa, tanto de la madera OSB (9.5 mm) como OSB TECHO (15 mm), se obtuvieron de las fichas técnicas proporcionadas de los materiales. La información dada en la Ilustración corresponde a los valores predeterminados y estandarizados en el Programa SAP 2000 para el acero.

Material Property Data (OSB TECHO)

Material Name: OSB TECHO
 Material Type: Other
 Symmetry Type: Orthotropic

Modulus of Elasticity:
 E1: 443380.
 E2: 443380.
 E3: 127640.

Poisson:
 U12: 0.225
 U13: 0.225
 U23: 0.225

Coeff of Thermal Expansion:
 A1: 1.170E-05
 A2: 1.170E-05
 A3: 1.170E-05

Shear Modulus:
 G12: 180971.
 G13: 180971.
 G23: 52098.

Weight and Mass:
 Weight per Unit Volume: 0.7
 Mass per Unit Volume: 0.0714
 Units: Tonf, m, C

Advanced Material Property Data:
 Nonlinear Material Data...
 Material Damping Properties...
 Time Dependent Properties...
 Thermal Properties...

Material Property Data (A992Fy50)

General Data:
 Material Name and Display Color: A992Fy50
 Material Type: Steel
 Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass:
 Weight per Unit Volume: 7.849
 Mass per Unit Volume: 0.8004
 Units: Tonf, m, C

Isotropic Property Data:
 Modulus of Elasticity, E: 20389019
 Poisson: 0.3
 Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05
 Shear Modulus, G: 7841930.

Other Properties for Steel Materials:
 Minimum Yield Stress, Fy: 35153.48
 Minimum Tensile Stress, Fu: 45699.53
 Effective Yield Stress, Fye: 38668.83
 Effective Tensile Stress, Fue: 50269.48

Ilustración 8. 3 Asignación de las propiedades de la madera OSB TECHO en Ton y m.

Ilustración 8. 4 Asignación de las propiedades del acero en Tonf y m

8.3. SECCIONES

8.3.1. SECCIONES TIPO FRAME

Para la elaboración de los bastidores verticales distribuidos en los muros y las vigas distribuidas a lo largo del piso y en el techo de cada módulo son asignadas como secciones tipo **Frame**. Estas secciones mostradas en la *Ilustración 8.5* poseen las mismas propiedades proporcionadas previamente.

Ilustración 8. 5 Secciones Tipo Frame

Frame Properties

Properties

Find this property:

- C-2"X4"
- C-2"X4"**
- C-4"X2"
- FSEC1
- FSEC2
- PL1
- VIGA 2"X4"
- VIGA 2"X6"
- VIGA 2"X8"
- VIGA 4"X8"
- V-S

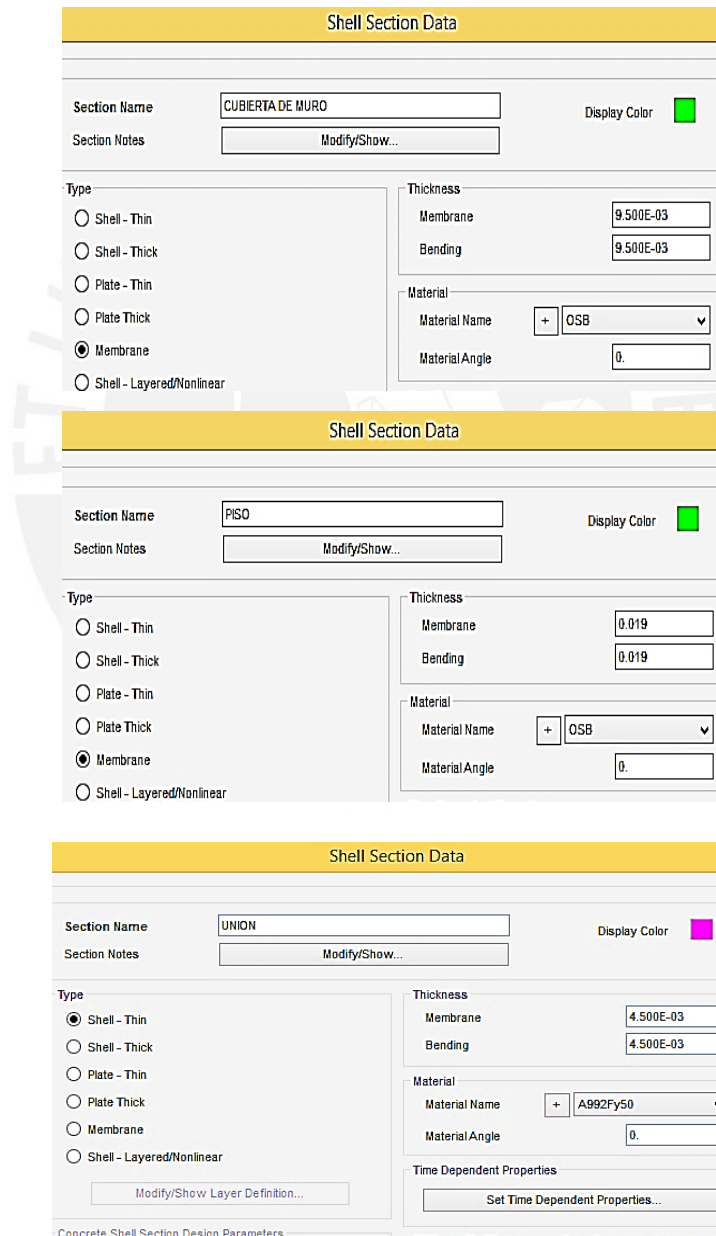
Click to:

- Import New Property...
- Add New Property...
- Add Copy of Property...
- Modify/Show Property...
- Delete Property

8.3.2. SECCIONES TIPO AREA

Para la elaboración de los paneles de madera tanto de los pisos, cubiertas de muro y techo del tercer piso fueron definidos tipo Shell. Constituidos por los paneles de OSB con diferente espesor.

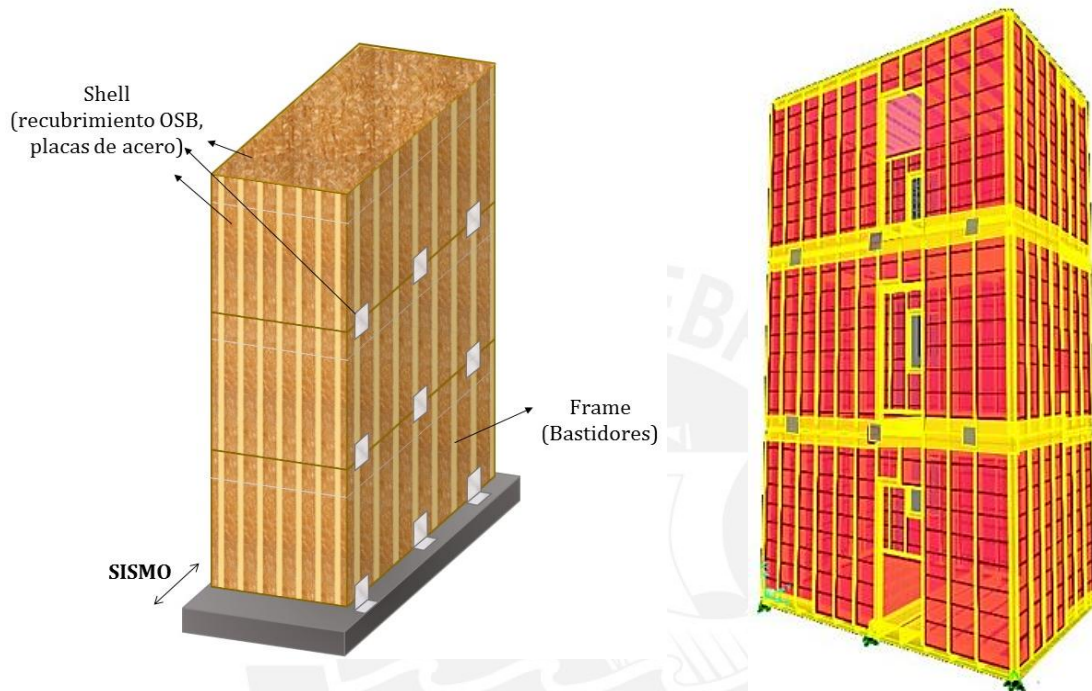
Ilustración 8. 6 Asignación de las secciones de área para la cubierta de muro, piso y techo del 3er piso (unidades en m).



Asimismo, se definió elementos tipo Shell para las uniones entre módulo y módulo.

Ilustración 8. 7: Esquemas y vistas

- *Izq: Esquema de la asignación de secciones (Tipo Shell y Frame) según su comportamiento.*
- *Der: Vista XZ del modelo final del módulo obtenido mediante el programa SAP 2000*



8.4. APOYOS

Los muros del primer piso utilizados en el modelo son soportados por apoyos de segundo grado en los que se restringen los desplazamiento vertical y horizontal pero no la rotación ya que en la realidad las planchas de acero que unen el primer módulo con la cimentación no tienen la suficiente rigidez para restringir fuerzas externas que generen momentos sobre la base.

Estos apoyos fueron ubicados en el mismo lugar donde se encontraban las planchas metálicas. Asimismo, cabe resaltar que los pies derechos se han modelado articulados ya que el tipo de unión permite el giro.

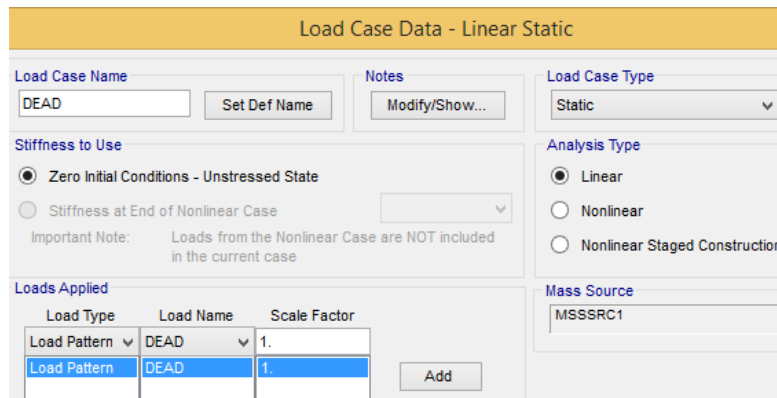
8.5. CARGAS

Para la evaluación de las cargas se siguió los parámetros indicados por la Norma Sismorresistente Peruana E0.30 para el cálculo y aplicación de las cargas que se describen a continuación.

8.5.1. CARGA MUERTA

En la asignación de la carga muerta se tuvo en cuenta el peso propio de la estructura mediante el procedimiento que el programa SAP2000 tiene para realizar esta operación.

Ilustración 8. 8 Asignación del peso propio de la estructura.



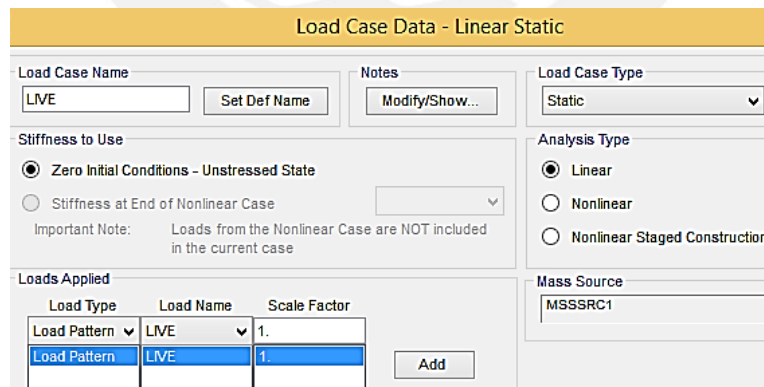
The screenshot shows the 'Load Case Data - Linear Static' dialog box. The 'Load Case Name' is 'DEAD'. The 'Load Case Type' is 'Static'. Under 'Stiffness to Use', 'Zero Initial Conditions - Unstressed State' is selected. Under 'Analysis Type', 'Linear' is selected. The 'Loads Applied' table is as follows:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	DEAD	1.
Load Pattern	DEAD	1.

8.5.2. CARGA VIVA

La carga viva que se tuvo en cuenta dentro del modelo del módulo fue tomada de la Norma de Cargas E020 correspondiente a la categoría vivienda.

Ilustración 8. 9 Asignación de la carga viva



The screenshot shows the 'Load Case Data - Linear Static' dialog box. The 'Load Case Name' is 'LIVE'. The 'Load Case Type' is 'Static'. Under 'Stiffness to Use', 'Zero Initial Conditions - Unstressed State' is selected. Under 'Analysis Type', 'Linear' is selected. The 'Loads Applied' table is as follows:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	LIVE	1.
Load Pattern	LIVE	1.

8.5.3. CARGA DE SISMO

La modelación sísmica del módulo se llevó a cabo mediante un análisis dinámico modal elástico espectral, el cual otorga un análisis más aproximado del comportamiento de este sistema estructural ante diferentes solicitaciones de carga.

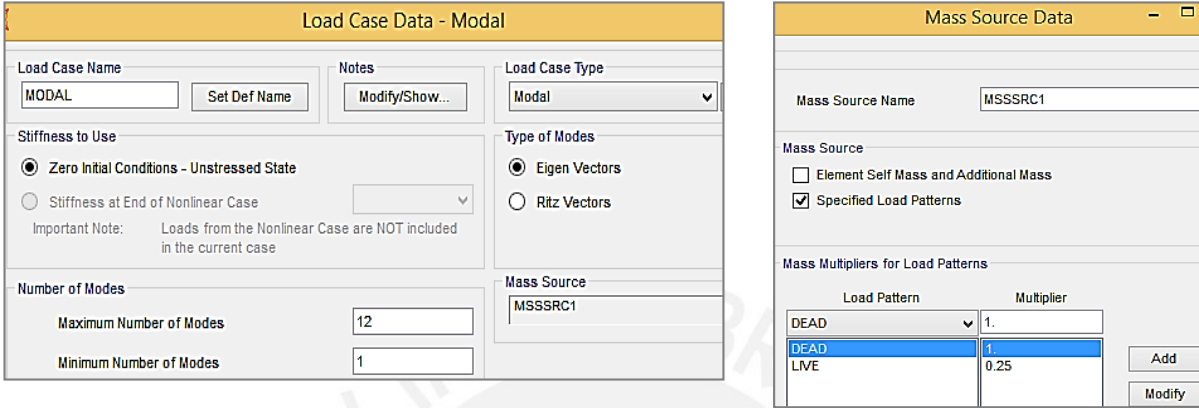


Ilustración 8. 10 Carga sísmica según Norma Peruana E.030

8.6. SEÑAL SÍSMICA

Durante el ensayo realizado en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, se utilizó una señal sísmica aplicada a la mesa vibradora. Esta señal se obtuvo del registro de aceleraciones de la componente longitudinal del sismo del 31 de mayo de 1970 medido en Lima (Ms 7,6). Esta componente longitudinal del sismo de mayo de 1970 fue introducida al programa SAP 2000 mediante un archivo de texto (.txt).

Ilustración 8. 11 Acelerograma del sismo de Mayo de 197

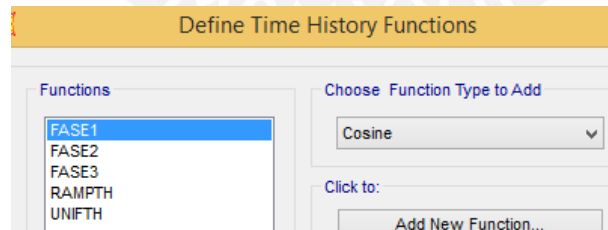


Ilustración 8.12 Definición de casos de cargas

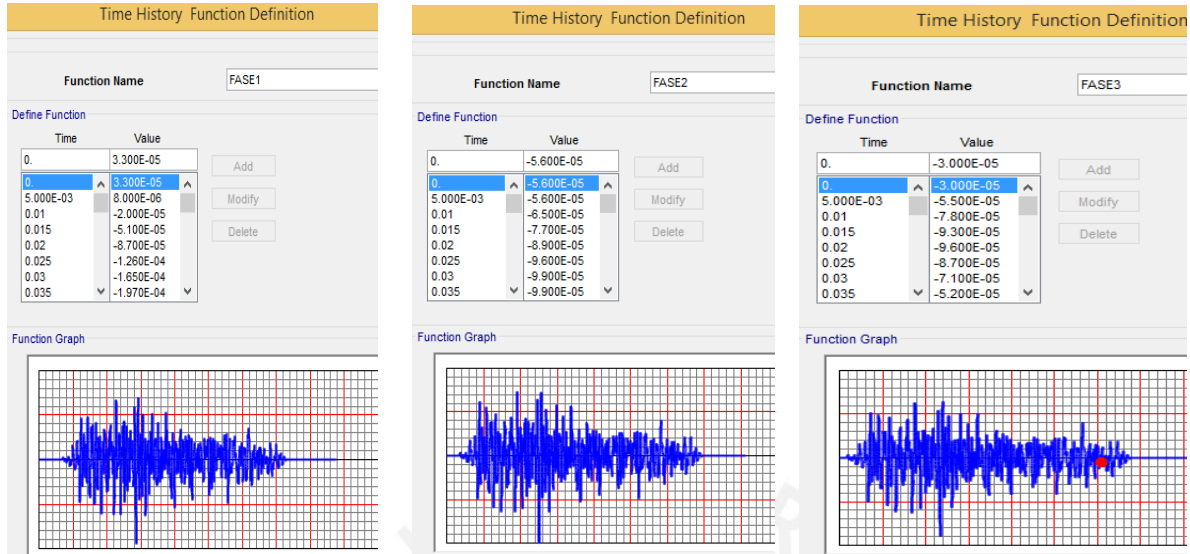
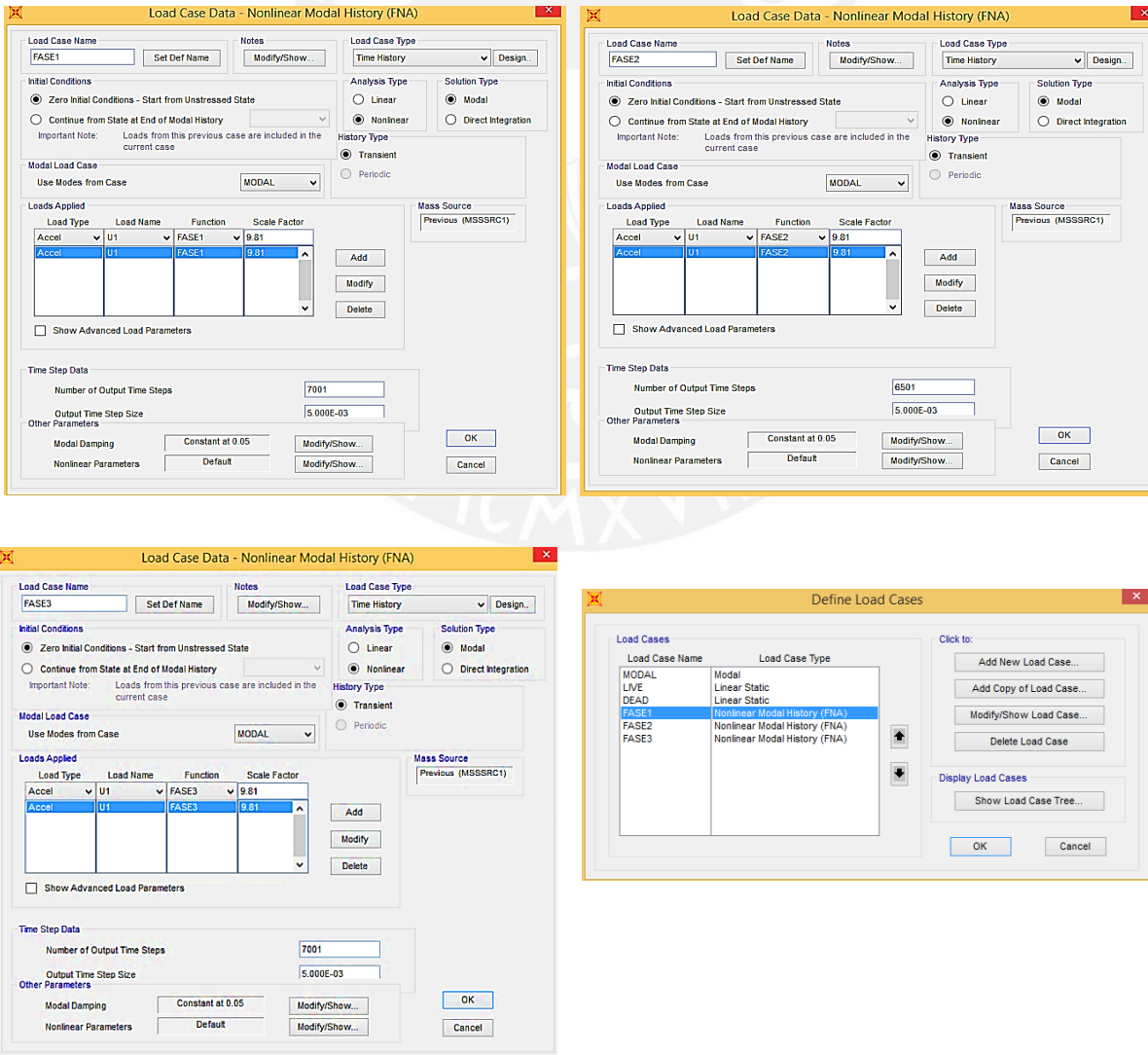


Ilustración 8.13 Definición de la Fases



8.7. RESULTADOS

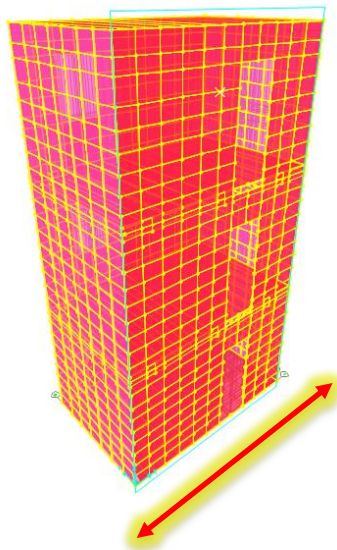
A continuación se mostrarán los resultados obtenidos tras evaluar el modelo analítico en el programa SAP 2000 y se realizará un análisis comparativo con los resultados obtenidos en los ensayos experimentales en cuanto al periodo estructural y las aceleraciones.

(a) PERIODOS Y FRECUENCIAS DEL MODELO

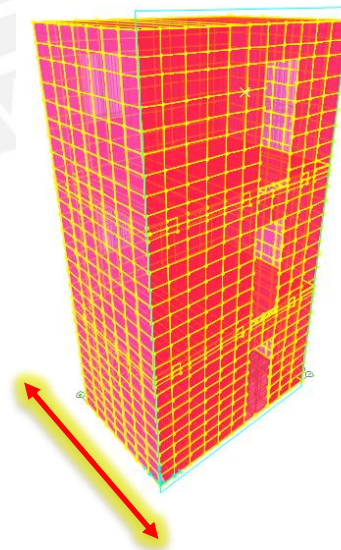
El módulo verdadero tuvo un periodo fundamental de 0,087 seg. En el modelo analítico se obtuvo un periodo fundamental 0,086 seg (Tabla 8.1, Fig. 5.4).

Tabla 8. 1 Periodos y frecuencias del modelo analítico

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
1	0.0859	11.636
2	0.0556	17.977
3	0.0539	18.547
4	0.0537	18.620
5	0.0536	18.656
6	0.0513	19.500
7	0.0478	20.916
8	0.0460	21.760
9	0.0450	22.223
10	0.0448	22.316
11	0.0448	22.319
12	0.0444	22.502



(a) Primer modo de vibración



(b) Segundo modo de vibración

(b) ACELERACIONES

Los valores determinados experimentalmente del módulo de elasticidad (E) y de corte (G), que han sido introducidos en el modelo analítico, han dado buenos resultados para los muros paralelos al movimiento ya que se obtuvo el mismo periodo estructural. La respuesta de aceleraciones de los muros es relativamente parecida a las respuestas experimentales.

Así podemos observar en la **Tabla 8.2** un comparativo entre los resultados experimentales y los analíticos para los acelerómetros más representativos (aquellos ubicados en los techos A4, A5, A6), que existe variaciones alrededor del 2% al 6%, con excepción del acelerómetro A6 (Fase 1 y 2) donde hay variaciones mucho mayores, debido a la limitación del modelamiento en el programa.

Tabla 8.2 Aceleraciones máximas en los acelerómetros A4, A5 y A6

	ACELERACIONES MÁXIMAS TECHOS C/PISO A4, A5, A6					
	A4 (g)		A5 (g)		A6 (g)	
	Modelo	Experim.	Modelo	Experim.	Modelo	Experim.
FASE 1	0.28	0.29	0.33	0.36	0.34	0.607
FASE 2	0.57	0.52	0.66	0.69	0.654	1.05
FASE 3	1.01	0.99	1.16	1.00	1.25	1.28

CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

En este capítulo se exponen las razones por las cuales se fundamenta el uso de la madera como material de construcción basado en su buen comportamiento estructural. Además se comprobó las ventajas de usar madera en la construcción como su rapidez y facilidad de construcción, ya que el prototipo de vivienda de tres pisos estudiado era modular y constó solo de una semana para su fabricación y ensamblaje correspondiente. Asimismo, se verificó el excelente comportamiento sísmico, debido a su baja densidad y su estructuración del sistema constructivo.

En consecuencia, las estructuras de madera resultan una buena alternativa de respuesta a la problemática planteada sobre el déficit habitacional.

Según el prototipo de vivienda estudiado, concluimos que:

i. Comportamiento mecánico de la especie en estudio (pino radiata):

Conclusiones

- Los valores de las propiedades físicas y mecánicas determinadas confirman la posibilidad de usar al Pino radiata en la elaboración de entramados de madera con fines estructurales ya que los valores obtenidos en los ensayos se encuentran dentro de los rangos permisibles normalizados.
- Aunque la cantidad de especímenes a ensayar fue limitado, estos resultados nos ayudaron a comprender el comportamiento de la especie, además de estimular futuros estudios complementarios donde se amplíen la cantidad de variables analizadas.
- Como resultado del análisis mediante ensayos para determinar el agrupamiento de la madera Pino Radiata, se puede concluir de manera general, que no es posible clasificar la madera debido a que no se ha seguido el procedimiento riguroso expuesto en la norma NTP E.010, pero se muestran valores referenciales que se encuentran dentro de las tolerancias de la normativa nacional. Adicionalmente no se presentaron problemas por falta de resistencia, lo que ratifica físicamente lo expuesto en la bibliografía de esta especie.
- Además, al comparar los resultados de la especie con las diferentes especies nacionales expuestas en el **ANEXO 1**, se encontró que la especie **Catahua** posee propiedades similares a las del Pino Radiata, por lo que esta sería una buena opción de madera estructural.

Tabla 9. 1 Comparativo de propiedades mecánicas de una especie peruana y el pino radiata

ESPECIE	Densidad Básica (gr/cm ³)	Módulo de Elasticidad en flexión (ton/cm ²)
CATAHUA AMARILLA	0.41	68
PINO RADIATA	0.36	71

Recomendaciones

- Se recomienda seguir el procedimiento de la normativa nacional para poder identificar con exactitud el grupo al que pertenece el pino radiata.
- Otro punto que es bueno explorar, es el amplio abanico de especies tropicales que tiene el país; donde se debe definir primero sus propiedades físico y mecánicas para una futura clasificación de uso.

ii. *Comportamiento sísmico de entramado de madera ligero:*

Conclusiones

Respecto a la **Vulnerabilidad Sísmica** del sistema de entramado ensayado:

- Como resultado se puede inferir el nivel de vulnerabilidad del módulo, y qué nivel de seguridad ofrece para cada tipo de sismo (ocasional, raro o muy raro), debido al comportamiento observado y del procesamiento de resultados. Para las tres etapas analizadas se obtuvieron resultados exitosos dentro del rango elástico.

Respecto a las **Propiedades Dinámicas del Módulo**, evaluadas principalmente en la etapa de Vibración Libre, previas a cada fase, se puede decir lo siguiente:

- La determinación de los valores de las propiedades dinámicas de los especímenes, han sido evaluados a partir de la respuesta de los acelerómetros. Así, el grado de amortiguamiento, frecuencia natural y amortiguada, así como los periodos correspondientes, antes de cada fase de ensayo y para cada módulo, se resumen en las siguientes tablas (**ANEXO 2**).

Tabla 9. 2 Resumen de resultados de propiedades dinámicas en ensayo sísmico.

Caract.	Fase 0	Fase 1	Fase 2	Fase 3
ξ (%)	18.00%	13.66%	12.95%	15.37%
Td(seg)	0.087	0.085	0.085	0.093
wd(rad/seg)	72.49	73.92	73.91	67.96
wn(rad/seg)	73.79	74.43	74.83	68.62
Tn(seg)	0.085	0.084	0.084	0.091

- Nótese que el amortiguamiento decrece entre la primera y segunda fase, de 13.66% a 12.95%, luego se incrementa a 15.37%, en la tercera, esto refleja una variación errática.
- El Período Fundamental de vibración del espécimen, tanto natural como amortiguado, se mantuvo en 0.085 incrementándose ligeramente en la fase 3. Este valor era predecible debido a la rigidez del sistema de entramado de madera. Una medida del comportamiento elástico del espécimen se refleja observando si la frecuencia o el período fundamental de vibración de la estructura no cambian entre fases. Para este caso, en una de las tablas de resumen de resultados del ANEXO 2, puede observarse que el período se mantuvo prácticamente constante en las tres fases del ensayo.

En cuanto a la **Respuesta Sísmica de los Módulos**, tomando como parámetro indicador de ésta la Cortante Basal V ó (F) máximo en cada una de las fases, es:

- Para el Módulo: La Cortante Basal fue 3626 kg (Fase1), 5923 kg (Fase 2), 8131 kg (Fase 3).

Así, en la **Respuesta Sísmica de los Módulos** ensayados, tomando como indicador de ésta, a la Aceleración Horizontal Máxima desarrollada en cada fase, se puede decir que:

- Esto se puede incluso cuantificar, observando los valores máximos de la respuesta dinámica presentada en las tablas de resultados del ANEXO 2.
- Se apreciaron efectos torsionales muy pequeños, debido a cualquier asimetría geométrica o de constitución del espécimen.

Tabla 9. 3 Torsión para cada piso correspondiente a las fases del ensayo.

	TORSION Φ (°)		
	PISO 1	PISO 2	PISO 3
FASE 1	0.026	0.022	0.018
FASE 2	0.042	0.066	0.039
FASE 3	0.066	0.036	0.103

En general podemos concluir que:

- En base a los resultados de ensayos previos realizados se comprobó que para una señal de sismo similar al de mayo 70, la estructura mostró el buen funcionamiento de la madera en base a su flexibilidad ante la fuerza horizontal del movimiento sísmico.
- Las áreas más afectadas fueron las uniones de la base del módulo del primer piso con la cimentación como se observa en la *Ilustración 7.3*, donde la unión se ha descuadrado, perdiendo el ángulo de 90°.
- Es importante el proceso constructivo desde la obtención de los materiales, elaboración de los módulos a base de la estructura de pino radiata y paneles de OSB, teniendo en cuenta que existen factores como la humedad que podría afectar la resistencia del mismo. Además se debe prestar atención al maquinado, control de calidad y pruebas mecánicas de las uniones.
- Finalmente, terminado los ensayos, se pudo observar que para cargas sísmicas perpendiculares al plano, con aceleraciones de hasta 0.9g, el sistema no sufrió daños significativos que alteren su capacidad resistente; lo cual convierte a los entramados de madera en un sistema resistente a las acciones sísmicas ortogonales.

Recomendaciones

- Como en el ensayo dinámico no se logró el colapso del sistema, será necesario realizar otro tipo de ensayo, con el objetivo de encontrar la capacidad resistente. Para ello se deberá realizar un ensayo estático. En este tipo de ensayos se puede determinar si la acción de esfuerzos combinados de cortante y flexión fuera del plano cambia el comportamiento dinámico de un muro, reduciendo el cortante máximo que tiene la estructura en el rango elástico en comparación a estar sometido a un solo tipo de

esfuerzo. Los ensayos dinámicos con movimientos en dos direcciones resultan ser más representativos que los ensayos dinámicos unidireccionales ya que un movimiento unidireccional en un sismo es altamente improbable.

- Utilizar como mínimo cinco registros sísmicos de aceleraciones horizontales, correspondientes a sismos reales o artificiales, esto está indicado en la Norma Sismorresistente Peruana E.030.
- Otro punto importante a tratar en las recomendaciones es el de las uniones de la cimentación con el modulo del primer nivel, ya que se observó aquí la principal deficiencia. En principio, la unión utilizada era un ángulo metálico de 400x150x150 mm. Para mitigar la pérdida de ángulo se recomienda reforzar estas uniones utilizando cartelas metálicas diagonales. (*Ilustración 9.1*)



Ilustración 9.1 (Izquierda) Escuadra metálica utilizada en el ensayo.

(Derecha) Escuadra metálica reforzada con cartelas.

- Como recomendación se debe considerar sumamente importante la calidad y disposición de los elementos que constituyen el bastidor de un muro de corte de madera. Esto se traduce en el hecho de que, previo al proceso de armado del bastidor se debe realizar una adecuada clasificación de las piezas de madera. Así, en el proceso constructivo de los diafragmas se debe de procurar poner la máxima atención en el proceso de clavado, cuidando que los errores en la distancia entre anclajes sean lo más mínimos posible, casi inexistentes, pues como bien se sabe, el buen funcionamiento de un diafragma radica en el número, tipo y disposición de los clavos.
- En este sistema debe considerarse además el uso de “Cadenetas” como sistema transversal cortafuego (bastidor horizontal). Con el fin de bloquear el ascenso de los gases de combustión y el retardo de propagación de las llamas por el interior del tabique en algún eventual caso de incendio.

- Antes de la construcción de una estructura de madera, se deberá proporcionar a esta un adecuado tratamiento preservante cuya acción inmunizará a la madera del ataque de insectos y otros micro-organismos con el fin de evitar la vulnerabilidad de la estructura y los demás elementos. Para asegurar una óptima adaptación de los preservantes, es necesario ser cautelosos en el proceso de secado de la madera; además que éste proporciona mayor resistencia mecánica y menor peso propio.

iii. Comparación de resultados con el modelo analítico

Conclusiones y recomendaciones

Los valores de módulo de elasticidad y módulo de corte del material de madera, introducidos al modelo, han servido para calibrar los resultados analíticos. La respuesta de aceleraciones de los modelos analíticos fue similar a la obtenida en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP. Por lo tanto los programas basados en elementos finitos dan una buena aproximación a la respuesta real. Sin embargo tienen sus limitaciones como el de las uniones clavadas del OSB a la estructura de entramado.

Los resultados de este proyecto son un primer paso al estudio teórico del comportamiento dinámico de módulos de madera. Debido a las limitaciones del programa de cómputo se tuvo que realizar una simplificación de las uniones que eran básicamente los puntos débiles de la estructura. Un programa específico de diseño donde se modelen las uniones podría aproximarse mucho mejor a la respuesta real.

BIBLIOGRAFÍA

CENTRO DE INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

2009 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA MYPE DE LA MADERA Y EL MUEBLE EN EL PERÚ. PRIMERA EDICIÓN. LIMA.

KEENAN, J., & TEJADA, M.

1987 MADERAS TROPICALES COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN EN LOS PAÍSES DEL GRUPO ANDINO DE AMÉRICA DEL SUR. CARTAGENA: INTERNATIONAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTRE 1987. PAG. 12. CONSULTA 15 DE FEBRERO 2015

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA (INEI)

2009 PERÚ: MAPA DEL DÉFICIT HABITACIONAL A NIVEL DISTRITAL, 2007.

DIRECCIÓN GENERAL FORESTAL Y DE FAUNA SILVESTRE - DGFFS MINISTERIO DE AGRICULTURA

2012 PERÚ FORESTAL EN NUMEROS

AROSTEGUI, A; ACEVEDO M.

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y USOS PROBABLES DE LAS MADERAS DE 20 ESPECIES DE JENARO HERRERA-LORETO

MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN Y CITE MADERA

2009 ESTUDIO DE MERCADO NACIONAL DE MADERA PARA EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.

CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGIA

"UNIDAD 10: ENTRAMADOS VERTICALES". CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS DE MADERA.

INSTITUTO NACIONAL FORESTAL DE CHILE, EL SECTOR FORESTAL CHILENO

2012 LAS ESPECIES PLANTADAS SON EUCALIPTO Y PINO. FUENTE: DGFFS, PERÚ FORESTAL EN NÚMEROS, 2012;

TIMOTHY P. MCCORMICK

2005 "SHEAR WALLS".

NORMA CANADIENSE NLGA

1996 THE NATIONAL GRADING RULES FOR DIMENSION LUMBER

GONZÁLES BELTRÁN G.

2008 DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE MADERA. ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL. UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. PÁG. 7

INDECOPI

2004 RESISTENCIA DE LA MADERA A LA COMPRESIÓN PARALELA AL GRANO. NTP 251.014:2004. LIMA, PERÚ, 2 PP.

MÉTODO PARA DETERMINAR EL CIZALLAMIENTO PARALELO AL GRANO. NTP 251.013:2004. LIMA, PERÚ.

RESISTENCIA DE LA MADERA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA. NTP 251.017:2004. LIMA, PERÚ, 2 PP.

MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD. NTP 251.011:2014. LIMA, PERÚ, 2 PP.

MADERA ASERRADA: MADERA ASERRADA PARA USO ESTRUCTURAL. CLASIFICACIÓN VISUAL Y REQUISITOS. NTP 251.104:2011. LIMA, PERÚ, 2 PP.

MADERA ASERRADA PARA USO ESTRUCTURAL. MÉTODO DE ENSAYO DE FLEXIÓN PARA VIGAS A ESCALA NATURAL. 24 NTP 251.107:1911. LIMA, PERÚ, 2 PP.

PADT-REFORT7JUNAC

1984 MANUAL DE DISEÑO PARA MADERAS DEL GRUPO ANDINO. JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. LIMA, PERÚ.

BODIG, J. Y J.R. GOODMAN

1973 PREDICTION OF ELASTIC PARAMETERS FOR WOOD. WOOD SCIENCE. 5(4):249-264.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION INN, (1994).

1994 NCh 1989 Of.91 1994. MADERA – AGRUPAMIENTO DE ESPECIES MADERERAS SEGÚN SU RESISTENCIA. SANTIAGO, CHILE.

CANADIAN WOOD COUNCIL/CONSEIL

2003 WOOD FRAME CONSTRUCTION – MEETING THE CHALLENGES OF EARTHQUAKES. CANADÁ, NÚMERO 5, PP. 3-12.

CANALES, V.; GUTIÉRREZ, G.

ANÁLISIS NO LINEAL DE MUROS DE MADERA MEDIANTE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS. MEMORIA PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN OBRAS CIVILES. UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE, FAC. CIEN. 117 P

CARVALLO, VÍCTOR

1989 ANTECEDENTES BÁSICOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE DIAFRAGMAS VERTICALES SOLICITADOS POR CARGAS HORIZONTALES INDUCIDAS EN SU PLANO. INFOR. CHILE. (ORIGINAL NO CONSULTADO, CITADO POR: LEIVA, J.; VILCHES, P. 1996. COMPORTAMIENTO DE MUROS DE CORTE DE MADERA RIGIDIZADOS MEDIANTE TABLEROS DE CONTRACHAPADO BAJO LA ACCIÓN DE CARGA HORIZONTAL ESTÁTICA Y CÍCLICA COMBINADA CON CARGA VERTICAL EN SU PROPIO PLANO. TESIS DR. CIEN. UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE, FAC. CIEN. 239 P.)

PÉREZ, V; CUBILLOS, G.

1983 MANUAL DE CÁLCULO DE CONSTRUCCIONES EN MADERAS. INSTITUTO FORESTAL (INFOR). DIVISIÓN INDUSTRIAS. CISTERNA VICUÑA MACKENNA, SANTIAGO, CHILE. 478 P.

MEDINA, EDUARDO

2005 CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA. BIBLIOTECA TÉCNICA MUNDIAL, SECCIÓN ESTRUCTURAS, PP. 120.

EMPRESA MODULAR MADERERA

2014 PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN MÓDULO TÍPICO DE ENTRAMADO DE MADERA UTILIZADO POR LA EMPRESA MODULAR MADERERA, PERÚ.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCION Y SANEAMIENTO. SENCICO, 2006.

2006 NORMA E.030 “DISEÑO SISMORRESISTENTE”. REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI)

2013 RESUMEN EJECUTIVO. ESTADÍSTICAS AMBIENTALES [INFORME]. LIMA. CONSULTA: 2 DE SETIEMBRE DE 2013.

[HTTP://WWW.INEI.GOB.PE/WEB/BIBLIOINEI/BOLETINFLOTANTE.](http://www.inei.gob.pe/web/biblioinei/boletinflotante)

ASP?FILE=16841.PDF

CONFEDERACION PERUANA DE LA MADERA. CPM.

2008 COMPENDIO DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE 32 ESPECIES FORESTALES TOMO I.
COMPENDIO DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE 32 ESPECIES FORESTALES TOMO II.

RADAMACHER F., FREDDY

2006 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL DE MUROS EN BASE A PANELES DE MADERA, REFORZADOS CON PLACA OSB, FRENTE A CARGAS HORIZONTALES EN SU PLANO. TESIS DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL. VALDIVIA, CHILE: UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.

PATIÑO R., PABLO

2014 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE DIAFRAGMAS DE MADERA. TESIS DE LICENCIATURA EN INGENIERO CIVIL. CUENCA, ECUADOR: UNIVERSIDAD DE CUENCA.

WADEL, GERARDO.

2009 LA SOSTENIBILIDAD EN LA ARQUITECTURA INDUSTRIALIZADA. LA CONSTRUCCIÓN MODULAR LIGERA APLICADA A LA VIVIENDA. TESIS DE DOCTORADO. CATALUÑA, ESPAÑA: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA.

DELGADO S., ERICKA

2006 “COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UN MÓDULO DE ADOBE DE DOS PISOS CON REFUERZO HORIZONTAL Y CONFINAMIENTOS DE CONCRETO ARMADO. TESIS DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL. LIMA, PERÚ: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.

SENCICO

2006 ENSAYO DE SIMULACIÓN SÍSMICA EN DOS MÓDULOS DE ADOBE Y QUINCHA DE DOS PISOS. EJECUTADO POR LABORATORIO DE ESTRUCTURA ANTISÍSMICAS, SECCIÓN DE INGENIERÍA CIVIL. LIMA, PERÚ: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.

JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA.

1981 DESCRIPCIÓN GENERAL Y ANATÓMICA DE 105 MADERAS DEL GRUPO ANDINO. LIMA-PERÚ. 1981. 442p.