



Caracterización físico – mecánica y evaluación estructural de paneles elaborados a base de paja de arroz, a emplearse en edificaciones de hasta 3 pisos

Ramos Rodríguez, Henry Anderson

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría de Investigación en Ingeniería Civil

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Magíster en

Ingeniería Civil con Mención en Estructuras

Ing. Viera Arroba, Luisa Paulina MSc

21 de abril de 2023



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

Tesis_Final_Henry_Ramos_Rev-signed-signed

1%
Similitudes



1% Texto entre comillas
< 1% similitudes entre comillas
0% Idioma no reconocido

Nombre del documento: Tesis_Final_Henry_Ramos_Rev-signed-signed.pdf
ID del documento: 1bf95588c22b7f556b4e5aeab2aff07e7f7b50c9
Tamaño del documento original: 13,83 MB

Depositante: CAROLINA RIVERA
Fecha de depósito: 21/4/2023
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 21/4/2023

Número de palabras: 65.296
Número de caracteres: 424.618

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	biblioteca.espe.edu.ec 13 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (122 palabras)
2	repositorio.espe.edu.ec Análisis del impacto de la política de regionalización en la... 13 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (113 palabras)
3	Documento de otro usuario #cb0073 El documento proviene de otro grupo 12 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (100 palabras)
4	repositorio.espe.edu.ec Transformación mediada por Agrobacterium tumefaciens ... 11 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (78 palabras)
5	www.dspace.uce.edu.ec 7 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (79 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	hdl.handle.net Industrialización aplicada a la construcción con paja http://hdl.handle.net/2117/352015	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (40 palabras)
2	construccioneseu.wordpress.com Artículo publicado en la revista Ingeniería UC, c... https://construccioneseu.wordpress.com/2021/02/11/articulo-publicado-en-la-revista-ingenieria-uc/#...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (31 palabras)
3	construccioneseu.wordpress.com FACTIBILIDAD DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA... https://construccioneseu.wordpress.com/2020/11/26/factibilidad-de-construccion-de-viviendas-sismo...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (28 palabras)
4	dspace.ucacue.edu.ec Prehipertensión y factores asociados en el personal de 22 a ... https://dspace.ucacue.edu.ec/bitstream/ucacue/8596/3/98T2019-MT1174.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (31 palabras)
5	repositorio.espe.edu.ec Influencia del campo eléctrico en la viscosidad de solución... http://repositorio.espe.edu.ec/8080/bitstream/21000/18802/5/T-ESPE-039111.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (22 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <https://desarrollosindustriales.com/equipos-y-plantas/prensas>
- <https://ecococon.eu/>
- <https://www.elcomercio.com/actualidad/mucipio-quito>
- <https://www.agricultura.gob.ec/1-464-hectareas-de-cebada-variedad-metcalfe-y>
- https://www.ocieties.org/hispano_austral/clasmad.htm



firmado electrónicamente por:
LUISA PAULINA VIERA
ARROBA

Ing. Viera Arroba Luisa Paulina MSc

Directora



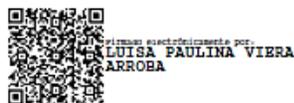
Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología
Centro de Posgrados

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Caracterización físico – mecánica y evaluación estructural de paneles elaborados a base de paja de arroz, a emplearse en edificaciones de hasta 3 pisos”** fue realizado por el señor **Ramos Rodríguez Henry Anderson**; el mismo cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de abril de 2023

Firma:



Ing. Viera Arroba, Luisa Paulina MSc

Directora

CC: 1600287641



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Responsabilidad de autoría

Yo, **Ramos Rodríguez Henry Anderson**, con cédula de ciudadanía N° 1724431356, declaro que el contenido, ideas y criterio del trabajo de titulación: **Caracterización físico – mecánica y evaluación estructural de paneles elaborados a base de paja de arroz, a emplearse en edificaciones de hasta 3 pisos**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 21 de abril de 2023

Firma:



Firma autografada por:
HENRY ANDERSON
RAMOS RODRIGUEZ

.....
Ramos Rodríguez, Henry Anderson

CC: 1724431356



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Autorización de Publicación

Yo, **Ramos Rodríguez Henry Anderson** con cédula de ciudadanía N° 1724431356, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Caracterización físico – mecánica y evaluación estructural de paneles elaborados a base de paja de arroz, a emplearse en edificaciones de hasta 3 pisos** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 21 de abril de 2023

Firma:



.....
Ramos Rodríguez, Henry Anderson

CC: 1724431356

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, quien, con su paciencia, amor, sabiduría fortalece mi alma día a día, aportando a mi vida mucha fortaleza para superar aquellos momentos difíciles que son parte de este mundo.

A mis padres, Guillermo y Liliana por su apoyo, sabiduría y paciencia impartida en el transcurso de mi vida, por su constante lucha para formarme a más de un excelente profesional también como un buen ser humano.

A mis hermanos, Erikson y Gissella quienes con su ejemplo de lucha me motivan a seguir superando los diferentes obstáculos y retos de la vida.

A mi sobrino Aaron, con sus abrazos, besos, locuras opacaste aquellos problemas convirtiéndolos en alegrías.

A Jhoanna, por apoyarme en cada instante de mi vida, por estar ahí no solo en los buenos momentos, sino también en los malos, por inculcar en mi vida el amor a Dios sobre todas las cosas.

Ramos Rodríguez Henry Anderson

Agradecimiento

A Dios, por sentir su presencia junto a mi familia, por mostrarme el amor y fomentar la unión para superar la pandemia que cambió nuestras vidas.

A la ingeniera Paulina Viera, por ayudarme en la realización de esta investigación, mediante su gran conocimiento y guiándome para tomar buenas decisiones.

Al ingeniero José Poveda, quien es una excelente persona y que contribuyó al enriquecimiento de la investigación por medio de su conocimiento y ayuda incondicional.

Al ingeniero Alexander Cadena, quien desinteresadamente nos prestó el laboratorio del INECYC, para la realización de los diferentes ensayos que fueron parte de la investigación.

A todos los docentes del programa de la maestría, que con su sabiduría ayudaron al desarrollo de esta investigación y al crecimiento profesional.

A mis compañeros del programa de maestría, por su compañerismo, amistad, bondad, ánimos y ocurrencias en cada clase.

Ramos Rodríguez Henry Anderson

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de tablas.....	17
Índice de figuras.....	22
Resumen	29
Abstract.....	30
Capítulo I	31
Generalidades.....	31
Introducción.....	31
Antecedentes	33
Planteamiento del problema	38
Macro.....	38
Meso.....	39
Micro.....	40
Justificación e importancia.....	41
Objetivos	43
Objetivo General.....	43
Objetivos específicos	43
Hipótesis de investigación	44
Capítulo II	45
Marco teórico	45

La Paja.....	45
La paja como material de construcción.....	46
Ventajas.....	48
Objeciones y temores	50
Fardos de Paja.....	51
Consideraciones sobre el uso de los fardos de paja en la construcción	53
Propiedades mecánicas de los fardos de paja.....	54
Resistencia al fuego.....	54
Aislante térmico	55
Conductividad Térmica (λ)	56
Transmitancia Térmica (U).....	56
Aislamiento acústico	58
Humedad	60
Densidad.....	61
Tipos de máquinas enfardadoras	62
Enfardadora mecánica para fardos rectangulares.....	63
Enfardadora manual de prensa vertical para fardos rectangulares	64
Enfardadora manual presa horizontal de madera.....	65
Enfardadoras mecánicas para fardos cilíndricos	66
Sistemas constructivos con fardos de paja.....	67
Sistema Nebraska o portante.....	68
Sistema CUT o CST	70
Sistema de postes y vigas	71
Sistema GREB.....	72

	10
Sistema WRAPPING	73
Sistema con prefabricados modulares	75
La madera	79
La madera en la construcción.....	81
Propiedades de la madera como material de construcción	82
Revocos en muros con paja	84
Revocos a base de arcilla	85
Revocos a base de cal.....	86
Revocos mixtos.....	87
Capítulo III	89
Fabricación de fardos de paja de arroz y determinación de sus propiedades físico - mecánicas	89
Producción de arroz en la región costera del Ecuador.....	89
Obtención de la paja de arroz, cantón Buena Fe, provincia de Los Ríos	91
Datos Generales	91
Datos Geográficos y límites	92
Recolección de la paja de arroz	93
Longitud de la paja recolectada a partir de la cosecha del arroz	95
Construcción de una máquina manual enfardadora.....	96
Dimensiones seleccionadas para los fardos de paja de arroz	96
Materiales utilizados para la construcción de la máquina enfardadora	97
Montaje de las estructuras que conforma la máquina enfardadora	99
Proceso de enfardado de la paja del arroz	115

Determinación de las propiedades físico – mecánicas de los fardos de paja.....	120
Dimensiones	121
Peso	121
Contenido de humedad.....	122
Densidad aparente.....	123
Densidad aparente corregida	123
Análisis de los resultados.	126
Capítulo IV	128
Diseño y caracterización de morteros a base de cal para utilizarse como revoco en paneles de paja de arroz y marcos de madera.....	128
Materiales seleccionados para el diseño del mortero de recubriendo.....	129
Cemento	131
Cal Hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$	132
Agregado Fino (Arena).....	132
Agregado Fino (Perlita)	133
Aditivo.....	135
Caracterización de propiedades físico – mecánicas de materiales utilizados para el diseño del mortero de recubrimiento.....	135
Árido Fino (Arena).....	137
Agregado Fino (Perlita)	157
Cemento	164
Cal	167
Resumen de las propiedades físico – mecánicas obtenidas en los materiales utilizados para el diseño del mortero de recubrimiento.....	169

Diseño de mezclas de morteros a base de cal para utilizarse como revoco en paneles de paja de arroz y marcos de madera.	170
Metodología	170
Diseño de mezcla patrón MP1.	172
Dosificación al peso de la mezcla patrón MP1 para 1 m ³ de mortero.	179
Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP1 para 1 m ³ de mortero.	179
Dosificación al peso de la mezcla patrón MP1 para 7 cubos de mortero.....	180
Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP1 para 7 cubos de mortero.....	184
Diseño de mezcla patrón MP2	185
Dosificación al peso de la mezcla patrón MP2 para 1 m ³ de mortero.	191
Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP2 para 1 m ³ de mortero.	191
Dosificación al peso de la mezcla patrón MP2 para 7 cubos de mortero.....	192
Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP2 para 7 cubos de mortero.....	196
Realización de cubos de mortero a base de cal y cemento.	197
Especímenes a realizar en la investigación.....	197
Elaboración de las mezclas.....	198
Determinación del flujo en las mezclas.	199
Elaboración de cubos de mortero.	200
Curado de cubos de mortero.....	201
Determinación de las propiedades físico – mecánicas en morteros a base de cal para utilizarse como revoco en paneles de paja de arroz y marcos de madera.	202
Dimensiones.	202
Volumen.....	202
Masa.....	203
Densidad del mortero.....	203

Resistencia a compresión del mortero.	204
Análisis de los resultados.	205
Resistencia a compresión en moteros elaborados con las mezclas derivadas de MP1....	206
Resistencia a compresión en moteros elaborados con las mezclas derivadas de MP2....	207
Selección de la mezcla óptima de mortero a utilizarse como recubrimiento en las construcciones con paja.....	209
Ajuste polinomial en las mezclas derivadas de MP1 y MP2 que contienen aditivo.....	210
Densidad del mortero.....	211
Resumen metodológico utilizado para el diseño y selección de la mezcla óptima.	213
Capítulo V	214
Construcción y caracterización físico – mecánica de paneles elaborados a base de paja de arroz.	214
Paneles elaborados a base de paja de arroz.....	214
Dimensiones.....	214
Propiedades de los materiales utilizados.	215
Configuración del panel.	218
Proceso constructivo del panel.	222
Determinación de las propiedades físico – mecánicas en paneles elaborados a base de paja de arroz.....	231
Paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).....	233
Paneles (Marcos de madera + paja)	244
Paneles (Marcos de madera)	251
Análisis de los resultados.	258
Masas de paneles.....	258

Resistencia a compresión de paneles.....	259
Módulo de elasticidad de paneles.	260
Resistencia a compresión diagonal de paneles.	261
Módulo de rigidez a corte de paneles.....	262
Capítulo VI.....	264
Evaluación estructural de paneles elaborados a base de paja de arroz en edificaciones de hasta 3 pisos de altura.	264
Ubicación de la edificación.	264
Propiedades geométricas de la edificación.....	264
Propiedades físico – mecánicas de los materiales.....	267
Paneles prefabricados con paja de arroz.	267
Elementos de madera (madera tipo B).....	268
Cubierta (fibrocemento).	269
Propiedades geométricas de los elementos estructurales de la edificación.....	269
Paneles prefabricados con paja de arroz.	269
Entablados de piso.	270
Cubierta.	271
Cerchas, vigas principales y secundarias.....	271
Cargas consideradas.....	272
Cargas vivas.	272
Carga muerta.	273
Carga sísmica.....	273
Evaluación Estructural.....	277
Participación modal.....	278

Periodo de vibración.	279
Desplazamientos máximos.	280
Derivas de piso.	281
Análisis de los resultados.	282
Participación modal.....	282
Periodo de vibración.	283
Desplazamientos máximos.	283
Derivas de piso.	283
Capítulo VII	284
Evaluación económica comparativa de edificaciones de 3 pisos de altura construidas con paneles prefabricados de paja de arroz vs sistema tradicional aporticado de hormigón armado con mampostería.	284
Evaluación económica edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con paneles prefabricados de paja de arroz.	284
Evaluación económica edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con el sistema tradicional aporticado de hormigón armado.	286
Análisis de precio unitario (APU) “Panel prefabricado con paja de arroz de $E = 0.35$ m, incluye montaje y mortero a base de cal $E = 2.5$ cm”	289
Análisis de resultados.....	290
Capítulo VIII	293
Conclusiones y Recomendaciones	293
Conclusiones.....	293
Recomendaciones.....	297

Referencias.....	299
Apéndices	310

Índice de tablas

Tabla 1 Energía requerida durante su ciclo de vida para diferentes materiales de construcción.	48
Tabla 2 Valores de transmitancias térmicas para diferentes sistemas constructivos	58
Tabla 3 Superficie cosechada, producción y rendimiento del arroz	90
Tabla 4 Materiales para la construcción de máquina enfardadora manual en madera.	99
Tabla 5 Elementos y materiales necesarios para la construcción de enfardadora manual en madera.....	113
Tabla 6 Cantidades, localización de piezas en elementos para la construcción de la máquina enfardadora.	114
Tabla 7 Propiedades físico – mecánicas de los fardos de paja de arroz	125
Tabla 8 Resistencia a la compresión mínima de revocos a utilizarse en paredes estructurales construidas con paja.	128
Tabla 9 Clasificación de los morteros de cemento y cal para mampostería de acuerdo a su resistencia.....	130
Tabla 10 Clasificación de los cementos hidráulicos	131
Tabla 11 Peso específico para muestra 1 y 2 de árido fino (arena).....	140
Tabla 12 Capacidad de absorción para muestra 1 y 2 de árido fino (arena).....	142
Tabla 13 Contenido de humedad para muestra 1 y 2 de árido fino (arena)	144
Tabla 14 Densidad aparente suelta y compacta para la muestra 1 de árido fino (arena)	148
Tabla 15 Densidad aparente suelta y compacta para la muestra 2 de árido fino (arena)	148
Tabla 16 Ensayo de granulometría muestra 1 de árido fino (arena)	152
Tabla 17 Ensayo de granulometría muestra 2 de árido fino (arena)	153
Tabla 18 Escala de colores para interpretación de resultados del ensayo de colorimetría del árido fino (arena)	154

Tabla 19	Resultado de la solución del ensayo de colorimetría para el árido fino (arena)	156
Tabla 20	Peso específico para muestra 1 y 2 de árido fino (perlita).	158
Tabla 21	Capacidad de absorción para muestra 1 y 2 de árido fino (perlita).	158
Tabla 22	Contenido de humedad para muestra 1 y 2 de árido fino (perlita).	159
Tabla 23	Densidad aparente suelta y compacta para la muestra 1 de árido fino (perlita)	160
Tabla 24	Densidad aparente suelta y compacta para la muestra 2 de árido fino (perlita)	160
Tabla 25	Ensayo de granulometría muestra 1 de árido fino (perlita).	161
Tabla 26	Ensayo de granulometría muestra 2 de árido fino (perlita).	162
Tabla 27	Resultado de la solución del ensayo de colorimetría para el árido fino (perlita)	164
Tabla 28	Ensayo para determinar la densidad de la muestra 1 y 2 de cemento.	167
Tabla 29	Ensayo para determinar la densidad de la muestra 1 y 2 de cal.	168
Tabla 30	Composición química de la cal de La Paz.	168
Tabla 31	Propiedades físico – mecánicas obtenidas para la arena y la perlita.	169
Tabla 32	Resumen de las propiedades físico – mecánicas obtenidas para el cemento y la cal.	170
Tabla 33	Mezclas realizadas en la investigación con su codificación y significado.	172
Tabla 34	Propiedades físico – mecánicas para el árido fino (arena).	173
Tabla 35	Expresiones para determinar la cantidad de pasta en las mezclas en función del asentamiento y % O.V	175
Tabla 36	Resistencia especificada (f'_{cr}) en función de la resistencia objetivo requerida (f'_c). ..	176
Tabla 37	Relación agua – cemento según la resistencia requerida del mortero a los 28 días.	177
Tabla 38	Dosificación en kg y al peso de la mezcla patrón MP1 para 1 m ³ de mortero.	179
Tabla 39	Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP1 para 1 m ³ de mortero.	180
Tabla 40	Volumen de mortero para fabricar 7 cubos con las mezclas derivadas de MP1.	181

Tabla 41 Dosificación al peso para 7 cubos de morteros a elaborarse con la mezcla patrón MP1.	182
Tabla 42 Dosificación corregida por humedad para 7 cubos de morteros a elaborarse con la mezcla patrón MP1.	184
Tabla 43 Dosificación en gramos para 7 cubos de mortero a elaborarse con las mezclas derivadas de MP1.	185
Tabla 44 Propiedades físico – mecánicas para el árido fino (perlita).	186
Tabla 45 Dosificación en kg y al peso de la mezcla patrón MP2 para 1 m ³ de mortero.	191
Tabla 46 Dosificaciones en kg para 1 m ³ de morteros, de las mezclas obtenidas a partir de MP2.	192
Tabla 47 Volumen de mortero para fabricar 7 cubos con las mezclas derivadas de MP2.	193
Tabla 48 Dosificación al peso para 7 cubos de morteros a elaborarse con la mezcla patrón MP2.	194
Tabla 49 Dosificación corregida por humedad para 7 cubos de morteros a elaborarse con la mezcla patrón MP2.	196
Tabla 50 Dosificación en gramos para 7 cubos de mortero a elaborarse con las mezclas derivadas de MP2.	197
Tabla 51 Número de especímenes a fabricarse para cada una de las mezclas.	198
Tabla 52 Propiedades de los fardos de paja de arroz.	215
Tabla 53 Propiedades del mortero de cal y cemento obtenido con la mezcla 5050AM2.	216
Tabla 54 Propiedades arquitectónica del laurel del oriente.	217
Tabla 55 Propiedades físico - mecánicas del laurel del oriente.	217
Tabla 56 Cantidad de especímenes para el ensayo a compresión de paneles.	232
Tabla 57 Cantidad de especímenes para el ensayo a tensión diagonal de paneles.	232
Tabla 58 Dimensiones de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento)	233
Tabla 59 Masa de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).	234

Tabla 60 Factores de corrección para la resistencia a la compresión de los paneles.....	236
Tabla 61 Esfuerzos a compresión máximos en paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).....	236
Tabla 62 Módulo de elasticidad en paneles (Marco de madera + paja + recubrimiento).	238
Tabla 63 Esfuerzos cortantes máximos en paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).	241
Tabla 64 Módulo de rigidez a corte en paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento). .	243
Tabla 65 Dimensiones de paneles (Marcos de madera + paja).....	245
Tabla 66 Masa de paneles (Marcos de madera + paja).	245
Tabla 67 Esfuerzos a compresión máximos en paneles (Marcos de madera + paja).	246
Tabla 68 Módulo de elasticidad en paneles (Marcos de madera + paja).....	248
Tabla 69 Esfuerzos cortantes máximos en paneles (Marcos de madera + paja).	249
Tabla 70 Módulo de rigidez a corte en paneles (Marcos de madera + paja).....	251
Tabla 71 Dimensiones de paneles (Marcos de madera).	251
Tabla 72 Masa de paneles (Marcos de madera).	252
Tabla 73 Esfuerzos a compresión máximos en paneles (Marcos de madera).....	253
Tabla 74 Módulo de elasticidad en paneles (Marcos de madera).....	255
Tabla 75 Esfuerzos cortantes máximos en paneles (Marcos de madera).....	256
Tabla 76 Módulo de rigidez a corte en paneles (Marcos de madera).	258
Tabla 77 Propiedades físico – mecánicas de paneles prefabricados con paja de arroz.	268
Tabla 78 Propiedades físico – mecánicas de elementos de madera.	268
Tabla 79 Propiedades físico – mecánicas de cubierta nivel superior (fibrocemento).	269
Tabla 80 Detalle de carga permanente piso 1 y 2.	273
Tabla 81 Valores de factores necesarios para la construcción del espectro de respuesta elástico.	274
Tabla 82 Valores de límites para el espectro de respuesta elástico.	276

Tabla 83 Participación modal de masas, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.	278
Tabla 84 Periodo fundamental de vibración, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.....	279
Tabla 85 Desplazamientos sentido "X" y "Y", estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.....	280
Tabla 86 Derivas inelásticas sentido "X" y "Y", estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.....	281
Tabla 87 Evaluación económica edificación de 3 pisos "CASA NATURAL AYLLU WASI" con paneles prefabricados de paja de arroz.	284
Tabla 88 Evaluación económica edificación de 3 pisos "CASA NATURAL AYLLU WASI" con sistema tradicional aporticado de hormigón armado y mampostería.....	286
Tabla 89 APU, "Panel prefabricado con paja de arroz de E = 0.35 m, incluye montaje y mortero a base de cal E = 2.5 cm.....	289

Índice de figuras

Figura 1 Emisiones de CO ₂ producidas por cada Kg de material utilizado en la construcción..	47
Figura 2 Fardos de paja para construcción.	52
Figura 3 Colocación de los fardos de paja para la construcción de edificaciones.....	53
Figura 4 Posición de los fardos de paja en la construcción.	54
Figura 5 Valores de transmitancia térmicas para materiales de construcción.....	57
Figura 6 Valores de insonorización de varios materiales.....	59
Figura 7 Valores de transpirabilidad de varios materiales.	61
Figura 8 Formas de enfardado.....	62
Figura 9 Enfardadora mecánica fija para fardos rectangulares	63
Figura 10 Enfardadora mecánica móvil para fardos rectangulares.....	64
Figura 11 Enfardadora manual de prensa vertical.....	65
Figura 12 Enfardadora manual de prensa horizontal de madera.....	66
Figura 13 Enfardadora mecánica para fardos cilíndricos.....	67
Figura 14 Sistema Nebraska, colocación de zunchos perimetrales y estacas.....	69
Figura 15 Esquema representativo sobre el sistema Nebraska.....	70
Figura 16 Construcción de vivienda utilizando el sistema CUT o CST.	71
Figura 17 Construcción de vivienda utilizando el sistema postes y vigas.	72
Figura 18 Proceso constructivo de viviendas aplicado la técnica GREB.	73
Figura 19 Aplicación del sistema Wrapping.....	74
Figura 20 Máquina enfardadora manual para fardos de paja.	75
Figura 21 Construcción marcos de madera.....	76
Figura 22 Colocación de fardos en los módulos de madera.	76
Figura 23 Detalle de uniones entre los paneles prefabricados y la cimentación.	78
Figura 24 Detalle de uniones entre paneles prefabricados para conformar la pared.	78
Figura 25 Traslado y movimiento de paneles prefabricados para conformar las paredes.	79

Figura 26 Valores generados a partir de la venta local de silvicultura y extracción de la madera en Ecuador 2006-2019.....	80
Figura 27 Valores de exportaciones totales, no tradicionales y de madera. Ecuador 2006-2019.	81
Figura 28 Proceso de combustión de la madera.	83
Figura 29 Revoco a base de arcilla aplicado en capas.....	86
Figura 30 Revoco mixto con cemento y cal.....	88
Figura 31 Mapa de cultivos de ciclo corto, arroz, maíz duro y papa.	89
Figura 32 Producción de arroz provincias del Guayas y Los Ríos.....	91
Figura 33 Mapa base provincia de los Ríos.	92
Figura 34 La paja después de la cosecha del arroz.	94
Figura 35 Proceso de recolección de la paja.....	95
Figura 36 Longitud de la paja de arroz.....	96
Figura 37 Dimensiones comunes para fardos de paja.....	97
Figura 38 Cortado de tableros contrachapados.....	98
Figura 39 Cajón o cuerpo principal de la máquina enfardadora.	100
Figura 40 Tapas laterales del cajón principal de la máquina enfardadora.	101
Figura 41 Tapa inferior del cajón principal de la máquina enfardadora.	101
Figura 42 Refuerzos intermedios para cajón principal de la máquina enfardadora.....	102
Figura 43 Apoyos laterales cajón principal de la máquina enfardadora.....	103
Figura 44 Vista frontal cajón principal de la máquina enfardadora.	103
Figura 45 Vista inferior cajón principal de la máquina enfardadora.	104
Figura 46 Puerta principal de la máquina enfardadora.....	104
Figura 47 Bisagras para la puerta principal de la máquina enfardadora.....	105
Figura 48 Vista frontal cajón principal de la máquina enfardadora incluye puerta y seguros. ...	105
Figura 49 Palanca principal del sistema a compresión.....	106

Figura 50 Palancas secundarias y elemento o panel de compresión.	107
Figura 51 Placa de compresión de la máquina enfardadora.....	108
Figura 52 Empotramiento de la palanca principal a la placa de compresión.	108
Figura 53 Ubicación de la placa secundaria en el panel de compresión.	109
Figura 54 Placa principal base de la máquina enfardadora.	109
Figura 55 Montaje de los elementos que conforman el sistema de compresión.	110
Figura 56 Sistema de compresión.....	111
Figura 57 Montaje del sistema de compresión con el cuerpo de la máquina enfardadora.	111
Figura 58 Máquina enfardadora manual en madera.....	112
Figura 59 Proceso constructivo real de la máquina enfardadora manual en madera.....	115
Figura 60 Procedimiento para medir los fardos.	121
Figura 61 Procedimiento para pesaje de los fardos.....	122
Figura 62 Equipo F-2000.	122
Figura 63 Uso del equipo F-2000 para determinar el contenido de humedad en los fardos. ...	123
Figura 64 Valores de contenidos de humedades de los fardos de paja de arroz.....	126
Figura 65 Valores de densidades aparentes corregidas de los fardos de paja de arroz.	127
Figura 66 Ubicación de la cantera donde se obtuvo el agregado fino tradicional (Arena).....	133
Figura 67 Agregado fino tradicional procedente de Pintag.	133
Figura 68 Ubicación de la cantera donde se obtuvo el agregado fino (Perlita).	134
Figura 69 Aditivo reductor de agua y acelerante Plastocrete 161 HE.....	135
Figura 70 Ensayo realizado para obtención del peso específico del árido fino.	139
Figura 71 Ensayo realizado para obtención de la densidad suelta y compactada del árido fino (arena).	147
Figura 72 Ensayo realizado para obtención del módulo de finura del árido fino (arena).....	151
Figura 73 Curva granulométrica de la muestra 1 de árido fino (arena).....	152
Figura 74 Curva granulométrica de la muestra 2 de árido fino (arena).....	153

Figura 75 Ensayo de colorimetría para obtención de impurezas orgánicas del árido fino (arena).	156
Figura 76 Ensayo realizado para obtención del peso específico del árido fino (perlita).	157
Figura 77 Ensayo realizado para obtención de la densidad suelta y compactada del árido fino (perlita).....	159
Figura 78 Ensayo realizado para obtención del módulo de finura del árido fino (perlita).	161
Figura 79 Curva granulométrica de la muestra 1 de árido fino (perlita).	162
Figura 80 Curva granulométrica de la muestra 2 de árido fino (perlita).	163
Figura 81 Ensayo de colorimetría para obtención de impurezas orgánicas del árido fino (perlita).....	163
Figura 82 Ensayo realizado en el cemento para determinar su densidad.....	166
Figura 83 Ensayo de flujo realizado en las mezclas.	200
Figura 84 Elaboración de cubos de mortero.....	201
Figura 85 Desencofrado de los cubos de mortero a base de cal y cemento.....	201
Figura 86 Curado de los cubos de mortero a base de cal y cemento.	202
Figura 87 Obtención de la masa en los cubos de mortero.....	203
Figura 88 Máquina universal de 200 toneladas.	204
Figura 89 Ensayo a compresión en cubos de mortero.	205
Figura 90 Resistencia a compresión en morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP1.	207
Figura 91 Resistencia a compresión en morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP2.	209
Figura 92 Resistencia a compresión en morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP1 y MP2 vs porcentaje de cal.....	210
Figura 93 Ajuste polinomial de las mezclas derivadas de MP1 y MP2 que contienen aditivo.	211
Figura 94 Reporte de las densidades obtenidas con las mezclas preseleccionadas.....	212

Figura 95	Resumen metodológico para el diseño y selección de la mezcla óptima.....	213
Figura 96	Panel estándar a base de paja de arroz, marcos de madera y mortero de cal y cemento.....	218
Figura 97	Marco de madera del panel estándar.....	219
Figura 98	Cara superior e inferior del marco de madera para un panel estándar.....	219
Figura 99	Detalle de uniones del marco de madera del panel estándar.....	220
Figura 100	Distribución de fardos de paja para un panel estándar.....	221
Figura 101	Proceso de recubrimiento con mortero para el panel estándar.....	221
Figura 102	Determinación de la masa de los paneles.....	234
Figura 103	Ensayo a compresión de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento)....	235
Figura 104	Diagramas esfuerzos vs deformaciones de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).....	237
Figura 105	Fallas a compresión en paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).	239
Figura 106	Ensayo a compresión diagonal de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).....	240
Figura 107	Diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).	242
Figura 108	Fallas a compresión diagonal en paneles (Marco de madera + paja + recubrimiento).....	244
Figura 109	Ensayo a compresión de paneles (Marcos de madera + paja).....	246
Figura 110	Diagramas esfuerzos vs deformaciones de paneles (Marcos de madera + paja).	247
Figura 111	Ensayo a compresión diagonal de paneles (Marcos de madera + paja).....	248
Figura 112	Diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de paneles (Marcos de madera + paja).....	250
Figura 113	Ensayo a compresión de paneles (Marcos de madera).....	253
Figura 114	Diagramas esfuerzos vs deformaciones de paneles (Marcos de madera).....	254

Figura 115 Ensayo a compresión diagonal de paneles (Marcos de madera).	255
Figura 116 Diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de paneles (Marcos de madera).	257
Figura 117 Masa de paneles elaborados a base de paja de arroz.	259
Figura 118 Resistencia a la compresión de paneles elaborados a base de paja de arroz.	260
Figura 119 Módulo de elasticidad de paneles elaborados a base de paja de arroz.	261
Figura 120 Esfuerzos cortantes máximos de paneles elaborados a base de paja de arroz.	262
Figura 121 Módulo de rigidez a corte de paneles elaborados a base de paja de arroz.	263
Figura 122 Planta arquitectónica vivienda familiar con paneles prefabricados de paja.	265
Figura 123 Vista exterior vivienda familiar con paneles prefabricados de paja.	265
Figura 124 Fachada lateral derecha vivienda familiar con paneles prefabricados de paja.	266
Figura 125 Fachada frontal vivienda familiar con paneles prefabricados de paja.	266
Figura 126 Fachada frontal y lateral vivienda familiar de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.	267
Figura 127 Vista 3d modelo computacional, paneles prefabricados con paja de arroz.	270
Figura 128 Vista 3d modelo computacional, paneles prefabricados con paja de arroz y entablados.	270
Figura 129 Vista 3d modelo computacional, paneles prefabricados con paja de arroz, entablados y cubierta.	271
Figura 130 Vista 3d modelo computacional cerchas, puntales, correas, vigas principales y secundarias.	272
Figura 131 Espectro de respuesta elástico de aceleraciones S_a	274
Figura 132 Espectros de respuesta elástico e inelástico.	276
Figura 133 Participación modal de masas sentido "X", estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.	278

Figura 134 Participación modal de masas sentido “Y”, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.....	279
Figura 135 Desplazamientos máximos vs número de piso, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.....	280
Figura 136 Derivas inelásticas vs número de piso, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.....	282
Figura 137 Evaluación económica comparativa valor total presupuestado, edificación de 3 pisos con paneles prefabricados de paja vs sistema tradicional aporticado de hormigón armado.	290
Figura 138 Evaluación económica comparativa por etapa constructiva, edificación de 3 pisos con paneles prefabricados de paja vs sistema tradicional aporticado de hormigón armado.	291

Resumen

El aumento de la población ha generado un mayor consumo de recursos en el campo de la construcción, debido al creciente requerimiento de viviendas, donde los materiales tradicionales requieren de procesos que generan combustión y mayor demanda de energía para su extracción. Por este motivo es necesario estudiar nuevos materiales como la paja de arroz y la cal, donde prevalezca criterios de economía circular, reduciendo el consumo energético y las emisiones de CO₂. La presente investigación tiene como finalidad determinar de manera experimental las características físico – mecánicas de paneles portantes, conformados por paja de arroz, marcos de madera, morteros de recubrimiento a base de cal y evaluar su comportamiento estructural en edificaciones de hasta 3 pisos, con el objetivo de valorar su uso en la construcción. A través del diseño y montaje de una máquina enfardadora se fabricaron 24 fardos, de los cuales se obtuvieron sus dimensiones, densidades y contenidos de humedades, por otro lado, posteriormente a la caracterización de los áridos finos, cemento y cal se diseñó el mortero de recubrimiento, mediante dos mezclas patrón de las cuales se obtuvo 16 adicionales, con las que se elaboraron 270 probetas determinándose su resistencia a compresión y densidad a fin de verificar la mezcla óptima que cumpla los requerimientos del IRC 2018. Finalmente, se fabricaron los paneles y por medio de ensayos de laboratorio se determinaron sus propiedades físico - mecánicas, posteriormente con la utilización de un software se verificó su comportamiento estructural. Se determinó que los paneles tienen una densidad de 298.16 kg/m³, resistencia a compresión de 5.92 MPa, resistencia a compresión diagonal de 0.38 MPa, módulo de elasticidad de 424.08 MPa, módulo rigidez a corte de 157.11 MPa y coeficiente de Poisson de 0.35, los mismos son aptos para utilizarlos en la construcción de edificaciones de hasta 3 pisos de altura, presentan un adecuado comportamiento estructural, además las respuestas estructurales obtenidas cumplen con las admisibles establecidas por la NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico”.

Palabras clave: paja, densidad, mortero, fardo.

Abstract

The increase in population has generated a greater consumption of resources in the field of construction, due to the growing requirement for housing, where traditional materials require processes that generate combustion and greater energy demand for their extraction. For this reason, it is necessary to study new materials such as rice straw and lime, where circular economy criteria prevail, reducing energy consumption and CO₂ emissions. The purpose of this research is to experimentally determine the physical-mechanical characteristics of load-bearing panels made of rice straw, wood frames, lime-based coating mortars and to evaluate their structural behavior in buildings of up to 3 stories, with the objective of assessing their use in construction. Through the design and assembly of a baling machine, 24 bales were manufactured, from which their dimensions, densities and moisture contents were obtained, on the other hand, after the characterization of the fine aggregates, cement and lime, the coating mortar was designed, by means of two standard mixtures from which 16 additional mixtures were obtained, with which 270 specimens were made, determining their compressive strength and density in order to verify the optimal mixture that meets the requirements of the IRC 2018. Finally, the panels were manufactured and their physical-mechanical properties were determined by means of laboratory tests, and their structural behavior was subsequently verified with the use of software. It was determined that the panels have a density of 298.16 kg/m³, compressive strength of 5.92 MPa, diagonal compressive strength of 0.38 MPa, modulus of elasticity of 424.08 MPa, shear stiffness modulus of 157.11 MPa and Poisson's coefficient of 0.35, they are suitable for use in the construction of buildings up to 3 stories high, they present an adequate structural behavior, and the structural responses obtained comply with the admissible ones established by the NEC - SE - DS "Seismic Risk".

Palabras clave: straw, density, mortar, bale.

Capítulo I

Generalidades

Introducción

Durante el sismo de 16 de abril de 2016 las edificaciones se vieron claramente afectadas y con gran daño en las paredes de relleno, por lo que quedó en evidencia la deficiente calidad de materiales y técnicas constructivas en las edificaciones, fomentado la aparición de piso blando, torsión en planta y columnas cortas (Viera & Caiza, 2016). Estos aspectos permiten llegar a la conclusión de que es necesario el análisis y diseño tanto experimental como analítico fundamentalmente de las mamposterías, así como el estudio de materiales alternativos de mejor calidad que se puedan obtener a precios no muy elevados y fomenten sustentabilidad ambiental en nuestro país, como por ejemplo la utilización de la paja de arroz.

El uso de la paja de arroz como material de construcción presenta varias ventajas, además de ser una estrategia eficaz para reducir el impacto ambiental mejora las propiedades de aislamiento térmico y acústico en las edificaciones, aumenta el confort y reduce el impacto de ruido urbano hasta el punto de brindar una mejor calidad de vida y condiciones de salud a las personas que habitan en estas. Igualmente, fomenta soluciones de construcción térmicamente eficientes, a su vez ayuda a reducir la energía consumida por la climatización durante el funcionamiento de las edificaciones (Asdrubali, Alessandro, & Schiavoni, 2016).

El uso de este material en la construcción valorizará la actividad agrícola llevándola a una gestión direccionada al ámbito sostenible en la elaboración de viviendas sustentables, tanto en la zona rural como urbana de la región costera del Ecuador donde se produce el arroz y como posible solución al déficit habitacional que se presentan en estas zonas. Esto podría ejecutarse mediante la utilización de los fardos de paja al ser empleados en la construcción, donde se ha comprobado su durabilidad en edificaciones que tienen más de 100 años de antigüedad y que actualmente están en buenas condiciones (Marques, Tadeu, Almeida, & Brito,

2019). Al introducir materiales sostenibles al ámbito de la construcción como la paja de arroz, se valoriza la participación de propuestas de bioconstrucción producidos desde la academia debidamente sustentadas con estudios técnicos. (Sanchez & Hernández, 2017)

La presente investigación tiene como finalidad diseñar, determinar de manera experimental, analítica las características físico – mecánicas de paneles tipo sándwich, conformados por fardos de paja de arroz, marcos de madera y morteros a base de cal para ser aplicados como revocos en las caras externas del panel. De esta manera lo que se desea proponer es un nuevo material para ser usado como mampostería estructural en edificaciones de hasta 3 pisos, y su posible uso para la construcción de viviendas sismoresistentes mediante su comprobación previa en modelos estructurales.

Para dar cumplimiento a la investigación, se caracterizan las propiedades de los materiales utilizados en la elaboración de estos paneles (fardo de paja de arroz y de aquellos materiales que componen el mortero para el revocado del mismo, como por ejemplo el cemento, arena, cal y perlita), mediante la ejecución de ensayos necesarios como colorimetría, densidad suelta y compactada, peso específico, capacidad absorción, granulometría, densidad aparente y contenido de humedad.

Posteriormente, una vez definidas estas propiedades se elaboran diferentes mezclas de prueba con sus respectivas probetas, con la finalidad de obtener dosificaciones óptimas, las mismas que se ajusten de mejor manera a las necesidades de la investigación y a la normativa americana IRC 2018 - Construcción con Paja. Las probetas deberán ser sometidas a diferentes pruebas de laboratorio como el ensayo de compresión, esto con la finalidad de caracterizar al mortero a usar como revoco y posteriormente encontrar las cantidades, dosificaciones exactas a fin de estandarizar su fabricación y su uso en la elaboración de estos paneles.

De los fardos de paja desnudos se determina propiedades como la humedad y la densidad aparente. Con estos resultados y cuando se hayan realizado los ensayos en el mortero definitivo utilizado como revoco, se procede a la elaboración de los paneles

compuestos por fardos de paja de arroz, marcos de madera y un recubrimiento de mortero a base de cal para las caras externas del panel. Posteriormente, se determina las características físico – mecánicas de los mismos, por ejemplo, módulo de elasticidad, esfuerzo a compresión, resistencia a tracción diagonal y módulo de rigidez, finalmente mediante la utilización de un software de análisis estructural se verifica el comportamiento estructural de estos paneles al ser colocados en edificaciones de hasta 3 pisos de altura construidas sobre suelos tipo C.

El desarrollo de estudios que permitan identificar las propiedades tanto físicas y mecánicas de nuevos materiales como la cal, la paja y la perlita, permitirá promover el uso de los mismos en el Ecuador, además contribuirán a profesionales de la construcción con nuevos datos para ejecutar un análisis y modelamiento estructural adecuado, casi cercano a la realidad e identificar su conveniente uso en la construcción de edificaciones. Países como Francia, España, Alemania y Australia ya cuenta con casi 3000 edificaciones construidas con paneles de paja (Romero & Iborra, 2015). La empresa EcoCocon situada en España y con más de 10 años de experiencia, fabrica y promueve el uso de paneles compuestos por un 89% de paja, 10% de madera y revestimientos a base de cal o arcilla. Hasta el momento la empresa ha construido más de 20 000 m² con muros de este tipo, que demuestran eficiencia energética, capturando más de 1 500 toneladas métricas de CO₂ (EcoCocon, 2022).

Antecedentes

Debido a la fácil obtención de materiales tanto de manera natural como artificial la mampostería es considerada como uno de los primeros sistemas constructivos; inicialmente se empleaba tanto la piedra como el adobe para construirla y se la podía colocar de forma sencilla manualmente de ahí el nombre de mampuesto. Durante mucho tiempo atrás y actualmente existen obras que han sido construidas con mampostería por ejemplo el Coliseo Romano, la Gran Muralla China y las Pirámides de Egipto entre las más importantes (Rodríguez & Solis, 2020)

Realizando una visión general la mampostería cuenta con altas resistencias a compresión mientras que su resistencia a tracción es baja, por tal motivo cuando las cargas actúan verticalmente y se disponen dentro del plano de la pared su desempeño es óptimo, sin embargo, las fuerzas horizontales como el viento, terremotos en la mampostería generan fuerzas cortantes y flexionantes. Las acciones sísmicas generan un gran daño en estos elementos debido al volcamiento de las paredes, entre las causas analizadas se considera la adherencia o limitada interacción entre el bloque y el material de unión (Hassanli, 2017).

El Ecuador debido a su ubicación geográfica presenta alta amenaza sísmica y debido a la idiosincrasia de sus habitantes se prefiere el uso de mampostería simple en la construcción de viviendas; los muros de mampostería son rígidos mientras que los elementos que conforman el pórtico son dúctiles, por lo que la mampostería es uno de los primeros elementos en fallar ante eventos telúricos, para contrarrestar este problema se debe conseguir que los elementos trabajen monolíticamente a fin de obtener un mejor desempeño (Mejia, 2018).

Para lograr que el sistema estructural trabaje monolíticamente, se debe dar continuidad en los muros desde su cimentación (Albuja & Pantoja, 2017). En los últimos años se han estudiado varias técnicas de reforzamiento en la mampostería como es el uso de fibras reforzadas con polímeros (FRP) donde se ha visto reflejado su eficiencia obteniéndose buenos resultados (Barros, 2017). También se ha abordado estudios relacionados al uso de desechos agroindustriales, que sean sostenibles y sustentables como la fibra de cabuya, coco, trigo que cuenta con excelentes propiedades mecánicas demostrando tener eficiencia para el reforzamiento de columnas, vigas, como también para construcciones de viviendas sismoresistentes (Andrade & Palacios, 2019)

En Ecuador se han desarrollado investigaciones importantes sobre el uso de fardos de paja de trigo en las edificaciones, una de las pioneras en estas investigaciones es la ingeniera Paulina Viera. (Viera, Pachala, Rosero, & Caiza, 2016), desarrollaron la investigación "Construction System for Single-Family Homes using Load Bearing Straw Bale Walls

Quivillungo Community, Bolivar, Ecuador”, donde se elaboró una vivienda a escala real con muros de fardos de paja y revoco de terrocemento, se llegó a concluir que este tipo de viviendas pueden llegar a costar hasta un 50% menos que una vivienda de hormigón armado con similares dimensiones, siempre que la construcción se realice de forma colaborativa. Además, se ejecutó el modelamiento estructural mediante el uso de un software llegándose a concluir que la vivienda cumple con los requisitos sismoresistentes y es segura para ser habitada, además de no requerir de mano de obra especializada para su construcción.

(Viera, Aguirre, & Monzó, 2020), realizaron la investigación, “Determinación de las características del fardo de paja de trigo, como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción” en este trabajo se estudiaron las propiedades físico - mecánicas tanto en fardos de paja desnudos como revocados mediante el uso de mortero previamente diseñado a base de cemento, cal, arena fina, fibras naturales como el yute. El módulo de elasticidad obtenido en los fardos de paja revocados se encuentra entre 12,98 MPa y 18,67 MPa, se llega a concluir que para los fardos en posición canto su módulo de elasticidad es menor a comparación cuando el fardo está en posición plano.

Además, en este trabajo se realiza el modelamiento estructural de los fardos de paja en una edificación tipo de 2 pisos, se concluye que viviendas realizadas con este material son sismoresistentes ya que cumplen con los requisitos constructivos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Cabe señalar que uno de los principales problemas cuando se utiliza los fardos de paja es que ocupan demasiado espacio debido a su espesor considerable, reduciendo el espacio ocupacional al interior de la vivienda.

(Viera P, 2020), en su publicación “Factibilidad de construcción de viviendas sismoresistentes en la zona andina del Ecuador utilizando fardos de paja”, señala que en la Universidad Central del Ecuador se han realizado varios estudios experimentales dirigidos por su persona sobre las propiedades físicas y mecánicas de los fardos de paja que se producen localmente, se han ejecutado diferentes pruebas de laboratorio como pruebas de carga

pseudo-dinámicas demostrando que los muros se comportan como cuerpos rígidos pero dejando que los desplazamientos se originen por desplazamientos en los elementos de soporte, satisfaciendo los requerimientos de comportamiento sísmoresistente.

(Hidalgo, 2018), realizó la investigación donde evalúa la reactividad puzolánica de la ceniza de la paja de arroz (CPA). En primera instancia se establece caracterizar la paja de arroz tanto física como químicamente y después evaluar sus propiedades puzolánicas, todo esto con el objetivo de llegar a definir su posible uso como adición puzolánica para la elaboración de morteros de cemento. Una vez quemada la paja de arroz se llega a obtener una granulometría óptima de la ceniza para la realización de ensayos y así determinar contenido de cloruros y residuos insolubles, también se realizan ensayos de microscopía y difracción de rayos X. Para evaluar su reactividad puzolánica se realizan ensayos normalizados de Frattini, conductividad, pH, finalmente se fabrican probetas de mortero de cemento Portland con sustitución del 15% y 30% de cemento por CPA. Los resultados obtenidos son muy buenos para los porcentajes anteriormente dichos, creando un excelente perfil de este material, como adición puzolánica en la posible utilización para la fabricación de morteros de cemento Portland.

(Briones & Estrada, 2018), investigaron el diseño de un bloque de adobe con la adición de diferentes tipos de fibras incluida la paja de arroz. Evaluaron la resistencia a compresión de este mampuesto, se identificó la granulometría y límites de consistencia de la tierra utilizada. Los mampuestos se fabricaron con la adición de 5%, 10%, 15% de paja de arroz, obteniéndose como resultado que la resistencia del bloque es inversamente proporcional a la adición de paja, de esta manera se obtiene una resistencia de 24,25 Kg/cm², 21,09 Kg/cm² y 17,65 Kg/cm² respectivamente. Se llega a concluir que al adicionar la paja de arroz en estos mampuestos se supera la resistencia a compresión normativa de 10.2 Kg/cm² en un 15.34%.

(Marques, Tadeu, Almeida, & Brito, 2019), investigaron las características de muros de construcciones sostenibles con fardos de paja, mediante procedimientos experimentales

previamente establecidos, con el fin de evaluar propiedades higrotérmicas y acústicas. Se determinaron características intrínsecas de la fibra de paja de arroz como su capacidad calorífica específica, propiedades de sorción higroscópica y resistencia biológica, posteriormente se evaluaron propiedades en los fardos de paja de arroz como material de construcción en términos de conductividad eléctrica, permeabilidad al vapor de agua y absorción de agua. En base a todas las propiedades encontradas se puede concluir que los fardos de paja de arroz se pueden utilizar para la construcción de muros que forman parte de edificaciones de alto rendimiento.

El motivo de estudiar la paja de arroz como material de construcción radica principalmente al bajo impacto ambiental y gran capacidad de aislamiento térmico que brinda a las edificaciones, además de ofrecer gran resistencia y bajo costo de construcción a diferencia de una vivienda convencional. El uso de este material promueve las construcciones sustentables ya que garantiza la conjugación de tres aspectos importantes como son el ecológico – medio ambiental, económico y social (Costes, et al., 2017)

Debido a la gran cantidad de cultivo del arroz en Ecuador, con una superficie sembrada de 370 406 hectáreas, especialmente en la región Costera en provincias como Guayas, Los Ríos, Manabí, Esmeraldas, El Oro con una producción 1 440 865 toneladas de arroz por año según datos del Instituto de Estadística y Censos, los fardos de paja de arroz se convierten en una opción importante para su uso en la industria de la construcción. Los paneles elaborados con paja de arroz, marcos de madera y morteros utilizados para revocado de los mismos a estudiarse en la presente investigación, se pretenden que puedan ser utilizados para construcciones de viviendas de hasta 3 pisos, ubicadas en las ciudades con mayor producción de arroz con la finalidad de evitar costos de transporte altos.

Planteamiento del problema

Macro

La contaminación ambiental ha sido un problema latente en el mundo, problema que hay que enfrentarlo para preservar el planeta Tierra. No es necesario informarse en los medios de comunicación sobre la actual realidad para darse cuenta que el ambiente físico de la Tierra está en constante cambio, por lo que resulta complicado controlar el crecimiento económico y a su vez la conservación del medio ambiente (Gómez, 2020).

Actualmente existe un exagerado deterioro ambiental, fruto de las acciones del ser humano que ha conseguido alterar el equilibrio del planeta Tierra como consecuencia de las actividades económicas. El incremento de la población en el mundo lleva consigo el crecimiento en la industria de la construcción y como consecuencia la explotación de recursos no renovables, ligado a un aumento en el impacto ambiental como la contaminación del suelo, el agua y aire (Marin & Almazan, 2019).

Es así, que el desarrollo sostenible se ha convertido en prioridad en la industria a nivel mundial, experimentando una transformación en la construcción hacia la sostenibilidad y el manejo responsable de los recursos (Rojas, Otávaro, Caicedo, Mauricio, & Fregoso, 2020). Las edificaciones consumen entre el 45% y 60% de materiales que son extraídos de la litosfera, y por tal motivo se buscan nuevas alternativas sobre el uso de materiales que puedan brindar un equilibrio al medio ambiente, sea reutilizando o reciclando residuos desechos o desperdicios provenientes de procesos industriales como la paja de arroz, para posteriormente ser empleados como materia prima en la fabricación de nuevos productos y materiales (Valepucha, 2014).

La incorporación de nuevos materiales en la construcción exige realizar el análisis sismoresistente, los mismos que deben dar cumplimiento con la normativa actual vigente. Esto nos permite concluir si aquellos materiales son adecuados para utilizarlos en la construcción y

a su vez realizar un análisis económico, que nos ayude a comparar si los mismos requieren de más costos o menos costos para su fabricación. Con la construcción de estos paneles a partir de la paja de arroz, lo que se busca es incluir una metodología o alternativa de sostenibilidad, además de incorporar nuevos datos, características sobre las propiedades de los fardos de paja de arroz producidos en Ecuador, que actualmente no se conoce. Como resultado final se pretende identificar el comportamiento estructural de los paneles (fardos de paja de arroz, marcos de madera, moteros de cal previamente diseñados como revocados) para dejar la posibilidad de que nuevos profesionales estudien al material con enfoque al modelamiento estructural en edificaciones.

Meso

En Ecuador diariamente se genera 14 000 toneladas de desechos, mientras que si se realiza un cálculo se genera más de 5 millones de toneladas anualmente, de los cuales el 56,20% son residuos orgánicos y el 43,80% es inorgánico (Ministerio del Ambiente y Agua, 2020). Según datos estadísticos en el 2010 se produjeron 1.132.267 toneladas de arroz, con una superficie de 382.230 hectáreas de sembrío de donde se cosecha 363.119 ha, y rinde 3,12 (Tm/ha), lo que representa el 0.28% de producción nacional a nivel mundial (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017).

El arroz es una de las gramíneas más consumidas en Ecuador y se encuentra distribuido de manera extensa en el país, como cultivo es uno de los más cosechados conjuntamente con el cacao y el maíz generando gran cantidad de bio masa residual que es quemada y desechada por los agricultores, causando contaminación por emisores de dióxido de carbono (CO₂), por lo que el porcentaje de materia que se desperdicia es significativo y puede aprovecharse realizando un enfoque en la bioconstrucción (Caicedo, Diaz, & Cadena, 2019).

Frente a estos problemas se promueve el uso de la paja de arroz con el fin de obtener materiales innovadores con características físico – mecánicas óptimas, que permitan su uso como material de construcción para edificaciones y que generen un desarrollo sostenible, obteniéndose de esta manera un nuevo material a la altura de otros o mejor a los que se encuentran en el mercado. La paja de arroz cumple con las exigencias de la Norma Ecuatoriana de la construcción (NEC), ya que se trata de un material liviano con baja densidad, que promueve la disminución del peso propio en las edificaciones y a su vez de la carga lateral. Además, como consecuencia se genera la disminución de respuestas estructurales como las derivas de piso y desplazamientos. En las investigaciones realizadas por (Viera, 2016 y 2020) enfocadas en la caracterización de la paja de trigo, garantizan la viabilidad de la presente investigación. En estas se logra concluir que es un material que cumple con los requisitos sismoresistentes, además de presentar una alternativa al desarrollo rural del Ecuador en la construcción de viviendas.

Micro

La construcción de edificaciones informales, indebidos procesos constructivos, mala calidad de los materiales incumplen con las normativas de construcción actualmente vigentes, las cuales deberían ser aplicadas en la construcción de las edificaciones. Además, la mano de obra no calificada pone en evidencia la vulnerabilidad de las edificaciones ante la acción de posibles sismos que se puedan generar y que ya han afectado a distintas ciudades como Quito, Pedernales, Guayaquil, Riobamba, Ambato entre las más importantes (Cañizares, 2017).

Ante la falta de conocimiento de las personas sobre la existencia de diferentes normas que deben ser aplicadas en Ecuador, se ha fomentado las construcciones informales, según el Colegio de Arquitectos de Pichincha el 70% de las edificaciones construidas en la ciudad de Quito son informales, ya que no cumplieron con los planos aprobados ni supervisión técnica, el

80% de las edificaciones existentes tienen probabilidad de sufrir daños o llegar al colapso ante un sismo de alta intensidad similar al de Pedernales del 16 de abril de 2016 (Jacome, 2017).

Una de las principales ciudades productoras de arroz es Guayaquil, que cuenta con un 85% de edificaciones informales con probabilidad de sufrir graves daños ante sismos, en esta ciudad existe considerables falencias para el otorgamiento y control de los permisos de construcción. Los diseños estructurales como arquitectónicos se firman por profesionales que no cuenta con experiencia ni tampoco son especialistas en el tema, además las edificaciones son construidas por maestros artesanales, mas no por profesionales (Jama, 2020).

En Esmeraldas se tiene una situación similar, donde se puede evidenciar graves daños físicos y materiales en las edificaciones debido al sismo del 16 de abril de 2016, el municipio de esta ciudad realizó el levantamiento de información donde se obtuvo que el 98% de edificaciones que sufrieron daño fueron construidas informalmente, incidiendo directamente en la vulneración de las mismas y como consecuencia se derrocaron 15 edificaciones afectadas considerablemente por el terremoto (Arias, 2017).

El sismo del 16 de abril de 2016 puso en evidencia la mala calidad de los materiales usados en las mamposterías de relleno y morteros de unión en las edificaciones. Como resultado se evidenció daño considerable en estos elementos. Esta problemática promueve el estudio y diseño sismorresistente inmediato de las mamposterías, más aún en zonas con alta peligrosidad sísmica como la ciudad de Guayaquil, además permite la búsqueda de materiales alternativos, ecológicos, sustentables que garanticen el cumplimiento de la calidad de los materiales utilizados en las mamposterías, conforme los parámetros que se establecen en la normativa ecuatoriana (Viera & Caiza, 2016).

Justificación e importancia

El Ecuador en el año 2010 produjo alrededor de 1.132.267 toneladas de arroz, lo que representa un 0.28 % de la producción a nivel mundial, la provincia con mayor producción de arroz es Guayas con 120 a 140 quintales por hectárea que provienen de cantones como Daule

y Samborondón. En el 2013 la superficie sembrada de arroz alcanzaba 414 096 hectáreas que corresponde al 92.94 % de las provincias de Guayas y Los Ríos, el 7,06 % se distribuye en la provincia de Loja en los cantones Macará y Zapotillo, mientras que, para las provincias de Pichincha, Manabí la producción de arroz es moderada con 100 quintales por hectárea (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017).

Para el 2017 según el Instituto de Estadística y Censos la superficie sembrada de arroz fue de 370 406 hectáreas, produciendo 1 440 865 Toneladas de arroz, siendo las provincias de Guayas y Los Ríos las de mayor producción de arroz en un 70.11% y 24.14% respectivamente. Respecto a la dinámica de la producción de este cereal en el 2016 se identificó que en la provincia de Los Ríos se registraron un total de 101 938 hectáreas de arroz distribuidas de la siguiente manera 49 566 hectáreas en el primer cuatrimestre, 47 219 en el segundo cuatrimestre y 5 153 hectáreas en el tercer cuatrimestre (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017).

Dentro del proceso para cosechar el arroz, la paja es un subproducto que se ha considerado como un verdadero problema para poder eliminarla, ya que su costo de retirada es elevado y su aprovechamiento es nulo como abono; los agricultores han optado por quemarla en el campo en periodos de 15 a 20 días. Este residuo genera excesiva contaminación ambiental por la emisión de gases resultantes de la combustión (Montañez, 2018). La paja es un material sostenible, amigable con el medio ambiente ya que no emite CO₂ u otros gases en estado natural (Minke & Manlke, 2006). Con el aprovechamiento de la paja de arroz se puede dar un nuevo enfoque al ámbito agrícola encaminada al área de las construcciones sostenibles. Esta investigación pretende suplir de alguna manera la forma incontrolada de manejo de estos desechos, que al ser enfardados y al integrarse con marcos de madera y morteros, forman nuevos materiales para ser usados en la construcción, capaz de sustituir a la mampostería tradicional y precautelar la vida de las personas ante eventos sísmicos.

El presente estudio está enfocado en determinar las características físico – mecánicas mediante ensayos de laboratorio y procedimientos analíticos de paneles compuestos por fardos de paja de arroz, marcos de madera y morteros a base de cal. En base a la caracterización de los materiales utilizados para elaborar estos paneles, se ejecutarán pruebas piloto para garantizar el diseño del mortero. Una vez fabricados estos paneles serán sometidos a pruebas de laboratorio, a fin de obtener propiedades como módulo de elasticidad, módulo de rigidez a corte, resistencia a compresión, resistencia a compresión diagonal. Las propiedades obtenidas nos servirán para calibrar modelos matemáticos a fin evaluar estructuralmente los mismos en edificaciones de hasta 3 pisos, mediante un análisis modal espectral.

La esencia de esta investigación se basa en aporta datos sobre las características físico - mecánicas de paneles compuestos por paja de arroz producida en Ecuador, esta información es escasa actualmente y contribuiría en dar a conocer materiales alternativos, además de dejar abierta la posibilidad de que profesionales en el campo puedan indagar en el modelamiento estructural de las edificaciones construidas con estos paneles.

Objetivos

Objetivo General

- Determinar las características físico-mecánicas, evaluación estructural de paneles tipo sándwich conformados por fardos de paja de arroz, marcos de madera y mortero para ser utilizados en edificaciones de hasta 3 pisos.

Objetivos específicos

- Construir una máquina enfardadora manual para la fabricación de fardos con paja de arroz.
- Caracterizar mediante pruebas de laboratorio los materiales utilizados para la elaboración de los paneles tipo sándwich como la paja de arroz, cemento, agregados finos y materiales que garanticen las propiedades del mortero utilizado para el revocado de los mismos.

- Diseñar la dosificación óptima del mortero utilizado para revocar las paredes externas del panel con fardos de paja de arroz, mediante pruebas de laboratorio que garanticen la resistencia requerida para fines de esta investigación.
- Determinar mediante ensayos de laboratorio la resistencia a compresión, módulo de elasticidad, resistencia a compresión diagonal y módulo de rigidez de paneles tipo sándwich conformados por fardos de paja de arroz, marcos de madera, y mortero para su revocado.
- Realizar un análisis modal espectral mediante el uso de un software que permita evaluar el comportamiento estructural de los paneles a base de paja de arroz para utilizarse en edificaciones de hasta 3 pisos de altura.
- Desarrollar una evaluación económica comparativa de ediciones de hasta 3 pisos de altura construidas con paneles tipo sándwich de paja de arroz vs sistema tradicional aporticado de hormigón armado con mampostería.

Hipótesis de investigación

La utilización de paneles compuestos por fardos de paja de arroz, marcos de madera y mortero para su revocado a ser usados en edificaciones de hasta 3 pisos de altura, permitirá obtener un material ecológico, liviano y con iguales o mejores características físico-mecánicas que los materiales convencionales, como también edificaciones sismoresistentes.

Capítulo II

Marco teórico

La Paja

La paja es considerada como un tallo seco localizado entre la raíz y la espiga, generada a partir de la cosecha de cereales como el trigo, arroz, centeno, avena y cebada. Este desecho agroindustrial cuenta con una textura impermeable, además de estar compuesta por celulosa y lignina (Minke & Manlke, 2006). La actividad agrícola a nivel mundial produce gran cantidad de paja, durante mucho tiempo esta fue utilizada como alimento de animales y además para la producción de abono. Sin embargo, durante la aparición de los fertilizantes esta práctica ha ido desapareciendo, provocando que los agricultores la quemen en el campo y como consecuencia aporte a las emisiones de gases efecto invernadero (Bernal, 2018).

El uso de materiales naturales como la paja generados a partir de subproductos de la producción agrícola, contribuye a la disminución de emisiones contaminantes. Además, al igual que la madera y el cáñamo al generarse a partir de especies vegetales capta el dióxido de carbono dentro de la fotosíntesis en su etapa de crecimiento, esto aporta a una contribución importante para el medio ambiente debido a la captación de dióxido de carbono que genera (Cascone, Rapisarda, & Cascone, 2019).

Ecuador es un país con una importante producción de arroz a nivel mundial, su producción nacional representa el 0.28 % a nivel mundial (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017), generando de esta manera considerable cantidad de este desecho agroindustrial, que puede ser integrado a una cadena de valor para utilizarlo como material de construcción. En el país anualmente se genera más de 5 millones de desechos, el 43.80 % corresponde a desechos inorgánicos (Ministerio del Ambiente y Agua, 2020). En el 2020 se cosecharon alrededor de 14 647 toneladas de trigo, dentro de un sembrío de 6 880 hectáreas (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador, 2019). Estos valores son los más altos que se han podido obtener en el país a partir del 2002 (Sánchez A. , Vayas, Mayorga, & Freire,

2020). Actualmente no solo se produce este cereal, sino también el arroz y la cebada. Se tiene en Ecuador alrededor de 1 971 206 de hectáreas sembradas de arroz y 1 464 hectáreas de cebada. Por cada hectárea de cereal cosechado se puede obtener entre 2.69 a 3.50 toneladas de paja, que podría ser muy bien utilizada para fines constructivos (Lee & Grove, 2015).

La paja como material de construcción

Debido a la gran cantidad de este material que se genera en nuestro país y en el mundo a partir de la cosecha de cereales como el arroz, cebada, trigo y avena, la incorporación de la paja como material de construcción surge como una necesidad. Su uso en la construcción con el pasar del tiempo ha ido en aumento, debido a sus características aislantes y durabilidad (Rivero, 2021) . Además, en conjunto con la madera su empleo en las construcciones se ha expandidos en Europa en países como España, Francia y Alemania (Nitzkin, 2021).

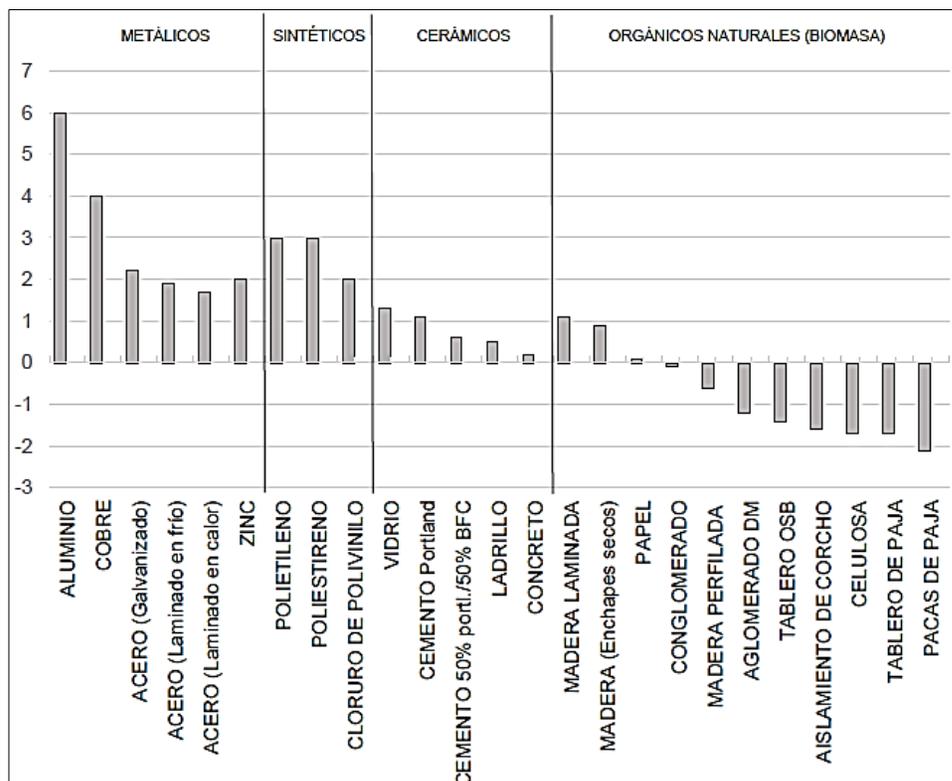
De esta manera surge el Estilo Nebraska, que se fundamenta en la creación de muros de carga mediante la utilización fardos de paja. Con la finalidad de intercambiar ideas, conceptos e información sobre las construcciones con paja en 1998 se crea la European Straw Building Association (Nitzkin & Termens, 2010). Poco a poco países como Francia, Alemania, Estados Unidos, Canadá han desarrollado diferentes normativas sobre este tipo de construcciones con la finalidad de incentivar su uso, mientras que países como España y Ecuador aun no cuentan con un marco legal específico para estas edificaciones.

La industria de la construcción debido a su gran expansión contribuye significativamente a la emisión de gases efecto invernadero, afrontando de esta manera a un verdadero reto ambiental global. Una arquitectura sostenible, el cambio de hábitos en cuanto al uso de materiales y la construcción de edificaciones es fundamental para reducir gases como el CO₂ que, complementado con el reciclaje de residuos agroindustriales como la paja, aporta efectos beneficiosos ante la protección del medio ambiente y los recursos naturales. En la figura 1, se muestra la cantidad de emisiones negativas y positivas de materiales metálicos, sintéticos,

cerámicos comúnmente utilizados en la construcción y además materiales orgánicos naturales (Barbero, 2021).

Figura 1

Emisiones de CO₂ producidas por cada Kg de material utilizado en la construcción.



Nota. Recuperado de (Montañez, 2018)

Los materiales comúnmente utilizados en las construcciones requieren de gran cantidad de energía, no solo para su elaboración, sino también lo largo de su ciclo de vida. Esta energía es utilizada para la extracción de las materias primas, transporte hacia su destino final y procesos de transformación. En la tabla 2, se muestra la cantidad de energía requerida durante el ciclo de vida de diferentes materiales y que han sido utilizado con frecuencia en la construcción de viviendas. Se puede visualizar que aquellos materiales alternativos como la paja son los que requieren menor cantidad de energía. Por lo tanto, la bioconstrucción

mediante el uso de estos materiales apuesta al desarrollo sostenible en el campo de la construcción (Hernandez, Jiménez , & Sanchez, 2020).

Tabla 1

Energía requerida durante su ciclo de vida para diferentes materiales de construcción.

Material	MJ/m3
Paja	30,5
Arena	232
Adobe	490
Bloque de tierra prensado	810
Piedra local	2030
Poliestireno expandido	2340
Concreto	3890
Ladrillo cerámico	5170
Teja cerámica	5250
Madera contrachapada	5720
Asfalto	7140
Cemento	15210
Poliuretano	44 400
Polipropileno	57600
PVC	93620
Acero	274570

Nota. Recuperado de (Hernandez, Jiménez , & Sanchez, 2020)

Ventajas

El uso de la paja como material de construcción a lo largo de los últimos ha ido en aumento, provocando así el desarrollo de diferentes sistemas constructivos relativamente nuevos. Esto ha permitido que se pueda abrir un sinnúmero de posibilidades constructivas al utilizar este desecho agroindustrial, pudiéndose de esta manera mencionar algunos beneficios que ofrece la paja como material de construcción:

- Debido a la gran producción de cereales como el arroz, cebada, trigo y como consecuencia la generación de abundante paja a nivel mundial, este material ofrece

costos y facilidades de transporte adecuados para su traslado del campo a la ciudad (Martínez & Jové, 2019).

- Edificaciones con paja que tienen más de 100 años de haber sido construidas en países como Estados Unidos, ponen en evidencia la buena durabilidad que tiene este material (Martínez & Jové, 2019).
- Promueve las autoconstrucciones debido a la interacción social que estas viviendas puede generar por la participación de vecinos, familiares y amigos durante las construcciones. Esta experiencia no se da en las técnicas tradicionales por el conocimiento previo que se debe tener, además la paja presenta un ahorro en costos de materiales (Martínez & Jové, 2019).
- Contribuye en aspectos fisiológicos y psicológicos, por permitir construir edificaciones amigables con el medio ambiente, saludables y con ambientes cálidos.
- La paja no emite CO₂ a la atmosfera, al contrario, es un material que durante su ciclo de vida capta nutrientes que transforma el CO₂ a partir de la fotosíntesis. (Wang, y otros, 2018)
- Permite aislar el ruido exterior con interior en las edificaciones, es decir es uno de los pocos materiales que tienen un buen comportamiento acústico, ya que absorbe en gran cantidad las ondas sonoras incidentes (Cascone, Catania, Gagliano, & Sciuto, 2018)
- Brinda en las edificaciones sensación de bienestar y confortabilidad comúnmente conocido como confort hidrotérmico. Este produce por las condiciones físicas que puede presentar el material como parte de una edificación por ejemplo la temperatura, humedad, movimiento del aire dentro de la edificación (Cascone, Catania, Gagliano, & Sciuto, 2018).
- Su combustibilidad es muy baja, edificaciones que son construidas con paja cuentan con alta resistencia al fuego. Esta propiedad está directamente relacionada con el

oxígeno que se puede generar dentro de las pacas de paja que forman parte de la vivienda y del tipo de material que se pueda utilizar como revoco en las paredes de estas viviendas (Markovic & Milic, 2018).

Objeciones y temores

El desconocimiento de nuevos materiales que son inusualmente utilizados en la construcción, más aún cuando los mismos son considerados como desechos o utilizados como alimento para el ganado, genera diferentes objeciones y temores sobre su uso, que nacen por el total desconocimiento y estudio de este material. A continuación, se puede señalar las más importantes:

- **La paja se incendia fácilmente.** Este material al estar suelto puede incendiarse de forma rápida, sin embargo, para la construcción la paja debe ser enfardada o empacada con el fin de eliminar el oxígeno existente entre los tallos, además en conjunto con recubrimientos conocidos como revocos y que son elaborados a base de arcilla o cal, este material puede aumentar significativamente su resistencia al fuego. Actualmente estas técnicas son desconocidas y fueron implementadas en Australia por primera vez y posteriormente en Alemania (Markovic & Milic, 2018).
- **Viviendas con ratones.** Este es uno de los principales temores sobre el uso de la paja en la construcción, sin embargo, en viviendas construidas en Estados Unidos que han sido demolidas (Rivero, 2021), se ha podido revisar que en cada uno de los fardos no existen la presencia de roedores. La paja no sirve como alimento para ratones y el fardo al tener una densidad superior a 80 kg/cm³ no da posibilidad a la anidación de estos animales. (Sebapathy & Gedupudi, 2019).
- **Presencia de termitas.** Estudios demuestran que, las termitas pueden fácilmente causar daños significados en la madera tanto en puertas como en los marcos de las ventanas que forman parte de las viviendas. Sin embargo, la paja es un material que no

llama la atención de estos insectos y es el único material que permanece intacto ante su presencia (Minke & Manlke, 2006).

- **Presencia de Moho.** La presencia de moho puede darse siempre y cuando los muros de paja no estén correctamente contruidos y cuando la paja no cuenta con una humedad adecuada. Esto quiere decir que la paja para ser apta y utilizada en la construcción debe estar completamente seca y cumplir con un contenido de humedad máximo. (Sebapathy & Gedupudi, 2019).
- **Enfermedades causadas por el polvo.** Este es un problema que se puede presentar principalmente durante la construcción de las viviendas, pero se soluciona mediante el uso de la indumentaria respectiva, ya sea guantes y mascarilla. Este problema no se da cuando la vivienda ya está construida, debido a que las paredes de paja deben ser completamente revocadas a ambas caras por moteros a base de cal o arcilla (Minke & Manlke, 2006).

Fardos de Paja

Se puede definir como fardo a un bulto de forma rectangular y con dimensiones variables, que por lo general está compuesto por paja seca obtenida de la cosecha del arroz, trigo, cebada y avena, como se indica en la figura 2. Para la obtención del fardo, la paja debe ser debidamente compactada por máquinas enfardadoras industriales o máquinas que son construidas manualmente. Estas dan la forma rectangular al fardo y para mantener la misma, es amarrado mediante el uso de hilos de polipropileno que permanecen juntos por 2 o más ataduras. Los fardos con frecuencia son usados para actividades agrícolas, por lo general como lecho del ganado o alimento (Sánchez & Hernández, 2017).

Figura 2

Fardos de paja para construcción.



Nota. Recuperado de (Sánchez & Hernández, 2017).

No solo se los conoce con este nombre, sino que también se los puede llamar como paca, balas, bloque o alpaca de paja. Fácilmente estos sinónimos conllevan a pensar que se habla de un bloque de paja prensado. Las dimensiones que comúnmente se utilizan para la construcción de edificaciones son de 35 cm x 45 cm y su largo puede variar de 35 cm hasta 100 cm de longitud, su peso oscila entre 10 hasta 20 kg. Para la edificación de viviendas con fardos de paja es conveniente que estos no sean muy grandes, es decir que tengan dimensiones aceptables con el fin de obtener fardos pequeños, fácilmente trasportables y requieran pocos recursos para edificar con ellos (Sánchez, 2020).

Debido a su forma y tamaño los fardos fácilmente pueden ser utilizados como mampostería y formar parte de muros donde son colocados en hileras como se indica en la figura 3. Pueden formar paredes de hasta 50 mm de espesor cuando ya ha sido colocado el revoco. Los fardos para su uso en la construcción deben de cumplir con ciertos requerimientos, propiedades, características mínimas que deciden o no utilizarlos para estos fines, además existen varios factores que definen la calidad del fardo (Sánchez, 2020).

Figura 3

Colocación de los fardos de paja para la construcción de edificaciones.



Nota. Recuperado de (Martínez & Jové, 2019).

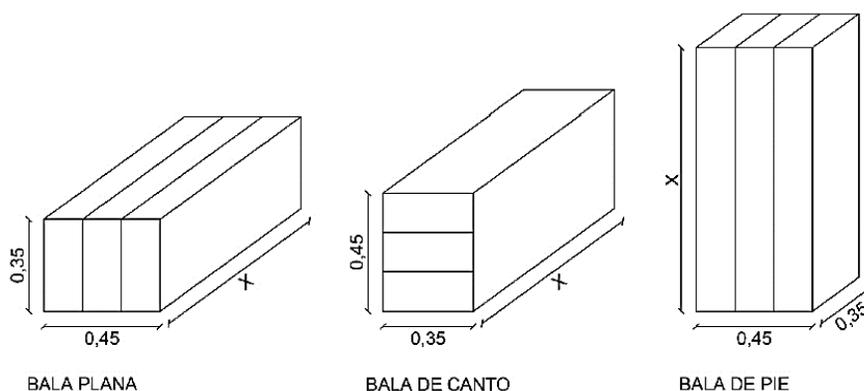
Consideraciones sobre el uso de los fardos de paja en la construcción

Los fardos de paja cuentan con propiedades mecánicas nada despreciables a comparación con las propiedades de materiales tradicionales que son utilizados en la construcción de viviendas. Sin embargo, estas pueden variar cuando los fardos forman parte de muros o paredes portantes dentro de una edificación o de estructuras con elementos de madera. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta algunos aspectos importantes que se indican a continuación:

- La posición en que los fardos son colocados ya sea en canto, de pie o plano como se indica en la figura 4. Su posición puede influir en la resistencia del muro que conforma, así como sus propiedades mecánicas, climáticas e hidrológicas (Lecompte & Le Duigou, 2017).

Figura 4

Posición de los fardos de paja en la construcción.



Nota. Recuperado de (Sánchez, 2020).

- Distribución de las cargas en los muros compuestos por los fardos de paja. Dependiendo del sistema constructivo adoptado pueden existir elementos que distribuyan uniformemente las fuerzas en el muro de paja, por ejemplo, en sistemas donde se trabaja con la madera como el CLT o módulos prefabricados. Se ha podido evidenciar que en estos sistemas las cargas estructurales son agrupadas, permitiendo una buena distribución y a su vez un aislamiento climático óptimo (Sánchez, 2020).
- El revoco juega un papel muy importante, ya que diferentes investigaciones demuestran que la resistencia a compresión del fardo puede variar dependiendo del tipo de revoco que se ha colocado como recubrimiento del mismo, es así que sus propiedades mecánicas pueden verse claramente afectadas (Maraldi, Molari, & Molari, 2015).

Propiedades mecánicas de los fardos de paja

Resistencia al fuego

Esta propiedad es una de las más importantes, debido a que la paja es considerada altamente combustible si se la utiliza tal cual como se la recoge en el campo. En su

composición cuenta con un 4% de sílice, retrasando de forma espontánea su combustión. Además, su uso para la construcción de viviendas a provocado que la paja sea enfardada, la cual es sometida a altas presiones con la finalidad de extinguir el oxígeno en su interior y obtener fardos con densidades altas (Rivero, 2021). En remotas ocasiones la paja queda expuesta a la intemperie cuando forma parte de una vivienda, por lo que en la mayoría de casos es recubierta con revocos. Todos estos factores contribuyen a que este material tenga un buen comportamiento contra incendios, hasta el punto de cumplir con las exigentes normativas que rigen en algunos países (Sadzevicius, Gurskis, & Ramukevicius, 2015).

En investigaciones realizadas en Austria se ha llegado a determinar que, en paneles compuestos por marcos de madera, fardos de paja con densidades iguales a 120 kg/m² y acabados exteriores con tierra y morteros a base de cal, la resistencia al fuego puede alcanzar los 90 minutos (Romans, Iborra, & López, 2014). Los mismos resultados son obtenidos en diferentes estudios realizados en Alemania, pero a diferencia en estos paneles se utilizó revocos con 3 cm de espesor a base de arcilla, clasificándolos como F-90 según la norma alemana DIN 4102-2. Ensayos realizados en Estados Unidos demuestran que resistencia al fuego puede alcanzar hasta 120 minutos aplicando revocos con un mayor espesor (Acevedo & Carrillo, 2016).

Aislante térmico

Esta propiedad al igual que las otras, depende de diferentes variables que permiten concluir si este material es mejor o peor aislante que los utilizados tradicionalmente en la construcción de viviendas. La densidad del fardo y el contenido de humedad son propiedades que pueden hacer de este material un excelente aislante térmico o lo contrario restarle su capacidad aislante. El aislamiento térmico de la paja depende de su conductividad y la transmitancia térmica; los revocos utilizados como recubrimiento de estos paneles pueden

aumentar su conductividad, pero depende principalmente de la transmitancia de los materiales utilizados en la elaboración del revoco (Martínez & Jové, 2019).

La experiencia de los constructores es un factor determinante en esta propiedad, ya que la posición de los tallos al enfardar la paja y al edificar con ellos puede aumentar o disminuir su conductividad. La paja cuando es colocada de forma vertical, es decir perpendicular al flujo térmico, reduce la capacidad aislante del edificio y por ende las paredes tendrán una mayor conductividad. Pero si es colocada horizontalmente es decir paralela al flujo térmico se logra un mayor rendimiento, debido al paso de calor por los conductos tubulares (Mardones, Jofré, & Hernandez, 2018).

Conductividad Térmica (λ)

La conductividad térmica es la propiedad de los materiales que mide su capacidad de conducción, se lo identifica con la letra λ . Se puede decir que entre los materiales menos conductivos está el poliuretano con 0.026 W/mk, mientras que la paja ofrece un valor de 0.04 W/mk, a diferencia de materiales con buena conductividad como el cobre con un valor de 389 W/mk. Cuando el valor de la conductividad térmica es muy pequeño se puede decir que el material es un buen aislante térmico (Rivero, 2021).

Transmitancia Térmica (U)

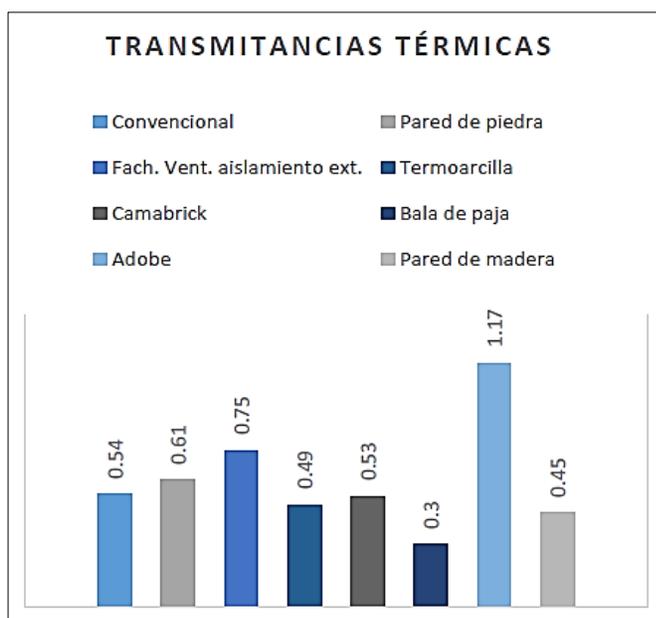
La transmitancia térmica es la propiedad que mide la circulación de calor ante el paso de energía térmica por unidad de tiempo y superficie, se la identifica con la letra U . Mientras más pequeño sea el valor de la transmitancia térmica mejor será el comportamiento térmico del material. Diferentes investigaciones han logrado determinar que el valor de transmitancia térmica del panel a base de paja, recubrimientos de cal y marcos de madera está entre 0.10 W/m²K a 0.12 W/m²K, hay que tomar en consideración que para determinar este valor se debe sumar las resistencias superficiales térmicas de todos los materiales que componen el muro,

por ejemplo, las capas de los revocos exteriores e interiores e incluir el valor de la transmitancia térmica de la paja (Ponce, Sarabia, & García, 2017).

En la figura 5, se puede observar valores de transmitancia térmicas de diferentes materiales utilizados en la construcción, cabe señalar el fardo de paja sin emplearse conjuntamente con otros materiales como la madera y morteros tiene un valor de transmitancia térmica de 0.30 W/m²K.

Figura 5

Valores de transmitancia térmicas para materiales de construcción.



Nota. Recuperado de (Martínez & Jové, 2019)

A continuación, en la tabla 2, se puede observar los valores de U, para diferentes sistemas constructivos tradicionales. Pudiéndose concluir que los muros construidos con paja ofrecen un aislamiento térmico excelente, además no es necesario que el muro sea demasiado grueso para cumplir con los valores mínimos de transmitancia térmica establecidos en las normas de cada país.

Tabla 2

Valores de transmitancias térmicas para diferentes sistemas constructivos

Materiales	Valor U (W/m²K)
105mm ladrillo, 75mm fibra mineral, 100mm bloques ligeros de cemento, 13mm enfoscado	0.33
100mm bloques hormigón pesado, 75mm fibra mineral, 100mm bloques hormigón ligero, 13mm enfoscado	0.40
100mm bloques hormigón ligero, 75mm fibra mineral, 100mm bloques hormigón ligero, 13mm enfoscado	0.29
13mm enfoscado, 450mm paja, 13mm enfoscado	0.13
50mm arcilla, 400mm paja, 50mm arcilla (Golański, 2015)	0.12-0.14

Nota. Recuperado de (Rivero, 2021)

Aislamiento acústico

Es la propiedad que mide la penetración del sonido exterior a través de obstáculos (muros, paredes, techos etc.), hacia la parte de adentro de una edificación o viceversa. Un material ofrece un buen aislamiento acústico cuando reduce el sonido producido por agentes externos como el ruido aéreo, mediante la disipación de energía y la absorción de un gran porcentaje de la onda incidente. En muros contruidos con fardos de paja, se ha podido demostrar que los mismos ofrecen una excelente absorción acústica, impidiendo el ingreso del ruido de un lado al otro del muro o en las paredes divisorias de la edificación. Además, con esto se lograr que se minimice el sonido envolvente interno, atenuando de esta manera los inoportunos ecos.

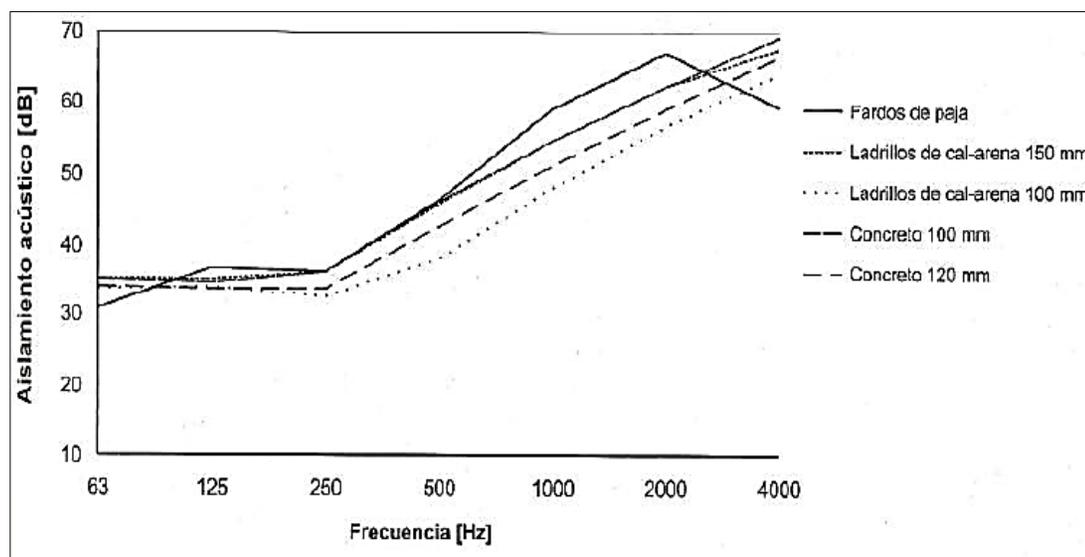
Un buen aislamiento acústico en este tipo de edificaciones depende de la densidad de los fardos de paja. Mientras mayor sea su densidad mayor será su aislamiento acústico y si el panel es revocado este aumenta más (Sanchez & Hernández, 2017). Las normativas y códigos internacionales de algunos países han fijado valores mínimos para esta propiedad, por ejemplo, el CTE (Código Técnico de la Edificación) de España, señala que en espacios donde existe

paredes medianeras y dependiendo de la intensidad del ruido se puede aceptar un valor mínimo de 45 dB. En dormitorios de viviendas este puede variar entre 30 dB y 47 dB, sin embargo, en el resto de espacios que componen las viviendas se puede aceptar entre 30 dB y 42 dB (Rivero, 2021).

Ensayos realizados por FASBA en Alemania al igual que Australia, han demostrado que el aislamiento térmico puede variar entre 42 dB hasta 55 dB. Mientras que en investigaciones realizadas en Holanda sobre transmisión de sonidos en diferentes materiales y en muros de paja de 45 cm de espesor a frecuencias entre 500 y 1000 Hz como se indica en la figura 6, permiten establecer que la capacidad aislante esta entre 43 dB a 55 dB (Rivero, 2021)., llegándose a concluir que estos valores están dentro de los establecidos por la normativa española antes indicada.

Figura 6

Valores de insonorización de varios materiales.



Nota. Recuperado de (Minke & Manlke, 2006)

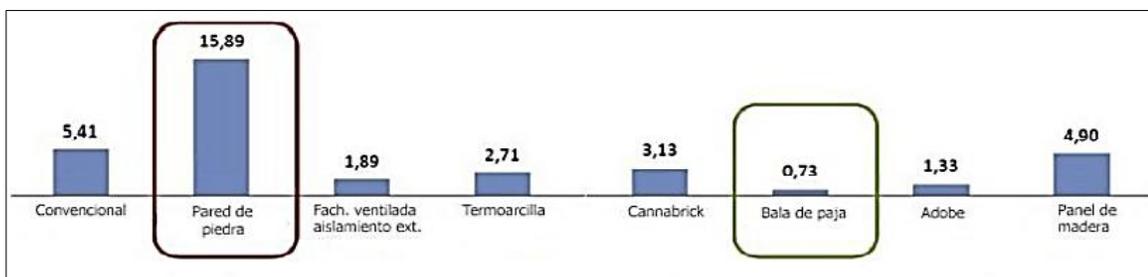
Humedad

La humedad es una de las propiedades más importante dentro de las construcciones con paja, los altos niveles de humedad pueden causar la pudrición de la misma. En paneles con fardos de paja se puede presentar humedad por capilaridad, por condensación, por salpicadura y accidental. El Código Residencial Internacional 2018, en el que se basa esta investigación, señala que los fardos de paja no deben de exceder el contenido de humedad del 20%, además para su medición se deberá emplear un equipo adecuado diseñado que deberá contar con su respectiva sonda a fin de poder llegar al centro del mismo. Los fardos en la construcción deberán de estar completamente secos, pero no solo su humedad natural puede afectar a estas edificaciones sino también agentes externos como la lluvia (Código Residencial Internacional , 2018).

La paja es un material transpirable que puede evitar la condensación, este material debe ser empleado conjuntamente con morteros a base de cal o arcilla con el fin de mantener ese carácter transpirable y que además estos en su composición cuentan con componentes que contratan a posibles ácaros (Sánchez, 2020). No es aconsejable utilizar materiales poco transpirables como el acero, concreto debido a que estos pueden absorber la humedad ambiental del muro o pared divisoria, contribuyendo de esta manera al deterioro anticipado de las edificaciones. En la figura 7 se muestra diferentes materiales utilizados comúnmente en las construcciones con sus valores de transpirabilidad, donde se puede observar que la paja tiene un valor de 0.72.

Figura 7

Valores de transpirabilidad de varios materiales.



Nota. Recuperado de (Romans, Iborra, & López, 2014)

Densidad

La densidad es una propiedad fundamental que debe ser evaluada en cada fardo de paja, este valor determina si el fardo puede o no ser utilizado en la construcción de viviendas. Como se ha visto anteriormente en casi todas las propiedades el valor de la densidad juega muy papel importante como en la resistencia al fuego, humedad, aislamiento acústico, aislamiento térmico. La paja ofrece buenas propiedades al ser sometida a altas presiones al momento de comprimirla para poder enfardarla. Además, es importante tomar en cuenta que los hilos que rodean al fardo y que sostienen la paja deben estar muy bien tensados, con la finalidad de evitar que se desarme al momento de manipularlo o agitarlo. Es importante que antes de realizar el proceso de enfardado se verifique la longitud del tallo de la paja y la presencia de materia orgánica vegetal como también de cereales que no han sido cosechados y que a largo plazo podría atraer la presencia de roedores.

El (Código Residencial Internacional , 2018) establece que el valor para la densidad de los fardos no debe ser menor a 104 kg/m^3 , para que los mismos puedan ofrecer propiedades adecuadas en las edificaciones. Existen máquinas enfardadoras que pueden elaborar fardos con densidades que varían entre 80 kg/m^3 hasta 130 kg/m^3 , sin embargo, aquellos que presentan densidades menores a los 80 kg/m^3 no son considerados aptos para construir.

Investigaciones como las realizadas por (Minke & Manlke, 2006) sugieren que su densidad no debe ser inferior a 90 kg/m^3 al igual que la realizada por (Sánchez, 2020), donde se señala que aquellos fardos que cuentan con densidades entre 110 kg/m^3 y 130 kg/m^3 presenta condiciones ideales respecto a la conductividad térmica que se pueda obtener, además sugiere que no se utilice fardos con densidades inferiores a 90 kg/m^3 para estos fines. En investigaciones realizadas en Italia se logra obtener fardos con densidades entre 80 kg/m^3 y 85 kg/m^3 , donde los valores de las propiedades de los mismo son aceptables y similares a otros estudios (D'Alessandro, Bianchi, Baldinelli, Rotili, & Schiavoni, 2017).

Tipos de máquinas enfardadoras

Las máquinas enfardadoras pueden dividirse en mecánicas y manuales, las primeras o también conocidas como empaquetadoras, son utilizadas en primera instancia para recoger la paja seca del terreno producto de la cosecha de cereales, como el arroz, trigo, avena y cebada. Esta es comprimida en fardos y atada automáticamente con hilos, con la finalidad de conservar su forma y finalmente poder utilizarla (Mardones, Jofré, & Hernandez, 2018). Las enfardadoras mecánicas permiten la obtención de fardos redondos, rectangulares y primaticos grandes, como se indica en la figura 8. Según la forma del enfardado dado, estos pueden presentar diferentes densidades como usos.

Figura 8

Formas de enfardado.



Nota. Recuperado de (Salas, Seclen, & Alvarado, 2020)

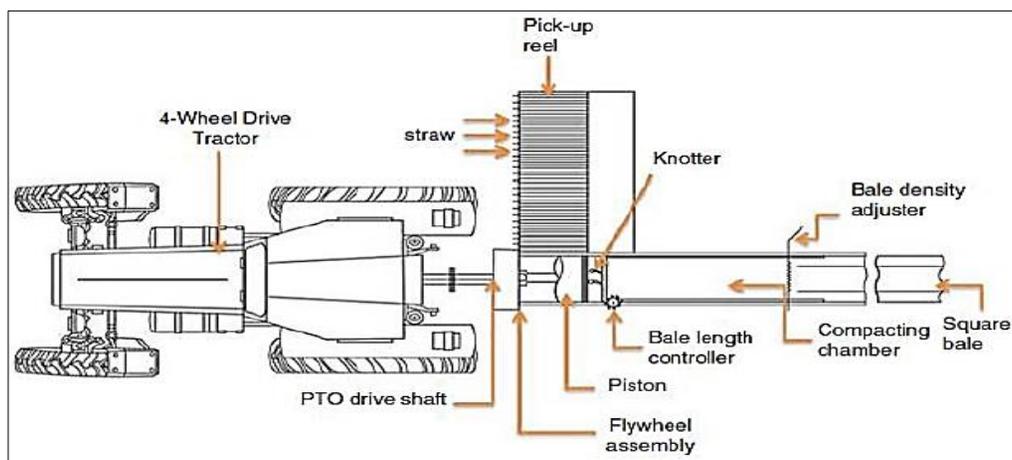
Las máquinas enfardadoras manuales a diferencia de las anteriores, requieren de esfuerzo físico humano para poder funcionar. Estas son construidas artesanalmente y se componen de un sistema de compresión, que en algunos casos pueden ser palancas y placas de acero. La paja es introducida por una compuerta y comprimida mediante el sistema de compresión, posteriormente se realiza la colocación de los hilos y nudos de forma manual, al igual que la extracción de fardo por la compuerta de salida.

Enfardadora mecánica para fardos rectangulares

Esta máquina enfardadora es una de las más eficientes debido a su rápido enfardado, cuentan con eje de unión cardánica (1), además para el proceso de enfardado la paja es comprimida mediante un pistón de compactación (8) como se indica en la figura 9. Actualmente existen dos modelos, la primera que por gran tamaño y peso debe ser colocada en un solo lugar. Esto ocasiona que cuando se ha cosechado los cereales la paja deberá ser recolectada y tendida en un lugar seguro, debido a posibles afectaciones por el clima, posteriormente una vez seca deberá ser llevada a la máquina para su enfardado, es conocida como semi automática (Salas, Seclen, & Alvarado, 2020).

Figura 9

Enfardadora mecánica fija para fardos rectangulares

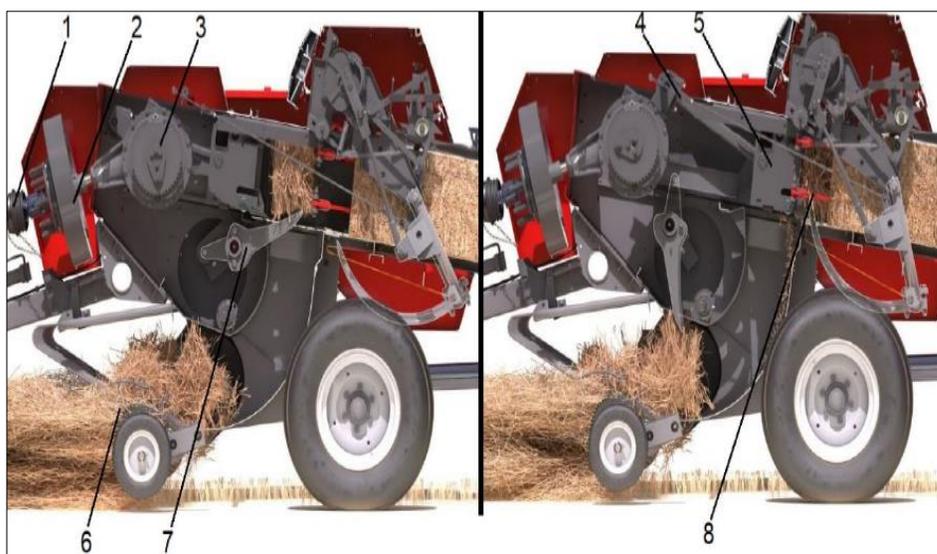


Nota. Recuperado de (Duque, Casanova, & García, 2021)

La segunda presenta mayor eficiencia que la anterior, ya que la paja puede enfardarse directamente en el terreno en condiciones adecuadas. Es preferible que durante la cosecha del cereal la paja se vaya reubicando en una sola dirección. Uno de las ventajas más importantes es que esta máquina ya cuenta con un carrete de recolección de residuos, además de un sistema de embrague que la protege de posibles sobre cargas, sistema de control de longitud de tallos, densidades de los fardos y sistema de amarre mediante el uso de una ajuga. Este tipo de enfardadora que se muestra en la figura 10 y se la conoce como automática, cuenta con una característica importante, se acopla fácilmente al PTO de un tractor obteniéndose de esta manera una mayor potencia (Salas, Seclen, & Alvarado, 2020).

Figura 10

Enfardadora mecánica móvil para fardos rectangulares.



Nota. Recuperado de (Duque, Casanova, & García, 2021)

Enfardadora manual de prensa vertical para fardos rectangulares

Este tipo de enfardadora es operada manualmente, su principal característica es que cuenta con un sistema hidráulico de compresión vertical al igual que toda su estructura como se puede ver en la figura 11, además debe permanecer fija durante el proceso de enfardado debido al gran peso que posee. La paja es introducida de forma manual por la parte superior de

la máquina, posteriormente se acciona el sistema a compresión el cual es operado manualmente, en algunos casos los hilos son colocados de forma tradicional y en otros de forma automática, para finalizar el proceso de enfardado se deberá abrir las compuertas de salida que en muchos casos se encuentra en la parte inferior (Bonifacio, 2021).

Figura 11

Enfardadora manual de prensa vertical.



Nota. Recuperado de (DEISA, 2022)

Se ha verificado que los fardos obtenidos con esta máquina tienen propiedades aceptables para la construcción, además sus dimensiones pueden superar las comunes sin problema. Estas máquinas pueden ser construidas de forma manual, (Pachala & Viera, 2016), realizaron un prototipo de máquina enfardadora con presa vertical mediante un sistema a compresión utilizando una gata hidráulica y placas metálicas para toda su estructura.

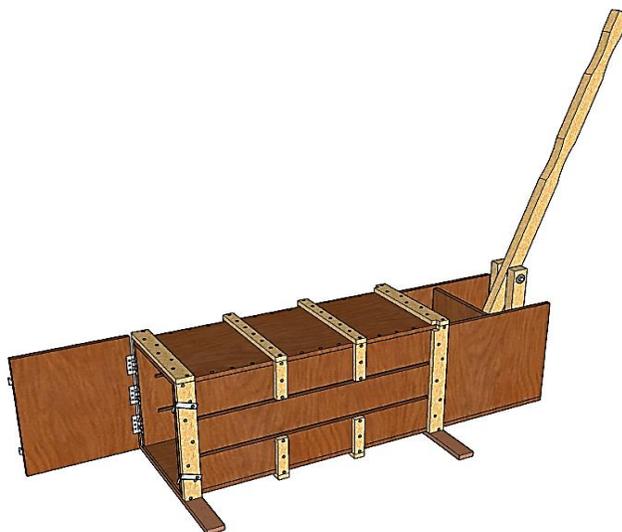
Enfardadora manual presa horizontal de madera

Esta máquina es construida de forma manual con un 90% de madera, se caracteriza por ser colocada fija en el piso de manera horizontal durante el proceso de enfardado como se

indica en la figura 12. Cuenta con un sistema de compresión compuesto por una palanca principal y dos secundarias, que empujan una placa de madera que comprime la paja y le da forma rectangular (Pachala & Viera, 2016). Este sistema es ensamblado en la tapa inferior del cajón mediante pernos y placas de acero, su funcionamiento es sencillo y requiera de máximo dos personas para operarla. Debe ser lubricada con aceite en las partes donde se produce fricción en los elementos de madera, estudios demuestran que calidad de los fardos obtenidos con esta máquina de buena calidad (Bonifacio, 2021).

Figura 12

Enfardadora manual de prensa horizontal de madera.

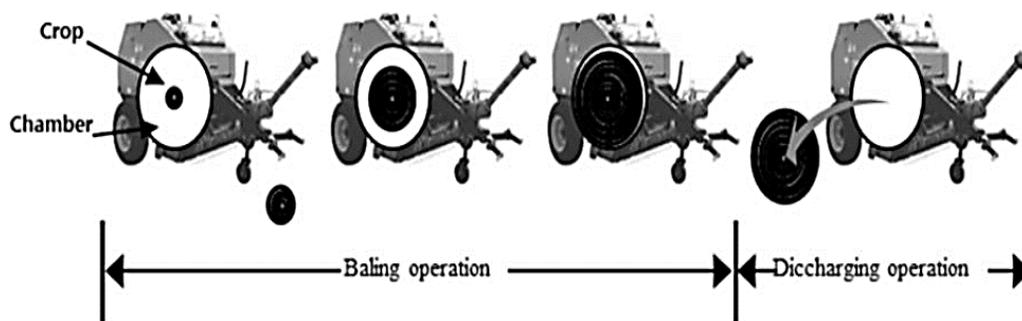


Enfardadoras mecánicas para fardos cilíndricos

Esta enfardadora a diferencia de las anteriores permite la obtención de fardos grandes con forma cilíndrica que tienen un peso entre 200 kg hasta 750 kg. La paja es recolectada en el campo y almacenada en un lugar específico de la propia máquina hasta completar su capacidad como se indica en la figura 13, posteriormente un sistema de rodillos y bandas elásticas comprime la paja hasta obtener un cilindro. Finalmente, este es atado mediante cintas poliméricas o en algunas ocasiones con fibras naturales y es liberado en el campo (Duque, Casanova, & García, 2021).

Figura 13

Enfardadora mecánica para fardos cilíndricos.



Nota. Recuperado de (Duque, Casanova, & García, 2021)

Sistemas constructivos con fardos de paja

Para las construcciones con paja es importante tomar en cuenta el sistema constructivo a utilizarse, este depende en muchos casos de las condiciones del lugar donde se desea construir, altura de las edificaciones, además de las propiedades y características de los fardos. La selección del fardo respecto a su tamaño y forma previo a la edificación de viviendas es un factor importante, aquellos que tienen forma de prisma rectangular son los más recomendados para estos fines, de estos existen dos tipos los que cuentan con 2 y 3 hilos (Romans, Iborra, & López, 2014). Los primeros tienen menores dimensiones respecto a su largo, ancho y altura, a diferencia de los otros que son mucho más grandes y por ende requieren de una cuerda adicional para sujetar la paja.

La densidad del fardo juega un papel esencial al momento de conformar un muro de carga, como se había señalado en los apartados anteriores es recomendable que la densidad del fardo no sea menor a 80 kg/m^3 . Por este motivo mientras mayor sea la densidad del fardo menor será el pretensado requerido en el muro antes de someterlo a las cargas que este debe soportar, dentro de los sistemas constructivos con paja que se va a tratar más adelante, no solo se tiene aquellos con capacidad portante sino también otros que funcionan solamente como cerramiento (Sánchez, 2020).

Sistema Nebraska o portante

El nombre de este sistema es atribuido al lugar donde surge por primera vez en Nebraska (EEUU), se caracteriza por no poseer ningún tipo de marco estructural para soportar las cargas del tejado o cubierta, pero en lugar de este es colocado un elemento perimetral de madera que bordea la cubierta y que es fijado mediante alambre, listones o cuerdas a los fardos, con la finalidad de transmitir y distribuir por igual las cargas a cada uno de estos elementos. Para la construcción de un muro de paja se deberá de considerar el proceso constructivo de un muro de carga tradicional, es decir primero deberá realizarse la cimentación que es construida a modo de zapata corrida o aislada, ya sea con piedra u hormigón. Debido a que el peso propio de los fardos es relativamente bajo y que además las construcciones con paja alcanzan alturas máximas de hasta 3 pisos, la cimentación se construye de forma sencilla, por lo que no se requiere mayor técnica ni tampoco mano de obra especializada para su construcción (Mardones, Jofré, & Hernandez, 2018).

Realizada la cimentación se deberá colocar un zuncho perimetral de madera el cual cumple la función de separar la humedad del piso con los fardos de paja, además es aquí donde se debe colocar estacas a cierta separación para incrustar los fardos y dar mayor estabilidad al muro como se puede ver en la figura 14. En ciertos lugares donde queden espacios entre las maderas se colocará graba seca como material de relleno y aislante (Sánchez, 2020).

Figura 14

Sistema Nebraska, colocación de zunchos perimetrales y estacas.

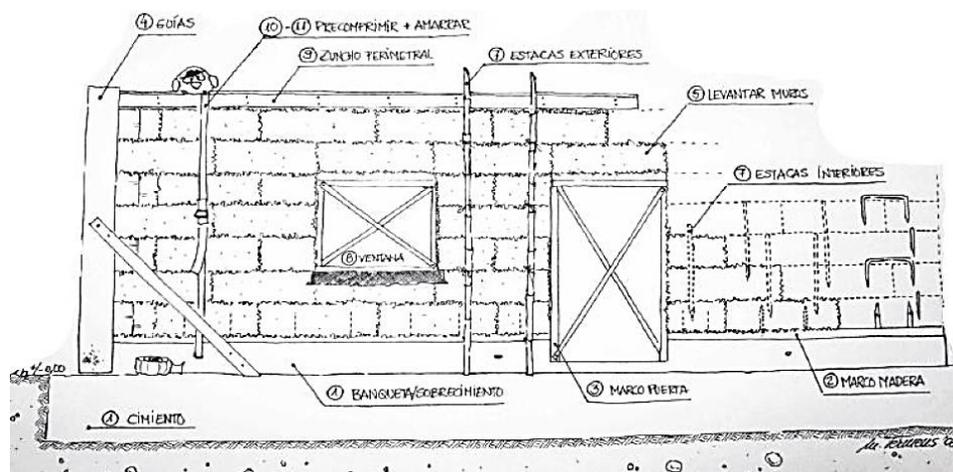


Nota. Recuperado de (Sánchez, 2020)

En las esquinas se deberá colocar arriostramientos para garantizar la rectitud del muro, es aquí donde se inicia el acomodo de los fardos de paja como también en las puertas. Para evitar que las esquinas se abran se debe colocar grapas en cada una de estas, como paso final a partir de la tercera hilada de paja se colocan dos estacas por fardo para unir los mismos, esto se puede ver en la figura 15. En ciertos casos, aunque no es indispensables se realiza el pretensado del muro, posteriormente se efectúan amarres mediante el uso de alambre con la finalidad de unir todos los elementos, además se coloca el zuncho de madera superior para la colocación de la cubierta (Martínez & Jové, 2019). Una de las ventajas que ofrece este sistema es su versatilidad en la edificación de viviendas, además de su fácil montaje y rapidez para construir las.

Figura 15

Esquema representativo sobre el sistema Nebraska



Nota. Recuperado de (Sánchez, 2020)

Sistema CUT o CST.

Este sistema es una extensión del sistema constructivo Nebraska, la diferencia se da principalmente que este aparte de los fardos de paja requiere de un entramado o estructura de madera para poder resistir las cargas, como se indica en la figura 16. Una de las principales ventajas que ofrece el sistema es poder construir primero la cubierta antes que los muros, lo cual es beneficioso ya que sirve como almacenamiento y protección de los fardos durante la construcción de los mismos, además no necesariamente el entramado de madera como su cubierta deben ser construidos in situ, sino estos pueden ser también prefabricados (Sanchez & Hernández, 2017).

Figura 16

Construcción de vivienda utilizando el sistema CUT o CST.



Nota. Recuperado de (Sánchez, 2020)

Hay que tomar en cuenta que es necesario construir las paredes y muros unos 15 cm más grandes en altura que las dimensiones originales, ya que al colocar la estructura de coronación estos tienden a precomprimirse. Los fardos de paja en este tipo de edificaciones se utilizan como cerramiento, aislante térmico, elemento de arriostamiento y portante. En las aperturas de las puertas y ventanas se presenta una mayor estabilidad a comparación del estilo Nebraska lo que hace que este tipo de viviendas sean más duraderas, pero debido a que el proceso constructivo presenta mayor complejidad se requiere de mano de obra especializada (Sanchez & Hernández, 2017).

Sistema de postes y vigas

Este sistema se caracteriza por tener una estructura de madera, acero u hormigón que cumplen la función de soportar las cargas existentes en la edificación, ya sea las producidas por la cubierta o el peso propio de los fardos, es decir que a diferencia de los otros sistemas la paja no trabaja como elemento portante, sino únicamente como aislante térmico o material de relleno perdiendo su función estructural. Usualmente este sistema es utilizado para construir edificaciones donde se tiene aberturas con dimensiones muy grandes o espacios amplios,

además este requiere de un mayor uso de madera y por ende mayores costos de construcción (Martínez & Jové, 2019).

Es necesario que los fardos de paja se encuentren conectados con los elementos estructurales que conforman la estructura, es decir postes y vigas como se observa en la figura 17, para que estos puedan soportar las cargas horizontales como por ejemplo las producidas por el viento. Para la estructura en la mayoría de los casos se utiliza la madera como material principal, esta puede realizarse in situ o fabricarse en un taller para posteriormente ser montada en obra, su presencia permite al constructor realizar aberturas o huecos necesarios conforme el propietario lo requiera, además este sistema reduce los espacios utilizados durante el proceso constructivo que es un verdadero problema en los otros sistemas (Cascone, Rapisarda, & Cascone, 2019).

Figura 17

Construcción de vivienda utilizando el sistema postes y vigas.



Nota. Recuperado de (Rivero, 2021)

Sistema GREB

Las edificaciones donde se ha utilizado esta técnica se caracterizan por contener una estructura de madera, conformada por listones que se ubicaban a una cierta distancia a

manera de pasillo en cada uno de los muros o paredes, cuyo espesor es igual al de los fardos de paja utilizados. Es aquí donde debe ser colocada la paja, la misma que para este sistema trabaja únicamente como cerramiento o material de relleno y que cumple funciones de aislamiento térmico mas no portantes o de arriostamiento, es decir la estructura de madera es la que soporta el peso de la cubierta y el de los fardos (Barbero, 2021).

Una vez que se ha colado la primera fila de fardos, en la parte inferior se coloca un encofrado de madera perimetralmente que se atornilla a la estructura existente, posteriormente se realiza el vertido de un mortero que generalmente está compuesto por aserrín, arena, cal o cemento (Barbero, 2021). Mientras se cura el mortero se procede a colocar la siguiente fila de paja, se retiran los encofrados de la parte inferior y el proceso es repetitivo como se puede observar en la figura 18.

Figura 18

Proceso constructivo de viviendas aplicado la técnica GREB.



Nota. Recuperado de (Romans, Iborra, & López, 2014)

Sistema WRAPPING

El sistema constructivo Wrapping no es un sistema como tal, sino es una metodología para rehabilitación de edificaciones existentes, que han sido construidas mediante cualquiera de las técnicas anteriormente descritas. El Wrapping se aplica en edificaciones donde se

requiere mejorar su eficiencia energética como por ejemplo el aislamiento térmico, lo que conllevaría a una reducción de gastos por calefacción. Esta técnica consiste en la colocación de paja que es atada en los muros existentes a manera de envoltura por su parte exterior, si bien es cierto estos después de ser rehabilitados aumentan su espesor, los costos de rehabilitación son bajos a comparación con otros (Barbero, 2021).

Las edificaciones que han sido rehabilitadas en la mayoría de casos requieren la ampliación de cubiertas, marcos de puertas y ventanas, además se deberá considerar la construcción de una nueva cimentación que es conectada a la existente, donde se apoya la nueva paja. Como protección ante la lluvia y otros posibles factores a estas edificaciones se colocan subestructuras de madera, formando un elemento similar a un sándwich donde la paja queda entre el muro existente y este elemento. En ciertos casos también se puede optar por realizar el recubrimiento mediante la aplicación de un mortero como se describió en las técnicas anteriores (Martínez & Jové, 2019). A continuación, en la figura 19 se observa la metodología utilizada para la aplicación del sistema Wrapping en las edificaciones.

Figura 19

Aplicación del sistema Wrapping



Nota. Recuperado de (Barbero, 2021)

Sistema con prefabricados modulares

Como se ha visto anteriormente existe un amplio abanico de posibilidades en la construcción con paja, sin embargo, el sistema con prefabricados modulares es uno de los más actuales permitiendo llevar a las construcciones con paja a otro nivel (Rivero, 2021). Para realizar estos prefabricados como punto de partida es obtener la paja preferiblemente enfardada y cerca del lugar donde se va a construir, en el caso de que se la consiga suelta se puede construir una máquina enfardadora manual que permita la obtención de los fardos (Sanchez & Hernández, 2017), como se observa en la figura 20.

Figura 20

Máquina enfardadora manual para fardos de paja.



Posteriormente se realizan los marcos de madera dependiendo de la configuración de la vivienda a construir mediante el uso de taladro, cierra, martillo y tornillos como se indica en la figura 21, es importante saber el tipo de madera con la que se va a trabajar, debido a que los módulos cumplen con una función estructural (Sánchez & Hernández, 2017).

Figura 21

Construcción marcos de madera.



Nota. Recuperado de (Sánchez & Hernández, 2017)

En un taller o in situ se realiza el montaje del panel, este procedimiento consiste en introducir los fardos de paja preferiblemente enteros para conservar sus propiedades y confinarla con los marcos de madera como se puede ver en la figura 22, en ocasiones es conveniente desatar el fardo y colocar la paja suelta para rellenar espacios (Sanchez & Hernández, 2017).

Figura 22

Colocación de fardos en los módulos de madera.



Nota. Recuperado de (Sánchez & Hernández, 2017)

La paja que sale lateralmente del panel debe ser afeitada o cortada para lograr una superficie uniforme, finalmente en sus caras laterales se coloca el revoco a base de cal o arcilla, este procedimiento se lo puede realizar de forma independiente para cada panel después de su montaje o cuando estos ya han sido ubicados en obra para formar las paredes.

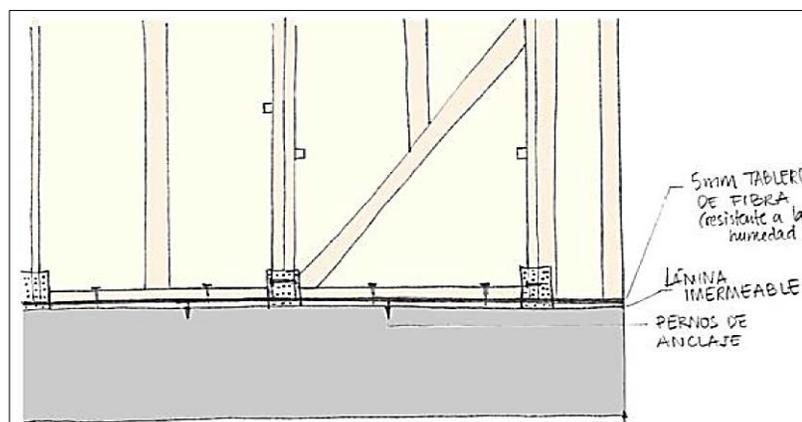
En varios países como España, Francia y Alemania, estos paneles son fabricados industrialmente bajo estrictos controles de calidad, tanto para la paja como también de la madera. Las dimensiones de los módulos pueden variar dependiendo de la configuración o las necesidades estructurales de la edificación, pudiéndose de esta manera tener una gran variedad respecto a su forma y tamaño (Sánchez & Hernández, 2017). En edificaciones que han sido construidas con estos paneles se puede evidenciar que los mismos ofrecen mayor aislamiento térmico y buen comportamiento hidrotérmico y acústico frente a los sistemas constructivos convencionales.

El sistema de fardos de paja con estructura de madera portante permite la construcción de edificaciones con mayor rapidez y montaje, además obtener mejores acabados, debido a la regularidad y uniformidad que se da a los módulos durante su fabricación. Empresas como Modcell (Gran Bretaña), Ecococon (España), Ecopaja (España) o Bala Box (España) fabrican este tipo de prefabricados, produciéndolos con diferentes características, lo que genera que la mano de obra requerida sea especializada (Sanchez & Hernández, 2017).

El proceso constructivo con este sistema es parecido a los anteriores, se construyen generalmente losas de hormigón armado como cimentación, sobre esta puede colocarse sobrecimientos y capas impermeables para evitar la humedad (Sanchez & Hernández, 2017). En el zuncho perimetral de hormigón armado y en la cimentación son atornillados los paneles mediante pernos como se indica en la figura 23.

Figura 23

Detalle de uniones entre los paneles prefabricados y la cimentación.

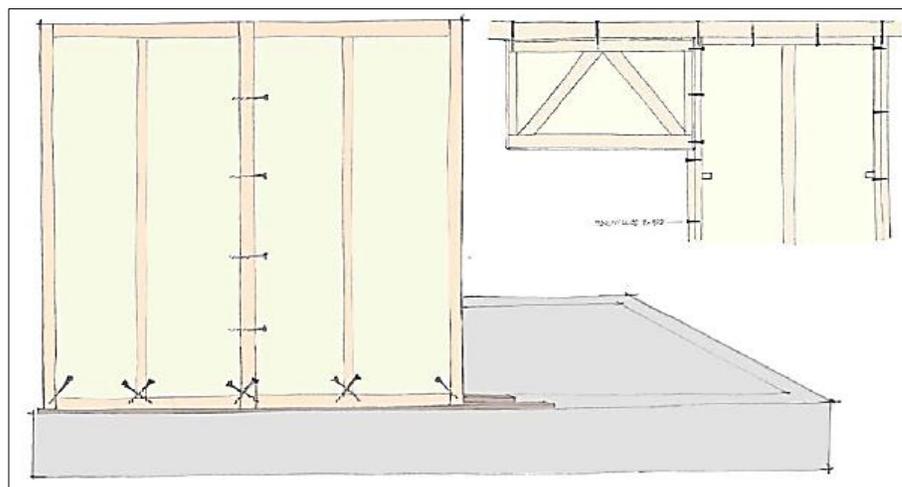


Nota. Recuperado de (Sánchez & Hernández, 2017)

Además, entre paneles son unidos unos a otros mediante tornillos colocados desde la parte inferior hacia arriba como se puede observar en la figura 24, a fin de evitar que entre estos exista espacios.

Figura 24

Detalle de uniones entre paneles prefabricados para conformar la pared.



Nota. Recuperado de (Sánchez & Hernández, 2017)

Para mayor facilidad los prefabricados deben ser enumerados o pintados de diferentes colores para ubicarlos a manera de rompecabezas en la edificación, esto se lo realiza con ayuda de una grúa cuando las edificaciones poseen grandes alturas como se observa en la figura 24, posteriormente se procede a construir la cubierta realizando el montaje de las vigas, en la parte inferior o abajo de estas de ser colocada una capa impermeable para contrarrestar los efectos de humedad, finalmente se realizan los respectivos acabados (Romans, Iborra, & López, 2014).

Figura 25

Traslado y movimiento de paneles prefabricados para conformar las paredes.



Nota. Recuperado de (Sánchez & Hernández, 2017)

La madera

La madera durante mucho tiempo ha sido utilizada para la construcción de estructuras en las edificaciones ya que se la puede encontrar de forma directa en nuestro entorno, su uso ha aumentado en los últimos años y depende principalmente de las características que esta puede ofrecer como también del lugar donde se la produce. Por ejemplo, el uso de la madera en España es bastante limitado debido a que actualmente su producción está localizada en ciertos lugares de la parte norte del país (Romans, Iborra, & López, 2014), no solo este factor influye por lo que se ha podido evidenciar que no existe una cultura que esté relacionada con el trabajo de la madera en el campo estructural (Aparicio & Acosta, 2022).

Actualmente en nuestro país según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura señala que el 40% del territorio nacional corresponde a bosques naturales, la mayoría se encuentra en la Amazonía, mientras que el 1% corresponde a plantaciones forestales. En el 2019 en Ecuador se tuvo 180 000 ha de plantaciones forestales que aproximadamente equivale a 180 millones árboles plantados, donde el 65% de estas plantaciones se encuentran en Cotopaxi, Guayas, Los Ríos, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas, cerca de 160 000 ha han sido cultivadas con pino, teca, eucalipto, melina y balsa. Según el consumo mundial se puede decir que el mercado nacional de madera es pequeño, esto se debe principalmente a la cultura en el uso de este recurso y crisis económica en los últimos años (Anchundia, 2022).

En el 2019 según el sistema SAIKU del Servicio de Rentas Internas – SRI, en el sector maderero se produjo 9.2 millones de dólares, cabe señalar que el 98.8 % se generó a partir de ventas locales específicamente a las provincias de Pichincha, Los Ríos y Cotopaxi. A continuación, en la figura 26, se indica los valores de las ventas locales generados en el Ecuador durante los años 2006 hasta el 2019.

Figura 26

Valores generados a partir de la venta local de silvicultura y extracción de la madera en Ecuador 2006-2019.



Nota. Recuperado de: SRI, SAIKU declaraciones 101, 2019

Referente a los datos de exportaciones totales, según el Banco Central del Ecuador, el país alcanzó en el 2019 un valor de \$ 22 329.4 millones de dólares, en gran parte y con un 80.5 % corresponde a exportaciones realizadas hacia América y Asia. Referente al sector maderero el país exportó \$ 304,1 millones de dólares en ese mismo año, esto equivale a 637 000 toneladas métricas de madera que representa el 1.4 % del valor total de exportaciones (Sánchez A. , Vayas, Mayorga, & Freire, 2022). En la figura 27 se resumen los datos correspondientes a las exportaciones totales no tradicionales y de madera en Ecuador.

Figura 27

Valores de exportaciones totales, no tradicionales y de madera. Ecuador 2006-2019.



Nota. Recuperado de: BCE, Información Estadística Mensual, 2019

La madera en la construcción

La madera como material de construcción puede ofrecer varios beneficios, como por ejemplo sociales, funcionales, ambientales y económicos, que hacen de este material uno de los más idóneos para utilizarlo conjuntamente con la paja. La construcción con el pasar de los años tiene nuevos desafíos, debido a que se prevé un aumento en la población mundial proyectada a 1 200 millones de personas hasta el 2050 y por ende un aumento en la contaminación ambiental, donde el desafío principal se concentra en construir edificaciones con materiales que ofrezcan un bajo impacto ambiental (Hernández & Elgueta, 2020). A

continuación, se puede describir algunas ventajas que ofrece la madera como material de construcción:

- Los árboles contribuyen a la mitigación del efecto invernadero, durante su crecimiento estos absorben el CO₂ y producen O₂. Un árbol por cada metro cubico de crecimiento puede absorber cerca de una tonelada de dióxido de carbono y producir 0.7 toneladas de oxígeno mediante el proceso de fotosíntesis (Ortega & Benedetti , 2021).
- La madera es un sumidero de carbono, es decir en la construcción genera un balance de carbono negativo, debido a que el CO₂ almacenado en los árboles es mayor a comparación del CO₂ producido por las emisiones durante el procesamiento, trasporte y cosecha de la misma (Schueftan, Aguilera, Aravena, Benedetti, & Gallardo, 2021).
- La madera es considerada como un material renovable ya que los árboles pueden seguirse plantando antes, durante y después de extraer su materia prima, además a través del proceso de industrialización este material se convierte en esencial para el uso en viviendas no solo como parte de una estructura sino también como parte de puertas, molduras, marcos y tableros (Aparicio & Acosta, 2022).
- Es considerado un material reciclable ya que después de haber cumplido con su función y vida útil se lo puede volver a utilizar para formar parte de otros productos o para uso combustible (Schueftan, Aguilera, Aravena, Benedetti, & Gallardo, 2021).

Propiedades de la madera como material de construcción

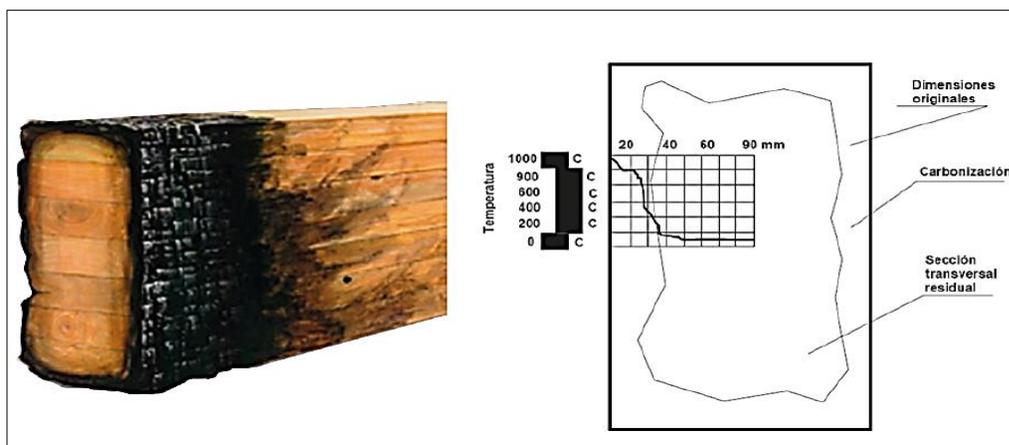
- **Aislamiento térmico:** La madera debido a su estructura celular puede ofrecer un excelente aislamiento térmico comparado con los materiales tradicionales,

por ejemplo, su aislamiento es 15 veces mejor que el hormigón armado, 500 veces mejor que el acero y 2000 veces mejor que el aluminio, de esta manera se puede obtener edificaciones con menores gastos por calefacción (Hernández & Elgueta, 2020).

- **Resistencia al fuego:** La madera ofrece un buen comportamiento al fuego, por ejemplo, el acero cuando alcanza temperaturas cerca de 600 °C su capacidad estructural decae, mientras que la madera al ser sometida a temperaturas que bordean los 300 °C se inflama y superficialmente inicia el proceso de carbonizarse. La capa carbonizada genera una penetración retardada del calor y el oxígeno a las capas interiores, provocando de esta manera que la velocidad de combustión sea lenta, en la figura 28 se indica el proceso de combustión de la madera cuando es sometida a diferentes temperaturas (Hernández & Elgueta, 2020).

Figura 28

Proceso de combustión de la madera.



Nota. Recuperado de: (Hernández & Elgueta, 2020)

- **Durabilidad:** La madera al igual que otros materiales utilizados dentro de la construcción de viviendas cuenta con una vida útil, es decir no es eterna, pero

mediante tratamientos, cuidados y medidas de protección contra la humedad intemperie y ataques producidos por insectos u otros factores, el tiempo de vida útil se puede prologar por muchos años. (Hernández & Elgueta, 2020).

- **Versatilidad:** Cuenta con una excelente versatilidad a diferencia de otros materiales donde puede formar parte de arcos, cúpulas, cubiertas, permitiendo de esta manera a los arquitectos e ingenieros diseñar edificaciones con diseños difíciles de alcanzar usando los materiales tradicionales (Cruz & Portilla, 2022).
- **Comportamiento higroscópico:** La madera es un material que busca un equilibrio con respecto a la humedad del ambiente, de esta manera aumenta o disminuye su tamaño cuando absorbe agua y es expulsada hacia el exterior. Su humedad debe ser adecuada y contralada, ya que a medida que aumenta disminuye la tenacidad del material, además de generar pudrición que a largo plazo provoca la aparición de hongos (Sotomayor, 2016).
- **Resistencia:** Cuenta con aceptables propiedades en cuanto a la resistencia a flexión y tracción, por lo que se puede considerar como un material apto para su uso en las construcciones, pese a esto se debe tomar en consideración que sus propiedades ante las sollicitaciones de esfuerzos son diferentes según la dirección en la que se coloque. Por lo tanto, es importante que la madera sea ubicada con dirección paralela a sus fibras, debido a que de esta manera se obtiene una mayor resistencia ante los esfuerzos de tracción y compresión, logrando una optimización en sus propiedades (Cruz & Portilla, 2022).

Revocos en muros con paja

Los revestimientos o revocos utilizados en este tipo de muros, son elementos que cumplen varias funciones importantes, dentro de las cuales está la protección de la paja ante posibles efectos externos como la lluvia, pero su función no solamente está ligada a la protección, sino también a la contribución ante las sollicitaciones de carga conjuntamente con la

paja. Es por este motivo que el revoco es un componente fundamental, que al ser correctamente diseñado permite obtener muros con un funcionamiento óptimo y potenciado en sus cualidades (Rivero, 2021).

En ocasiones este revestimiento puede ser el mismo tanto para la parte externa e interna del muro, además se puede optar como procedimiento opcional mas no obligatorio la colocación de una malla hexagonal que es anclada mediante grapas a los fardos de paja, con la finalidad de contrarrestar el fisuramiento del revoco debido a los efectos de temperatura, además en algunas ocasiones sirve como reforzamiento de la estructura, acarreado que las viviendas de este tipo sean más consistentes (Martínez & Jové, 2019).

Un paso muy importante previo a la fabricación del revoco es la selección de los materiales que conforman el mismo, que a más de brindar una estética adecuada también debe contar con un comportamiento aceptable ante la permeabilidad al vapor de agua, es decir este debe permitir la evaporación natural de la misma, caso contrario si el revoco no cuenta con una buena permeabilidad lo que ocasionará es que la humedad que haya entrado al fardo quede contenida en el muro, de tal manera que produzca pudrición en la paja iniciando con la aparición de hongos (Walker, Thomson, & Maskell, 2020).

Revocos a base de arcilla

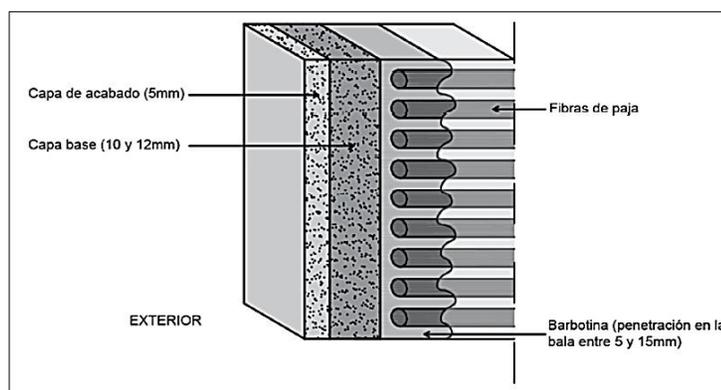
Los revocos elaborados a base de arcilla es una técnica que ya ha sido aplicada hace algún tiempo en edificaciones antiguas, se ha verificado que estos regulan la humedad y además producen un bajo impacto ambiental. Son aplicados generalmente como un revoco interno, ya que para el exterior este no debe estar a la intemperie, es decir debe ser protegido por el propio diseño de la edificación. Brinda algunos beneficios como protección mecánica, resistencia al fuego, aislamiento acústico entre otros (Gonzáles, Rodríguez, Ponce, & Morales, 2016).

La mezcla principalmente está compuesta por tierra y fibras vegetales, sus proporciones dependen de la calidad de la tierra. Para estabilización del revoco se utiliza arena que

disminuye la retracción por secado, además el uso de fibras para evitar el riesgo por fisuración (Romans, Iborra, & López, 2014). La colocación en los muros se puede ejecutar de forma manual o proyectada mecánicamente, de forma general se aplica en capas como se indica en la figura 29.

Figura 29

Revoco a base de arcilla aplicado en capas.



Nota. Recuperado de: (Sánchez, 2020)

La primera capa varía entre 5 a 15 mm, está compuesta por tierra y agua, la segunda capa varía entre 10 a 12 mm y está compuesta por arena, tierra y fibras naturales, finalmente la tercera tiene 5 mm, pero a diferencia de la segunda esta proporciona protección al revestimiento. El tiempo de secado es lento, muy lento comparándolo con aquellos elaborados con cal, puede durar hasta 3 meses en adquirir una resistencia adecuada (Sánchez, 2020).

Revocos a base de cal

A diferencia del anterior revoco este puede ser aplicado a ambas caras del muro, es decir tanto exteriormente como interiormente, uno de los materiales principales es la cal hidráulica natural, que es utilizada en la construcción como aglomerante en morteros, mejora la cohesión entre los materiales debido a su proceso de carbonatación que genera este hidróxido (Flores, Rodríguez, Romero, & Esquivas, 2019). Además, con el tiempo su proceso químico permite que las fisuras presentadas en el mortero endurecido se auto sellen (Pérez, y otros,

2022). La incorporación de la cal a las mezclas no solo mejora su trabajabilidad y plasticidad, sino que también evita el proceso de contracción durante el secado, ofrece una mayor durabilidad y permeabilidad al vapor de agua, gracias a que la cal aumenta el contacto entre partículas del agregado fino (Zhang, y otros, 2018).

Debido a la reacción que genera este material y los gases de la atmósfera durante el proceso de fraguado la cal atrapa CO_2 , provocando que los tiempos de endurecimientos sean lentos a diferencia de los aglutinantes hidráulicos (Pahlavan, Manzi, Sansonetti, & Chiara, 2018). Su aplicación igualmente puede ser realizado por capas, este revoco es mejor que el anterior debido a su durabilidad y eficiencia, además la incorporación de la cal a la mezcla permite una mayor trabajabilidad y maleabilidad, pudiéndose conseguir después de su aplicado superficies perfectas iguales a los pulidos o estucados (Sánchez, 2020).

Revocos mixtos

Los revocos mixtos son aquellos que mediante un adecuado diseño para encontrar su dosificación contiene 2 aglomerantes en su mezcla el cemento y la cal, como se observa en la figura 30. La fusión de estos materiales otorga al revoco mayor resistencia mecánica y fraguado rápido por las bondades del cemento, además de una aceptable plasticidad, capacidad de retención de agua por las bondades de la cal (Sánchez, 2020). Estos se comienzan a utilizar por la necesidad de dotar a los morteros mayor trabajabilidad y plasticidad, además el lento fraguado de la cal hace que se busque un material que acelere fraguado como el cemento, cabe indicar que el uso del cemento en este tipo de revocos debe ser cauteloso ya que su presencia reduce la permeabilidad, lo que podría producir que la humedad quede atrapada en los fardos de paja (Cascone, Rapisarda, & Cascone, 2019).

Es por este motivo que la presencia de la cal en la mezcla genera un equilibrio en cuanto a su permeabilidad, debido al sistema de microporos que la cal posee cuando se endurece, de esta manera permite el paso del vapor de agua para ayudar a la eliminación de humedades, además de brindar una buena adherencia a los morteros. La adición de cemento

permite reducir los tiempos de fraguado y adquirir resistencias adecuadas progresivamente, que solo al utilizar la cal las resistencias son aceptables pasando los 50 días de edad (Sánchez, 2020).

Figura 30

Revoco mixto con cemento y cal.



Capítulo III

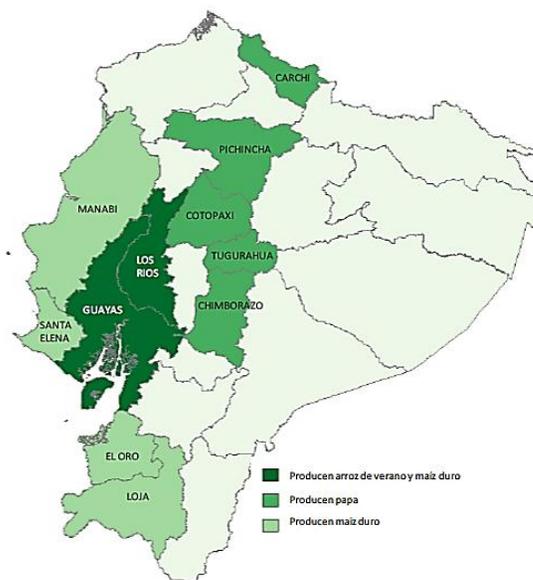
Fabricación de fardos de paja de arroz y determinación de sus propiedades físico - mecánicas

Producción de arroz en la región costera del Ecuador

El arroz es uno de los cereales más consumidos a nivel mundial, sus tallos son redondos y huecos en el centro, se da en suelos húmedos y durante su crecimiento requiere de especial cuidado, con el fin de obtener mejores rendimientos por hectárea y pueda finalizar con su ciclo productivo (Alava, Poaquiza, & Castillo, 2018). Según datos estadísticos en el 2010 el Ecuador produjo 1 132 267 toneladas de arroz, donde el 0.28 % representa la producción nacional a nivel mundial (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017). Si bien es cierto las provincias donde existe producción de arroz son Guayas, Los Ríos, Manabí, El Oro, Loja, Esmeraldas, Cañar y Bolívar, las dos primeras provincias es donde se tiene la mayor producción a nivel nacional (Banco Central del Ecuador, 2022), como se puede observar en la figura 31.

Figura 31

Mapa de cultivos de ciclo corto, arroz, maíz duro y papa.



Nota. Recuperado de: (Banco Central del Ecuador, 2022)

De acuerdo a la tabla 3, elaborada conforme los datos estadísticos presentados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería correspondiente a la producción del arroz entre el año 2020 y 2021, se puede señalar que la superficie de este cereal en la provincia del Guayas y Los Ríos fue de 128 300 ha y 35 591 ha respectivamente, obteniéndose como resultado una superficie a nivel nacional para la región costera de 163 891 ha en el año 2020. Sin embargo, para el año 2021 la superficie de arroz en la provincia del Guayas disminuyó un 1.93 % mientras que para Los Ríos se incrementó un 1,05%, es decir a nivel nacional entre el año 2020 y 2021 hubo una disminución en la producción de arroz del 0.4 %. Por lo contrario, si hablamos de rendimiento estos aumentaron a nivel nacional de 5,2 TM/ha a 6.2 TM/ha entre las provincias antes señaladas.

Tabla 3

Superficie cosechada, producción y rendimiento del arroz

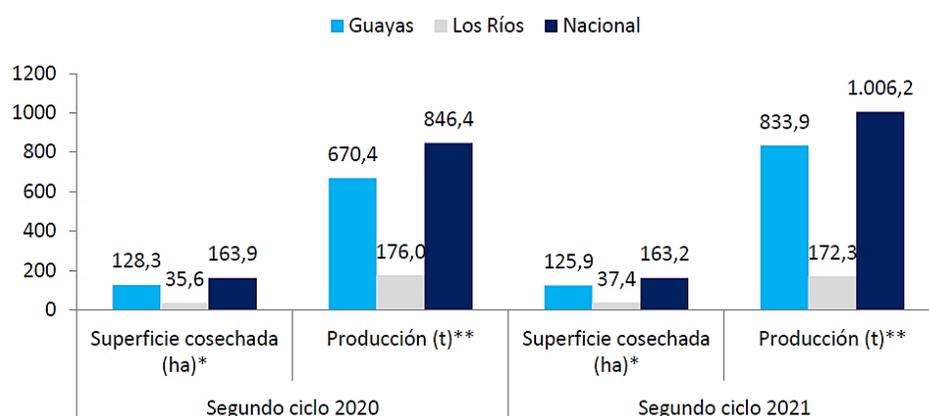
PROVINCIA	2020.IV			2021.IV		
	SUPERFICIE (ha)*	PRODUCCIÓN (TM)**	REND.NAC. (TM/ha) ***	SUPERFICIE (ha)*	PRODUCCIÓN (TM)**	REND.NAC. (TM/ha) ***
GUAYAS	128.300	670.393	5,2	125.864	833.939	6,6
LOS RÍOS	35.591	176.033	4,9	37.355	172.307	4,6
NACIONAL	163.891	846.426	5,2	163.219	1.006.246	6,2

Nota. Recuperado de (Banco Central del Ecuador, 2022)

En la figura 32, se presenta esquematización grafica mediante un diagrama de barras sobre la superficie cosechada, producción y volumen de producción del arroz de los valores indicados en la tabla 3, correspondiente a las provincias del Guayas y Los Ríos.

Figura 32

Producción de arroz provincias del Guayas y Los Ríos.



Nota. Recuperado de (Banco Central del Ecuador, 2022)

Obtención de la paja de arroz, cantón Buena Fe, provincia de Los Ríos

Debido a que la provincia de Los Ríos es una con mayor producción de arroz a nivel nacional, después de la provincia del Guayas, se procedió a buscar cultivos de arroz que ya han sido cosechados en uno de los cantones que pertenecen a esta provincia para la recolección de la paja, como es el cantón Buena Fe, además para la selección de este lugar aparte de su producción se evaluó costos de transporte de la paja hasta la ciudad de Quito donde se desarrolló la investigación, que desde cualquier cantón de la provincia del Guayas los costos de transporte son mucho más elevados.

Datos Generales

La provincia de Los Ríos cuenta actualmente con 13 cantones: Baba, Babahoyo, Buena Fe, Mocache, Montalvo, Palenque, Pueblo Viejo, Quevedo, Quinsaloma, Urdaneta, Valencia, Ventanas y Vinces. El cantón Buena Fe de donde se obtuvo la paja se encuentra en el centro - norte del país, tiene varias parroquias rurales como Patricia Pilar, San Francisco, Cuatro Mangas, La Reserva, Fumisa, 24 de Mayo, Vistazo, La Cartoche, Pechiche, Los Ángeles y Zulema. Cuenta con un suelo muy fértil que no solo ha tomado impulso en la producción agrícola sino también en la producción de ganado, la mayor parte de su producción agrícola

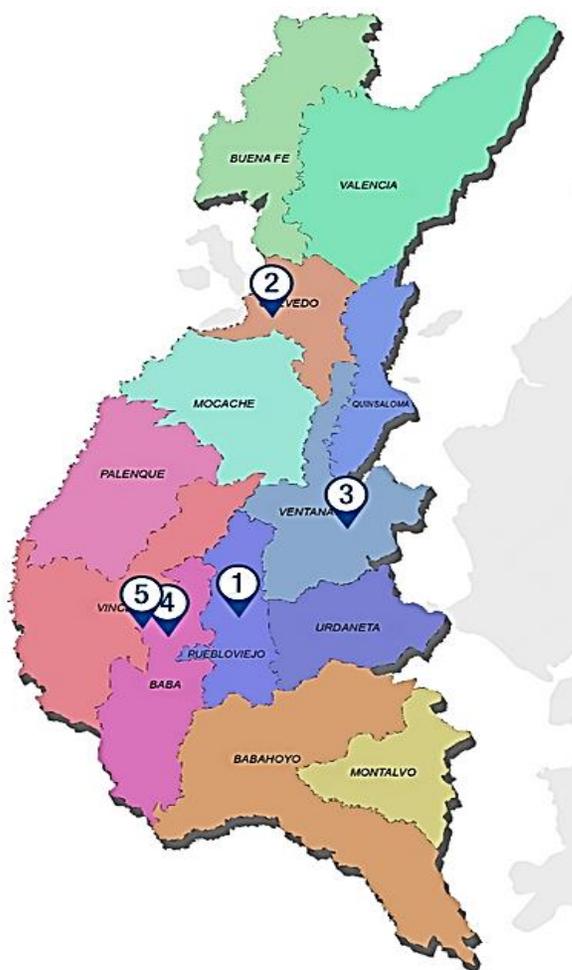
corresponde a arroz, cacao, maíz, sayo, verde, yuca, banano y frutas (Muñoz & Chipuendo, 2021).

Datos Geográficos y límites

El cantón Buena Fe según el Instituto Nacional de Estadística y Censo tiene una población de 87 588 habitantes, con una superficie de 569 Km². Su altitud es de 162 m.s.n.m, los límites geográficos del cantón están definidos de la siguiente manera: al norte Santo Domingo de los Tsáchilas, al sur Quevedo, al Oeste El Carmen y al Este el cantón Valencia como se puede ver en la figura 33, la distancia desde Quito al cantón Buena Fe es de 131 Km.

Figura 33

Mapa base provincia de los Ríos.



Nota. Recuperado de: (Consejo de la Judicatura, 2017)

Recolección de la paja de arroz

Para la obtención de la paja de arroz se visitó algunos cantones de la provincia de Los Ríos, el cantón donde se realizó la recolección de la paja es Buena Fe. Principalmente se seleccionó este lugar ya que cuando se visitó el mismo se había cosechado en un sitio específico más de 2 ha de arroz, mientras que en cantones como Santo Domingo y Quevedo se evidenció cultivos de arroz de gran magnitud, que sin embargo para ese momento aún no habían sido cosechados.

Los agricultores del sector brindaron información importante sobre la siembra y cosecha de este cereal, así también sobre el uso y disposición de la paja. A continuación, se indica la información obtenida que ha sido documentada:

- **Época de siembra y cosecha del arroz:** Para el cultivo de este cereal los agricultores lo realizan hasta en tres ciclos, uno de los más importantes es la producción en verano. Las siembras generalmente inician desde abril hasta mayo, mientras que las cosechas se realizan en los meses de agosto y septiembre donde se genera el 50 % de la producción anual. El segundo ciclo se da entre diciembre y enero con el 30 % de producción y el tercer ciclo que se siembra únicamente con riego establecido y se ejecuta en el último cuatrimestre del año con 20 % de producción, la cosecha del arroz en el cantón Buena Fe se realiza a máquina y de forma manual cuando las producciones son pequeñas.
- **La paja después de la cosecha del arroz:** Luego de la cosecha del arroz la paja es considerada un desecho agroindustrial, generalmente los agricultores la dejan en el campo hasta esperar un nuevo periodo de siembra, donde finalmente es recolectada por montones para después ser quemada en el mismo lugar, como se indica en la figura 34. En la actualidad la paja no tiene ningún uso, en pocos casos los agricultores lo utilizan como alimento del ganado sin

que este pueda aportar vitaminas y nutrientes al mismo, pero en gran mayoría es quemada.

Figura 34

La paja después de la cosecha del arroz.



Después de haber cosechado el arroz los agricultores dejaron la paja aproximadamente 1 mes al aire libre y en el mismo lugar, donde se secó de forma natural para posteriormente ser quemada. En este sitio se realizó la recolección de la paja que estaba dispersa por todo el terreno, esta acción generó una reacción positiva en los agricultores ya que necesitaban el terreno limpio a fin de realizar una nueva siembra de este cereal.

Inicialmente se procedió a juntar toda la paja en un mismo sitio para facilitar el trabajo de recolección, posteriormente se la llevó a un camión por montones para ser transportada a la ciudad de Quito, como se indica en la figura 35. La paja finalmente fue colocada sobre pallets en un lugar cubierto y ventilado para después ser enfardada, este procedimiento se realizó debido a que en nuestro medio se puede encontrar únicamente la paja de trigo y cebada en fardos, mas no la paja de arroz que se utiliza en esta investigación, por este motivo fue importante la construcción de una máquina enfardadora que permita la fabricación de fardos y los mismos puedan ser utilizados en la construcción de viviendas.

Figura 35

Proceso de recolección de la paja.



Longitud de la paja recolectada a partir de la cosecha del arroz

Uno de los parámetros importantes de la paja de arroz para la construcción de viviendas es su longitud, varios investigadores coinciden que esta debe medir entre 15 a 20 cm, pues su dimensión no debe ser menor, ya que al ser enfardada su densidad no cumple con la mínima permitida por las normas internacionales, obteniéndose fardos flojos sin agarre entre la paja y los hilos, cuya función es mantener a la misma compactada después de su enfardado.

Se pudo evidenciar que la paja de arroz puede variar su longitud dependiendo si la cosecha del cereal es máquina o manual, ya que si se realiza a máquina la paja es subdividida en varias partes con longitudes entre 18 y 22 cm, mientras que si la cosecha es manual su longitud supera los 30 cm. La paja recolectada para la realización de esta investigación se generó a partir de la cosecha manual de 2 ha de arroz mediante el uso del machete, al medir su longitud la mayoría de tallos midieron entre 50 y 60 cm como se indica en la figura 36.

Figura 36

Longitud de la paja de arroz.



Construcción de una máquina manual enfardadora

Como se había indicado anteriormente es difícil conseguir la paja de arroz ya enfardada, debido que en la actualidad este material no tiene ningún uso en específico por lo que es desechada o quemada. Para poderla utilizar en la construcción de viviendas y formar parte de paneles prefabricados con marcos de madera y revocos exteriores e interiores, esta debe ser enfardada a fin de mejorar sus propiedades como su densidad y resistencia al fuego, que al estar suelta sería imposible poder usarla, debido a sus deficientes características y peligros que puede generar, como por ejemplo su rápida combustión.

Por este motivo se procedió a construir una máquina enfardadora manual de prensa horizontal en madera, por su fácil y rápida fabricación, además los costos de elaboración requeridos no son elevados a comparación con otros modelos, los materiales utilizados como la madera para su montaje son fáciles de conseguir, lo que conllevaría a que cualquier persona con un mínimo conocimiento y presupuesto pueda fabricarla de manera artesanal en cualquier lugar.

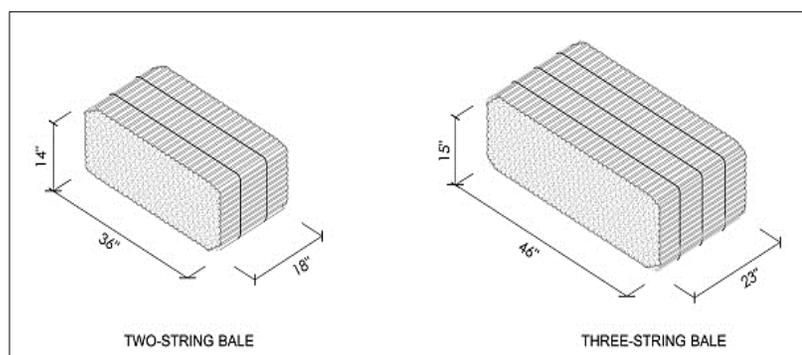
Dimensiones seleccionadas para los fardos de paja de arroz

El objetivo de construir la máquina enfardadora es comprimir la paja de arroz recolectada y transformarla en fardos o bloques, por este motivo uno de los pasos previos para su construcción es establecer las dimensiones de los fardos. El (Código Residencial

Internacional , 2018), en su apéndice construcción con paja establece que los mismo no deberán tener dimensiones menores a 12 pulgadas es decir 30.00 cm, además presenta dos modelos de fardos uno pequeño y otro grande con dimensiones comunes previamente establecidas, que pueden ser adoptadas por los constructores y se indican en la figura 37.

Figura 37

Dimensiones comunes para fardos de paja.



Nota. Recuperado de: (Código Residencial Internacional , 2018)

Por lo tanto, tomando como referencia las dimensiones establecidas para los fardos pequeños cuyo largo es 36 in igual a 91.44 cm, su altura de 18 in igual a 45.72 cm, y su ancho de 14 in igual a 35.56 cm, se procedió a utilizar estas dimensiones para la elaboración de los fardos con paja de arroz ajustando las misma a valores exactos para el sistema internacional, es decir para su largo 90 cm, para su altura 45 cm y para su ancho 35 cm. En esta investigación se procede a fabricar los fardos pequeños por su fácil manipulación y por ende pensando en la reducción costos de operación y en tiempos de enfardado, también se tomó en cuenta pensado en las dimensiones de los paneles que se obtienen posteriormente como resultado final.

Materiales utilizados para la construcción de la máquina enfardadora

Una vez que se han establecido las dimensiones de los fardos de paja que se disponen a fabricar en la investigación, se definieron los materiales para la construcción de la máquina enfardadora, el material predominante es la madera en un 90 %, mientras que el 10 % restante

corresponde a objetos en acero que se utilizan para el sistema de compresión. El cuerpo de esta máquina se realizó con tableros contrachapados que son conocidos en Ecuador como tríplex, para definir su espesor fue necesario escuchar diferentes opiniones dadas por carpinteros con experiencia en la elaboración de objetos sometidos a presión, debido a que actualmente no existe suficiente información sobre la construcción de este tipo de máquinas que nos permita definir su espesor fácilmente.

Por lo tanto, se optó en utilizar tableros de 18 mm de espesor con el fin de evitar que los mismos se deformen cuando estén sometidos a grandes fuerzas por la presión ejercida en la paja. Estos fueron adquiridos en la empresa Edimca que se dedica en el país al suministro de tableros de madera, se los adquiere en planchas de 122 cm x 244 cm. Para la optimización en los tiempos de construcción los mismos fueron recortados en piezas en este mismo lugar como se observa en la figura 38, conforme al diseño establecido previamente para la máquina enfardadora.

Figura 38

Cortado de tableros contrachapados.



Se adquirieron tablones de 240 cm x 22.5 cm x 6 cm para fabricar las palancas principales y secundarias que forman parte del sistema a compresión, se decide utilizar los mismos debido a sus 6 cm de espesor que garantiza la resistencia de las palancas durante el prensado de la paja evitando que estas fallen. Los tablones son de laurel, este tipo de madera se puede encontrar fácilmente en nuestro medio, además de contar con propiedades

aceptables para estos fines. Los materiales faltantes corresponden a objetos de acero y son identificados como complementarios para la construcción de esta máquina, los mismos se describen detalladamente en los siguientes apartados, pero se indican de manera general en la tabla 4.

Tabla 4

Materiales para la construcción de máquina enfardadora manual en madera.

MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD
TABLÓN DE LAUREL 240 x 22.5 x 6 cm	u	3
TABLERO TRIPLEX 122 x 244 x 1.8 cm	u	3
TIRAS DE MADERA 600 x 6 x 2 cm	u	3
BISAGRA DE BRONCE 3"	u	3
PLACA DE ACERO BASE INFERIOR A36 200 x 100 x 2 mm	u	1
PLACA DE ACERO BASE SUPERIOR A36 200 x 100 x 5 mm	u	1
PLACA DE ACERO 1 - PANEL DE COMPRESIÓN A36 200 x 100 x 2 mm	u	1
PLACA DE ACERO 2 - PANEL DE COMPRESIÓN A36 200 x 100 x 5 mm	u	1
PERNO NEGRO CABEZA HEXAGONAL CON TUERCA 3"	u	3
PERNO NEGRO CABEZA HEXAGONAL CON TUERCA 3"	u	1
PERNO NEGRO CABEZA HEXAGONAL CON TUERCA 2 1/2 "	u	14
RODELA PLANA 1"	u	4
RODELA PLANA 1 1/2"	u	10
TORNILLO NEGRO MADERA 2 1/2"	u	70
CLAVOS DE ACERO LISO 1/2"	kg	1
SEGUROS DE ACERO	u	2
PEGAMENTO P/ MADERA CARPINTERO 16 OZ	u	1

Montaje de las estructuras que conforma la máquina enfardadora

Para la construcción de esta máquina durante su proceso constructivo fue necesario subdividir la misma en diferentes partes o estructuras que deben ser montadas y fabricadas en

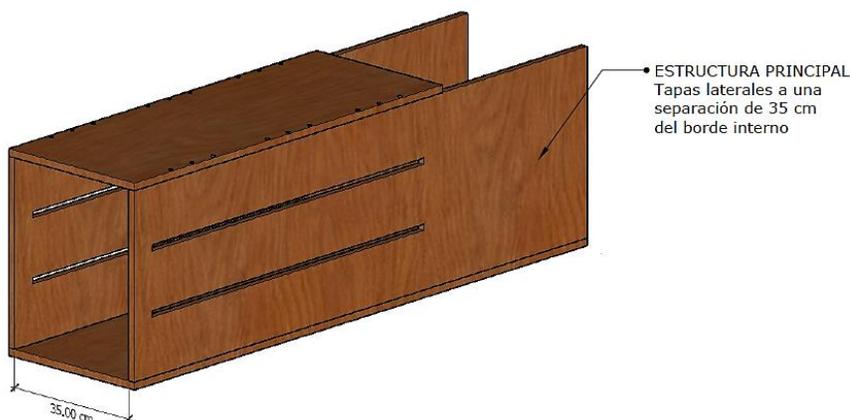
orden con los materiales ya indicados, cuando estas hayan sido completamente armadas se ensamblan unas a otras a fin de conformar una sola estructura, cuyo resultado final es la máquina enfardadora. A continuación, se detalla los componentes, dimensiones e instrucciones de montaje de cada una de estas.

- **Cajón principal para colocación y compresión de paja**

Una de las estructuras principales que forma parte de esta máquina es su cuerpo o también identificado como cajón principal que se indica en la figura en la figura 39, aquí es colocada la paja para posteriormente ser comprimida.

Figura 39

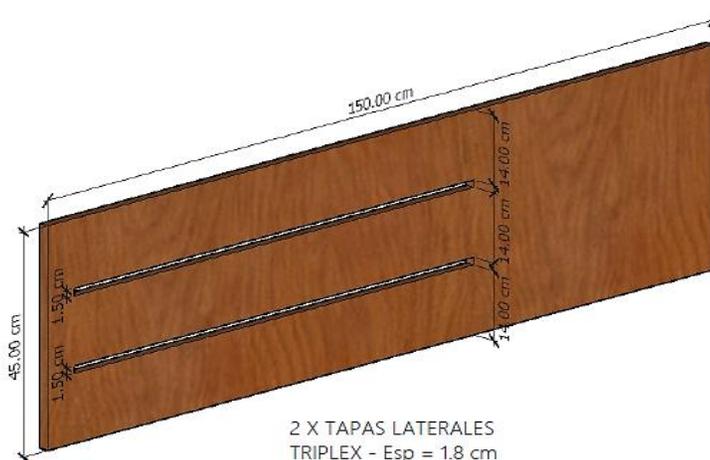
Cajón o cuerpo principal de la máquina enfardadora.



Para su fabricación como ya se había indicado antes, se utilizan tableros contrachapados de 18 mm de espesor, el cuerpo de la máquina está compuesta por cuatro tapas, dos laterales idénticas, una superior y otra inferior con dimensiones diferentes. Las tapas laterales tienen de largo 150 cm y su ancho 45 cm, cabe indicar que a lo largo de cada una de estas fue necesario realizar dos aberturas rectangulares separadas a una misma distancia como se indica en la figura 40, esto con la finalidad de introducir los hilos que permitan mantener la forma del fardo una vez que ha sido comprimida la paja.

Figura 40

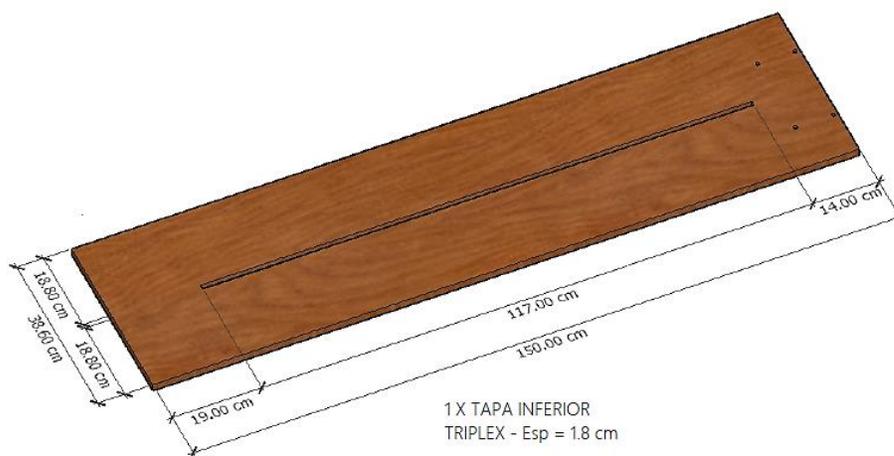
Tapas laterales del cajón principal de la máquina enfardadora.



La tapa superior tiene 102 cm de largo y 38.60 cm de ancho, esta es la más pequeña a comparación con las otras, debido a que por la parte superior se deja una abertura para poder ingresar la paja. Mientras que la tapa inferior tiene 150 cm de largo y 38.60 cm de ancho, en esta se debe realizar una abertura rectangular a lo largo como se indica en la figura 41, se localizada justo en el centro de su ancho, además sirve como guía de desplazamiento para la placa de compresión de la máquina enfardadora.

Figura 41

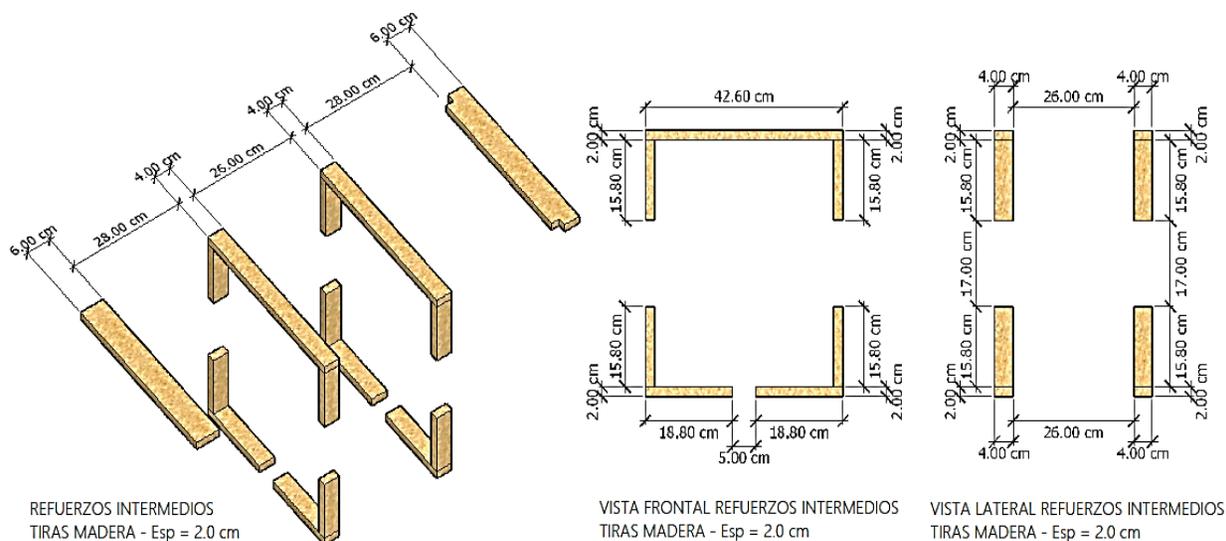
Tapa inferior del cajón principal de la máquina enfardadora.



Una vez construidas las tapas, estas son unidas unas a otras con tornillos negros de madera de 2 1/2", además para mayor seguridad se coloca pegamento blanco en sus uniones previo a la colocación de los tornillos. Para evitar posibles cuarteaduras, fisuras, aberturas en las uniones de las tapas que conforman el cajón, debido a la presión a la que están sometidas cuando se comprime la paja, se colocan refuerzos intermedios de madera cada 28 cm como se indica en la figura 42. Los refuerzos se fabricaron con tiras de madera de 600 cm x 6 cm x 2 cm de espesor.

Figura 42

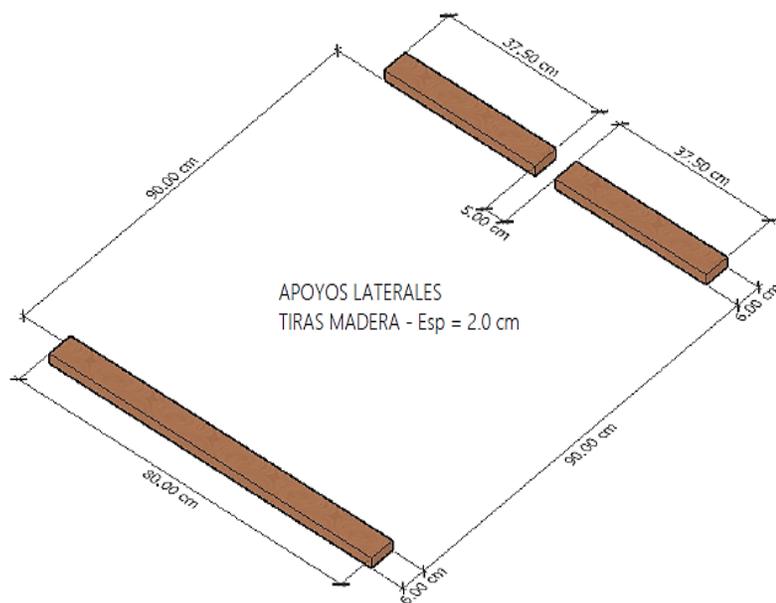
Refuerzos intermedios para cajón principal de la máquina enfardadora.



Para evitar posibles daños y dar una mayor estabilidad a la máquina durante el proceso de enfardado, en la tapa inferior y a los costados de esta se colocan apoyos laterales como se observa en la figura 43, son construidos con las mismas tiras que se utilizan para los refuerzos intermedios, se colocan a una distancia de 90 cm unos a otros para facilitar su transporte cuando se requiera mover la máquina de un lugar a otro.

Figura 43

Apoyos laterales cajón principal de la máquina enfardadora.



A continuación, en la figura 44 y 45 se muestra el cajón o cuerpo de la máquina enfardadora una vez que se han colocado todos sus elementos descritos anteriormente.

Figura 44

Vista frontal cajón principal de la máquina enfardadora.

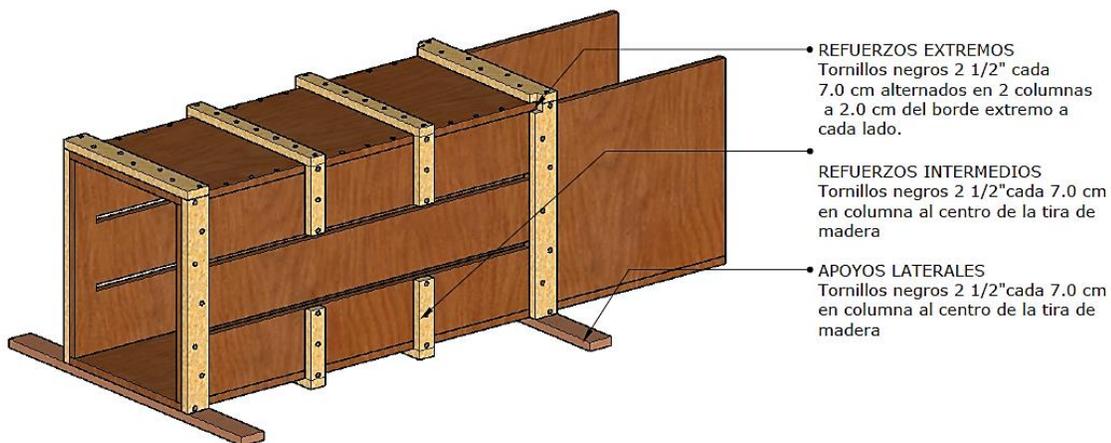
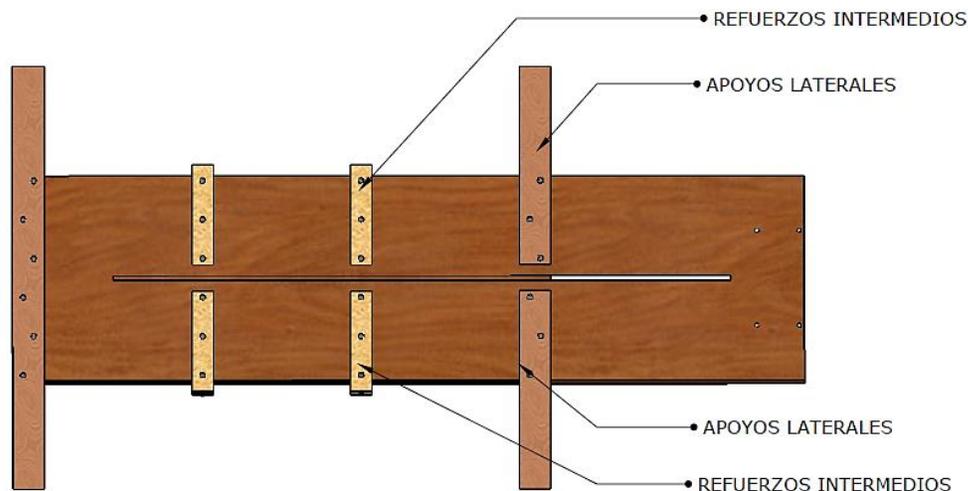


Figura 45

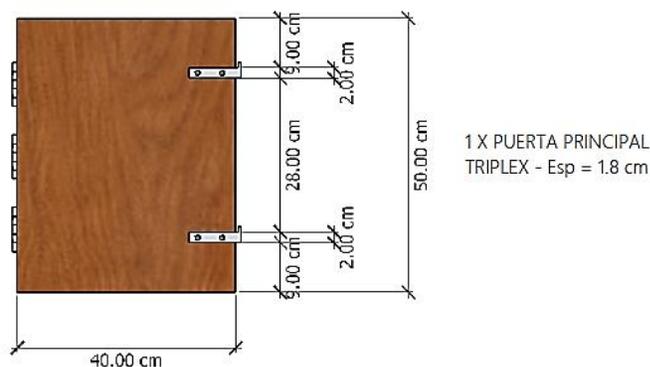
Vista inferior cajón principal de la máquina enfardadora.



Finalmente, para concluir la construcción del cajón principal, se fabrica una puerta que permita la extracción de los fardos de la máquina enfardadora cuando la paja ya ha sido comprimida y se hayan colocado los hilos. Esta al igual que las tapas se construye con tableros contrachapados o trípex de 18 mm de espesor, mide 40 cm de ancho y 50 cm de alto como se indica en la figura 46.

Figura 46

Puerta principal de la máquina enfardadora.

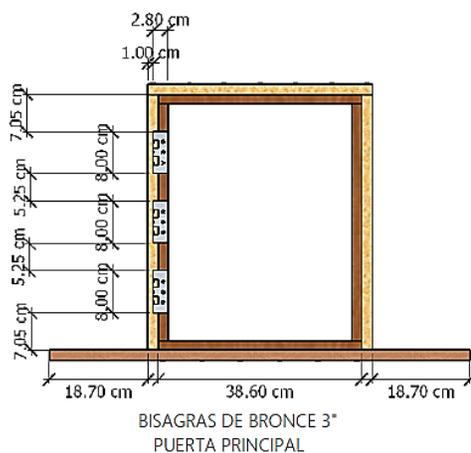


En la puerta se colocan dos seguros fabricados en acero A36, separados 9 cm desde el borde inferior y superior, estos únicamente son abiertos cuando los fardos están próximos a salir de la máquina, caso contrario no deben ser abiertos durante el proceso de enfardado. En

el borde lateral izquierdo de la puerta se atornillan 3 bisagras de bronce de 3" que son colocadas cada 5.25 cm una de otras y a 7.00 cm del borde inferior y superior, como se indica en la figura 47.

Figura 47

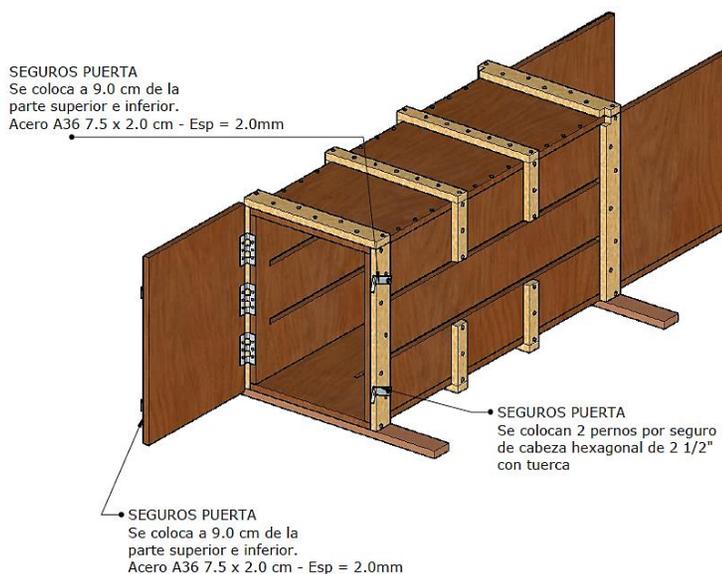
Bisagras para la puerta principal de la máquina enfardadora.



A continuación, en la figura 48 se muestra el cajón de compresión de la máquina enfardadora cuando ya ha sido instalada la puerta principal y además se describe los tipos de seguros que se colocaron en la misma.

Figura 48

Vista frontal cajón principal de la máquina enfardadora incluye puerta y seguros.



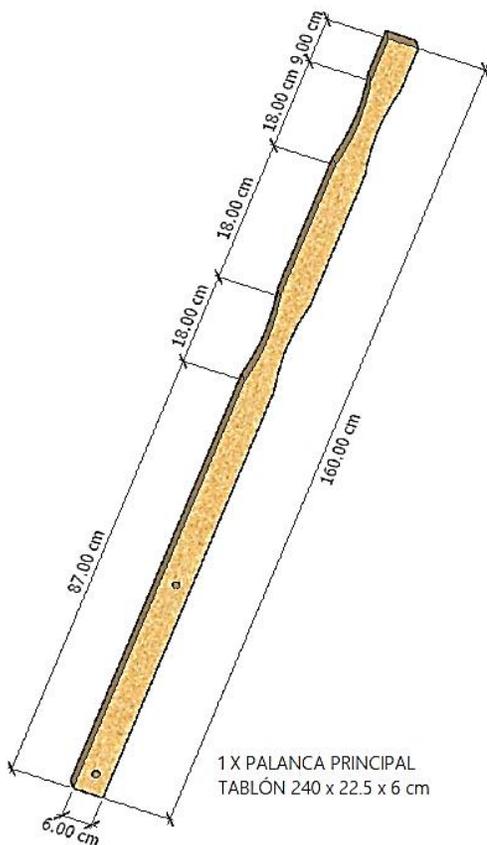
- **Sistema a compresión de la máquina enfardadora**

El sistema a compresión de la máquina enfardadora está compuesto por varias estructuras o elementos, por ejemplo, de una palanca principal, dos palancas secundarias, un elemento o panel de compresión, una placa principal base, una placa de compresión y dos placas secundarias, a continuación, se describe cada uno de estos elementos respecto a los materiales utilizados para su construcción, características y dimensiones.

La palanca principal es construida a partir de tablones de laurel, tiene una longitud de 160 cm de largo, su ancho y grosor mide 6 cm como se indica en la figura 49. Cumple la función de desplazar el panel o elemento de compresión a lo largo del cajón donde se coloca la paja, además transmite la presión que es ejercida por el operador hacia el panel de compresión.

Figura 49

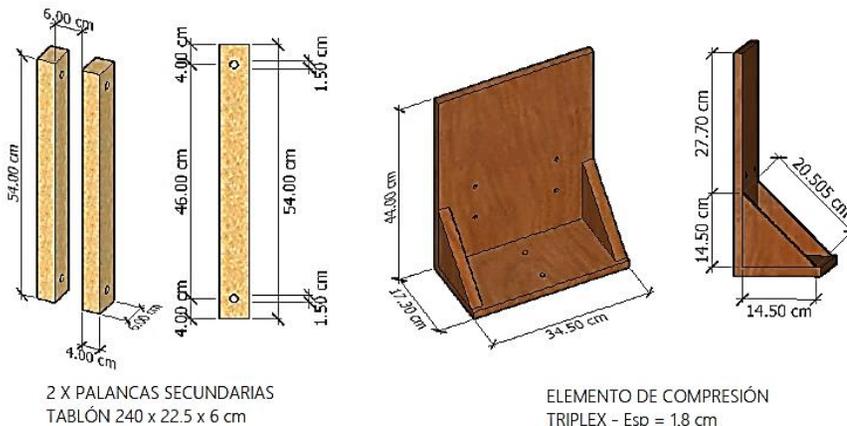
Palanca principal del sistema a compresión.



Las palancas secundarias son construidas con los mismos tablonces que se utilizan para la palanca principal, estas tienen una longitud de 54 cm, ancho de 4 cm y grosor de 6 cm. Su función es brindar movilidad a la palanca principal permitiendo que esta baje o suba al momento del enfardado. El panel o elemento de compresión es construido con tableros contrachapados o trípex de 18 mm, se lo fabrica a partir de 3 piezas, la primera mide 44 cm de alto por 34.50 cm de ancho y es aquella que distribuye la presión uniformemente en la paja, la segunda pieza es la base del elemento a compresión mide de ancho 17.30 cm y de largo 34.50 cm, finalmente la tercera pieza tiene forma triangular y ayuda a mantener la perpendicularidad entre las dos piezas anteriores, mide 14.50 cm de ancho por 14.50 cm de altura, estas se colocan a los extremos de la pieza base. En la figura 50 se resumen las dimensiones tanto de las palancas secundarias y del elemento a compresión ensamblado.

Figura 50

Palancas secundarias y elemento o panel de compresión.



- **Montaje de las estructuras**

Para realizar el montaje de las dos estructuras o sistemas que se describieron en los apartados anteriores es necesario utilizar placas y pernos que permitan unir las dos partes monolíticamente y formen una sola, cuyo objetivo es cumplir con el funcionamiento óptimo de la máquina enfardadora. Inicialmente se coloca tanto en la parte posterior y frontal al elemento de compresión dos placas, la primera se indica en la figura 51, es elaborada artesanalmente

mediante el uso de soldadura y planchas de acero A36 de 5 mm de espesor, cumple la función de sujetar la palanca principal que se empotra en la misma mediante el uso de rodela, tuercas y pernos como se observa en la figura 52.

Figura 51

Placa de compresión de la máquina enfardadora.

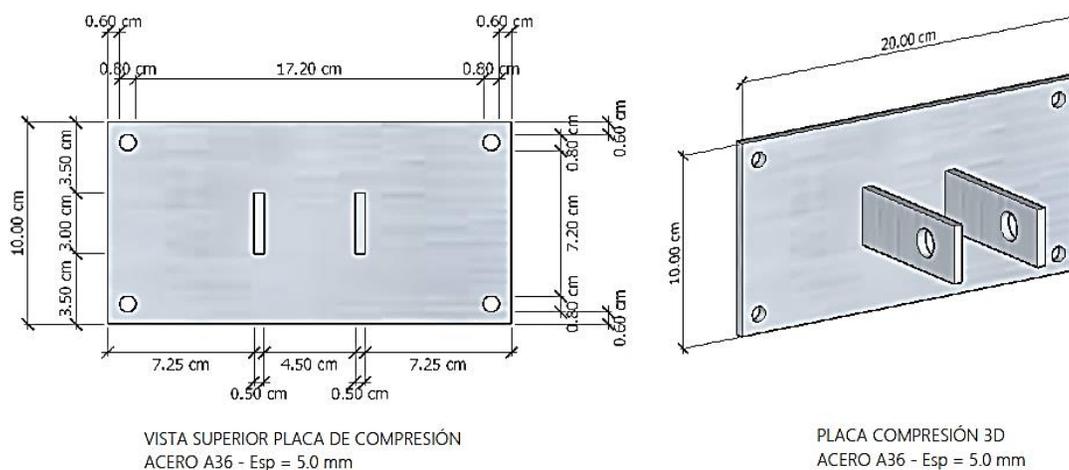
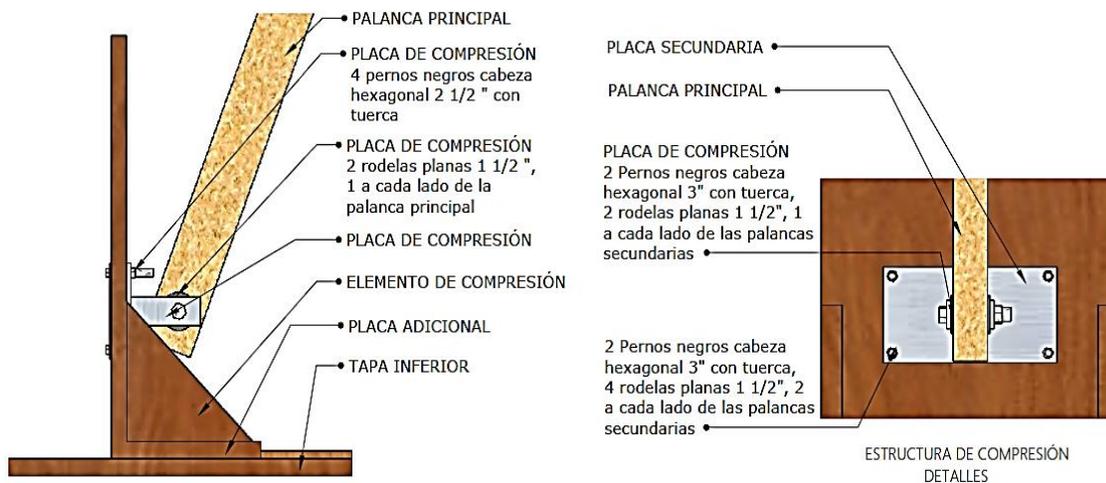


Figura 52

Empotramiento de la palanca principal a la placa de compresión.

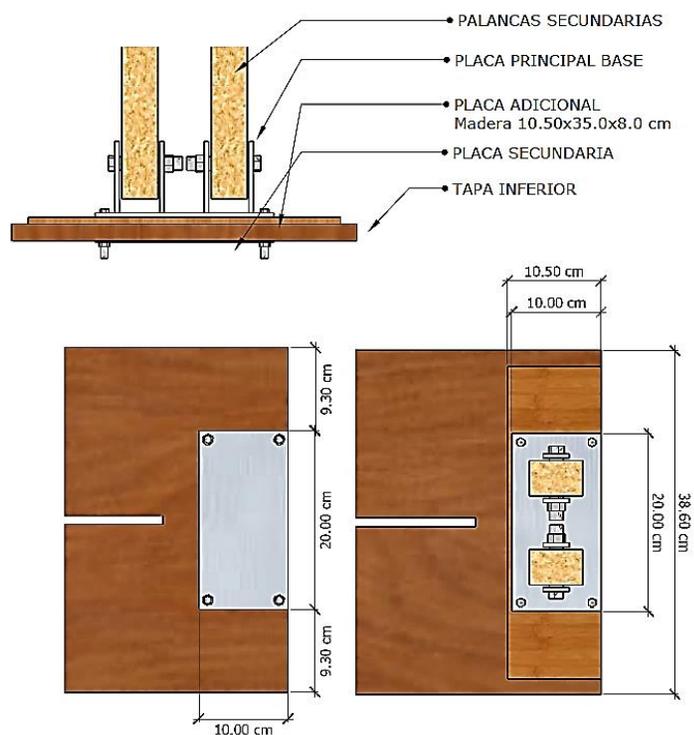


La segunda placa también llamada placa secundaria no requiere mayores detalles, mide 20 cm de largo y 10 cm de ancho, es colocada frente a la placa de compresión que se fija al panel hasta obtener un empotramiento perfecto entre las dos placas como se indica en la figura 53, esto es posible gracias a tornillos y tuercas que se colocan en cada esquina.

Esta placa es colocada sobre la tapa inferior de la máquina enfardadora, para su fijación es necesario situar bajo la tapa inferior y frente a esta otra placa secundaria, a fin de poder ingresar los pernos en cada esquina y ajustar las dos placas a la vez. La función principal de la placa principal base es permitir el empotramiento en uno de los extremos de las dos palancas secundarias mediante el uso de rodela, tuercas y pernos. Los extremos libres de estas palancas se unen a uno de los extremos de la palanca principal mediante un perno de cabeza hexagonal de 6.5", con la finalidad de conforman un solo sistema entre todos los elementos (palanca principal, palancas secundarias y panel de compresión) como se indica en la figura 55.

Figura 55

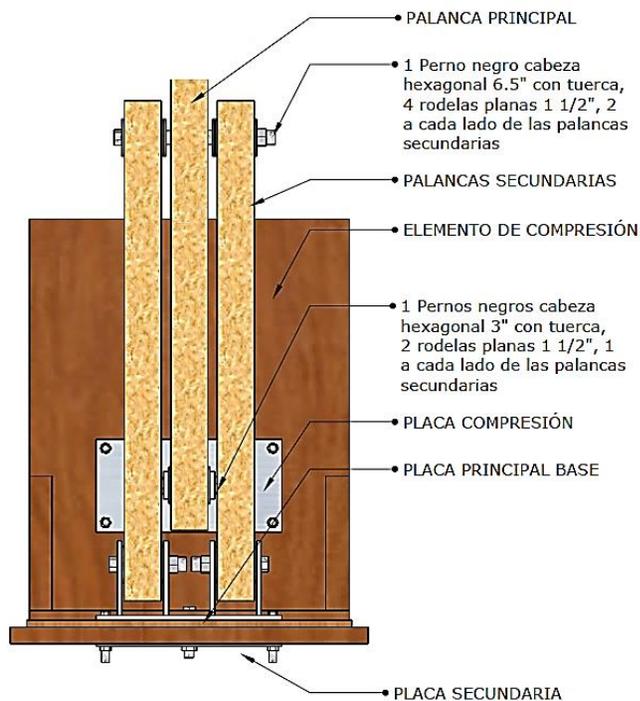
Montaje de los elementos que conforman el sistema de compresión.



En la figura 56, se puede observar el sistema de compresión ya ensamblado con los elementos y placas que se han descrito anteriormente.

Figura 56

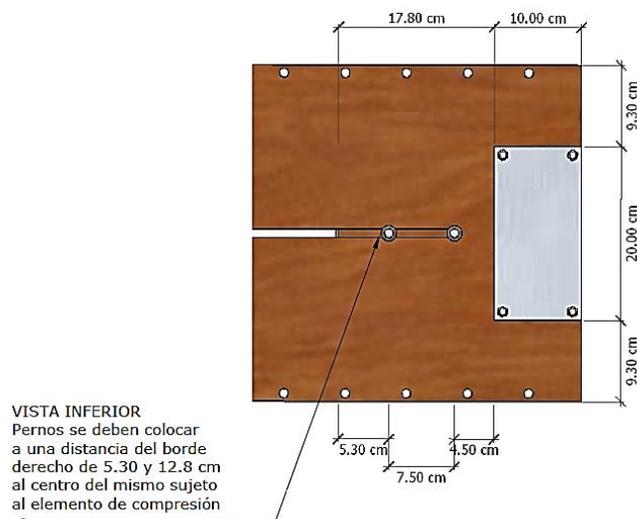
Sistema de compresión.



En la base rectangular del panel de compresión se ingresan dos pernos que se introducen por debajo de la tapa inferior de la máquina enfardadora y que cumplen la función de unir parcialmente estos dos sistemas (cajón de compresión y sistema de compresión), como también permitir el movimiento del panel de compresión para que este llegue al fondo del cajón de la máquina y de esta manera se pueda comprimir la paja. En la figura 57, se puede apreciar las características de los pernos y su ubicación, cabe señalar que estos no deben ser ajustados a su máxima capacidad ya que deben permitir el deslizamiento del elemento de compresión siguiendo la abertura que se realizó anteriormente en la tapa inferior de la máquina.

Figura 57

Montaje del sistema de compresión con el cuerpo de la máquina enfardadora.



Como resumen del proceso constructivo, ensamblaje de cada uno de los elementos que componen la máquina enfardadora se presenta la figura 58, que corresponde a una vista en tres dimensiones de la máquina enfardadora construida en su totalidad, donde se ha enumerado cada una de sus partes o elementos, en la tabla 5 se resumen las cantidades y materiales utilizados para su construcción conforme a la numeración establecida.

Figura 58

Máquina enfardadora manual en madera.

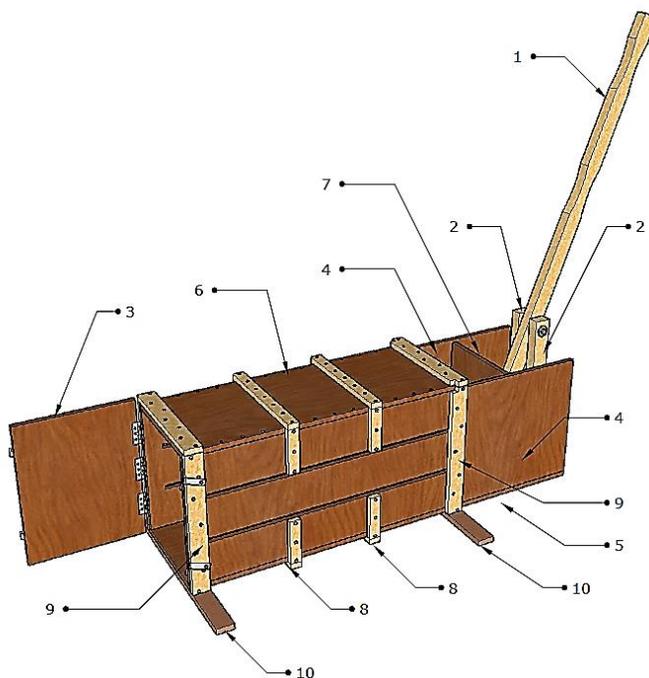


Tabla 5

Elementos y materiales necesarios para la construcción de enfardadora manual en madera.

ELEMENTOS Y MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ENFARDORA MANUAL EN MADERA				
N°	ELEMENTO	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD
1	PALANCA PRINCIPAL	TABLÓN DE LAUREL 240 x 22.5 x 6 cm	u	3
2	PALANCAS SECUNDARIAS			
3	PUERTA PRINCIPAL	TABLERO TRIPLEX 122 x 244 x 1.8 cm	u	3
4	TAPAS LATERALES			
5	TAPA INFERIOR			
6	TAPA SUPERIOR			
7	ELEMENTO DE COMPRESIÓN			
8	REFUERZOS INTERMEDIOS	TIRAS DE MADERA 600 x 6 x 2 cm	u	3
9	REFUERZOS EXTREMOS			
10	APOYOS LATERALES			

En la tabla 6 se señala las cantidades y localización de las piezas más pequeñas como bisagras, placas, pernos, tornillos, clavos, rodela, seguros que forman parte de las estructuras de la máquina enfardadora (cajón y sistema de compresión), además se indica el elemento u objeto que lo componen.

Tabla 6

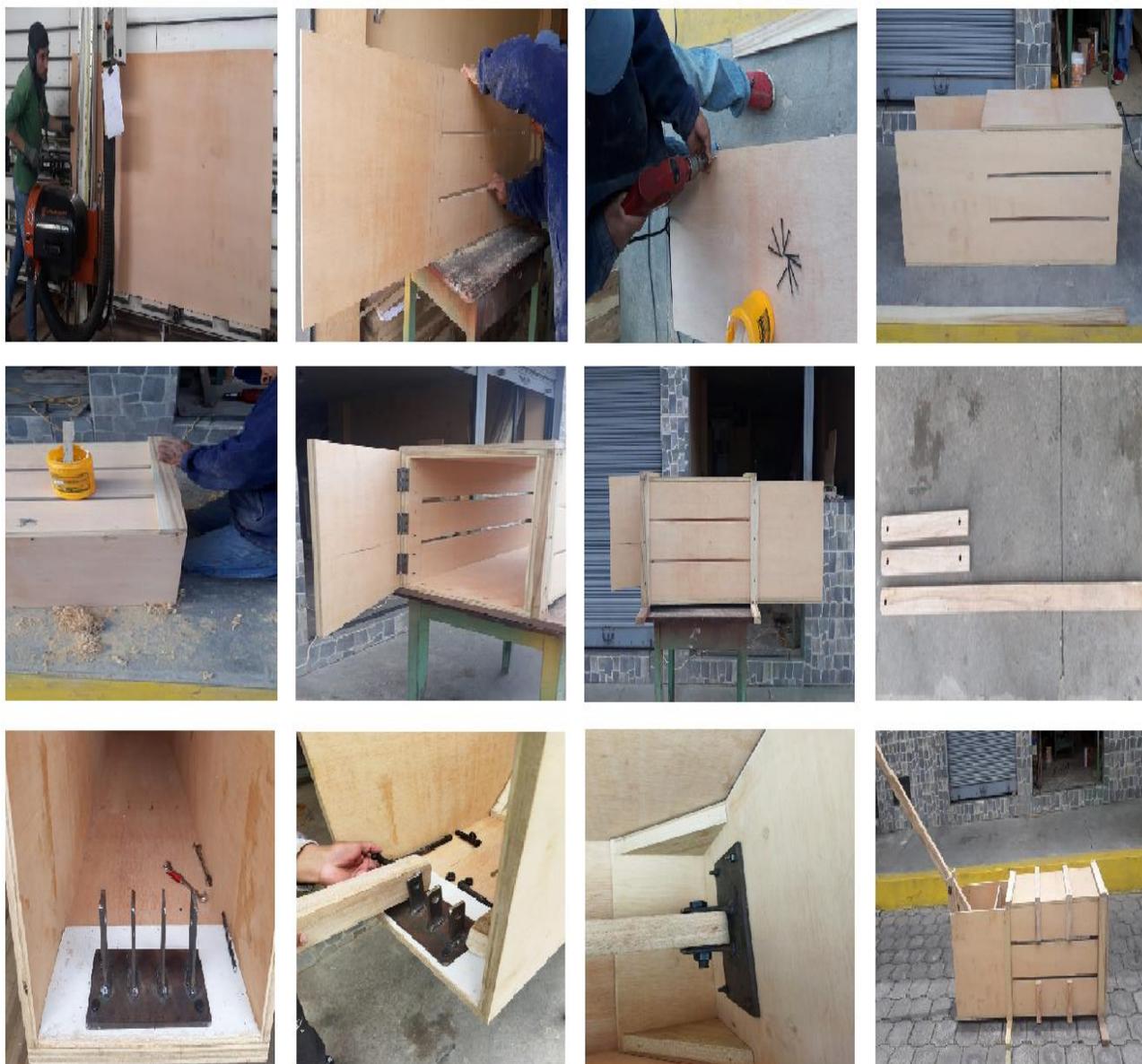
Cantidades, localización de piezas en elementos para la construcción de la máquina enfardadora.

PIEZAS QUE COMPONEN LOS SISTEMAS DE LA MÁQUINA ENFARDORA			
PIEZA U OBJETO	UNID	CANT	ELEMENTO QUE COMPONE O UBICACIÓN
BISAGRA DE BRONCE 3"	u	3	PUERTA PRINCIPAL
PLACA DE ACERO INFERIOR DE LA BASE A36 200 x 100 x 2 mm	u	1	ANCLAJE DE PALANCAS SECUNDARIAS
PLACA DE ACERO SUPERIOR DE LA BASE A36 200 x 100 x 5 mm	u	1	ANCLAJE DE PALANCAS SECUNDARIAS
PLACA DE ACERO 1 PANEL DE COMPRESIÓN A36 200 x 100 x 2 mm	u	1	ANCLAJE PALANCA PRINCIPAL
PLACA DE ACERO 2 PANEL DE COMPRESIÓN A36 200 x 100 x 5 mm	u	1	ANCLAJE PALANCA PRINCIPAL
PERNO NEGRO CABEZA HEXAGONAL CON TUERCA 3"	u	3	ANCLAJE PALANCAS PRINCIPAL Y SECUNDARIAS
PERNO NEGRO CABEZA HEXAGONAL CON TUERCA 3"	u	1	UNION PALANCAS PRINCIPAL Y SECUNDARIAS
PERNO NEGRO CABEZA HEXAGONAL CON TUERCA 2 1/2 "	u	14	ANCLAJE ELEMENTO DE COMPRESIÓN, SEGUROS PARA PUERTA PRINCIPAL
RODELA PLANA 1"	u	4	PERNOS DE ANCLAJE ELEMENTO DE COMPRESIÓN Y PUERTA PRINCIPAL
RODELA PLANA 1 1/2"	u	10	PERNOS DE ANCLAJE PALANCAS PRINCIPAL Y SECUNDARIAS
TORNILLO NEGRO MADERA 2 1/2"	u	70	UNIÓN TAPAS SUPERIOR, INFERIOR, LATERALES, REFUERZOS INTERMEDIOS Y EXTERIORES
CLAVOS DE ACERO LISO 1/2"	kg	1	UNIONES ELEMENTO DE COMPRESIÓN
SEGUROS DE ACERO	u	2	PUERTA PRINCIPAL
PEGAMENTO P/ MADERA CARPINTERO 16 OZ	u	1	UNIÓN TAPAS SUPERIOR, INFERIOR, LATERALES, REFUERZOS INTERMEDIOS Y EXTERIORES

En la figura 59, se puede observar una recopilación de las imágenes correspondientes al proceso constructivo real de la máquina enfardadora, realizada en esta investigación según lo descrito en los apartados anteriores referente a su ensamblaje, donde se indicó únicamente imágenes en tres dimensiones de la misma.

Figura 59

Proceso constructivo real de la máquina enfardadora manual en madera.



Proceso de enfardado de la paja del arroz

Una vez que ha sido construida la máquina enfardadora y recolectada la paja producto de la cosecha del arroz se inicia proceso de enfardado, mediante el uso de esta máquina que debe ser operada 100% de forma manual con una o dos personas. Este proceso tiene que

ejecutarse ordenadamente desde la recolección de la paja hasta la obtención de los fardos, siguiendo cada uno de los pasos que se indican a continuación:

1. RECOLECCIÓN Y OBTENCIÓN DE LA PAJA	
	<p>Una vez realizada la cosecha del arroz es aconsejable que la paja permanezca en el terreno al menos unos 3 meses para que esta se seque y posteriormente proceder con su recolección. Los tallos deberán ser ordenados en una sola dirección y agrupados por montones en el mismo terreno para después conformar uno solo.</p>
2. ALMACENAMIENTO DE LA PAJA	
	<p>Después de su recolección la paja deberá ser almacenada en un lugar cubierto y libre de humedad antes y después de ser enfardada. En el caso de que entre en contacto con el suelo natural deberá ser colocada sobre pallets, de esta manera lo que se desea es evitar su pudrición o la presencia de posibles organismos como hongos.</p>
3. COLOCACIÓN DE LA PAJA EN LA MÁQUINA ENFARDADORA	
	<p>Ordenada la paja en una sola dirección y por montones, esta es colocada con los tallos de forma vertical por la parte superior del cajón de compresión donde se dejó una abertura. Verificar que el panel de compresión este completamente apegado a la parte posterior de la máquina con el fin de tener un mayor espacio para ingresar la paja.</p>

4. ORDENAMIENTO DE LA PAJA DENTRO DEL CAJÓN DE COMPRESIÓN



Con ayuda de una varilla de 8 mm de diámetro y una longitud de 1 m, se realiza el ordenamiento de la paja dentro del cajón de compresión. Cuando la paja es ingresada a la máquina se introduce la varilla por una de las aberturas laterales con la finalidad de evitar que los tallos caigan de forma horizontal dentro del cajón y así mantener su verticalidad durante la compresión.

5. COMPRESIÓN DE LA PAJA



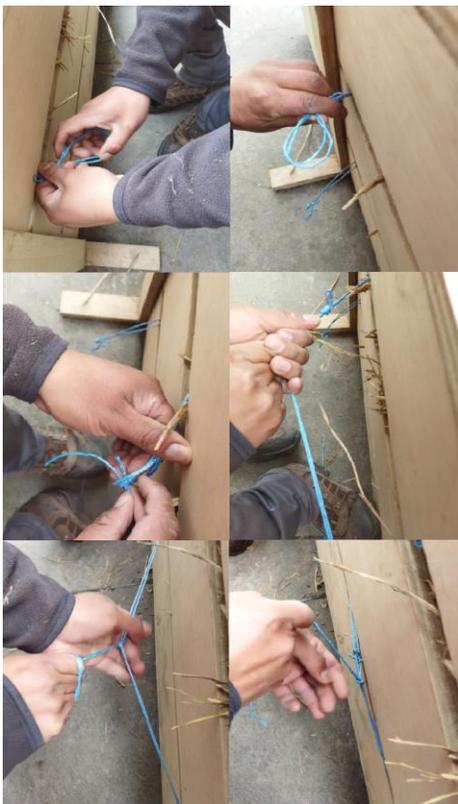
Para la compresión de la paja se debe sujetar la palanca principal con las dos manos, una en la parte superior y la otra en la parte inferior, mientras que el pie izquierdo o derecho es colocado en el extremo superior de una de las palancas secundarias. En esta posición se deberá ejercer presión en las palancas (principal y secundarias) para provocar que el panel de compresión se deslice con fuerza hacia delante y comprima la paja. Este proceso se lo realiza tres veces cuando dentro del cajón de la máquina enfardadora se haya colocado paja a 1/3, 2/3 y 3/3 del largo del mismo, repitiendo el paso 3 y 4 las veces que sean necesarias. Finalmente se debe de halar la palanca principal hacia atrás para dejar de comprimir la paja y recorrer el panel de compresión.

6. COLOCACIÓN DE HILOS



Para mantener la paja comprimida y la forma del fardo se utiliza doble hilo de polipropileno A-9, este es introducido con ayuda de una varilla de 8 mm por los extremos de cada una de las aberturas o guías que se localizan en las tapas laterales de la máquina enfardadora y que están separadas cada 15 cm. La varilla deberá traspasar el ancho de la enfardadora y sobresalir por el otro lado con el hilo, los extremos del mismo deberán juntarse y tener la misma longitud tanto el lado izquierdo como derecho con referencia al centro de las guías.

7. NUDOS



El fardo de paja deberá tener dos nudos, uno que se debe realizar en la primera abertura y el otro en la segunda abertura, estos tienen que alinearse el uno con el otro. Para ejecutar los mismos se juntan los dos extremos y se los tensan, el primero se introducirá por el otro que tiene forma de oreja como consecuencia de haber colocado doble hilo. El nudo debe ser amarrado de tal manera que, al ser tensado y después soltado por las manos, cuando la paja ejerza presión hacia afuera se amarre con fuerza, es decir mientras mayor sea la presión de la paja el nudo será más fuerte, hasta el punto de evitar que se suelte en algún momento.

8. LEVANTAMIENTO DE SEGUROS DE LA PUERTA PRINCIPAL



Una vez que se ha terminado de realizar los nudos y el panel de compresión se haya desplazado hacia atrás, se procede a levantar los seguros de la puerta principal de la máquina, para posteriormente realizar el proceso de retirado del fardo.

9. EXTRACCIÓN DEL FARDO DE LA MÁQUINA



Para la extracción del fardo de la máquina y cuando se haya verificado que la puerta principal este abierta se procede a mover el panel de compresión hacia delante, utilizando las palancas secundarias y principal. Este proceso es muy similar al que se realizó para comprimir la paja, de esta manera el fardo se deslizará por dentro del cajón y en uno de los extremos de la máquina sobresaldrá la mitad del mismo. La otra mitad se deberá extraer con ayuda de las manos, sujetándolo de los hilos y halándolo hacia atrás para sacar la otra mitad del fardo y este pueda salir completamente de la máquina.

10. LIMPIEZA DE LA MÁQUINA ENFARDADORA



Después de que se haya obtenido el fardo se procede a realizar la limpieza de la máquina con una escoba, el cajón de compresión deberá quedar completamente limpio y libre de paja, esto con la finalidad de que la placa de compresión se desplace con facilidad al realizar un enfardado más. Si es necesario se colocará aceite modernamente y con una esponja en las tuercas inferiores de la máquina que unen al panel de compresión y en la tapa inferior de la misma.

11. ALMACENAMIENTO DE LOS FARDOS



Una vez que se ha enfardado toda la paja, los fardos son almacenados en un lugar cubierto y libre de humedad, hasta que sean utilizados para la construcción de los paneles estructurales con marcos de madera y revoco a base de cal y cemento.

Determinación de las propiedades físico – mecánicas de los fardos de paja

Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado anterior con la cantidad de paja recolectada y utilizando la máquina enfardadora, fue posible la obtención de 24 fardos. De cada

uno se determina las siguientes propiedades y características físico – mecánicas, con la finalidad de identificar si son aptos para ser usados en la construcción de viviendas.

Dimensiones

Debido a las irregularidades que presentan los fardos de paja por la presencia de tallos en los bordes de los mismos, para obtener sus dimensiones es necesario colocar una tabla trípex en sus lados y posteriormente medirlos como se indica en la figura 60, esto con la finalidad de que al ser medidos con el flexómetro se obtengan dimensiones que sean las más exactas posibles.

Figura 60

Procedimiento para medir los fardos.



Peso

Utilizando una balanza digital se obtiene el peso de los mismos, este proceso se deberá realizarse cuidadosamente sujetando los fardos de los costados y llevándolos hacia la balanza como se indica en la figura 61, esperar que el valor del peso se estabilice hasta quedar fijo en la pantalla y proceder a tomar su lectura.

Figura 61

Procedimiento para pesaje de los fardos.



Contenido de humedad

El contenido de humedad se mide en porcentaje y se lo determina con el equipo F-2000 que se muestra en la figura 62, antes de su uso este debe ser calibrado. Es utilizado mundialmente para la medición de humedades de los fardos de paja.

Figura 62

Equipo F-2000.



Nota. Recuperado de (G.I.S Ibérica, 2023)

Está compuesto por una varilla sensorial con una longitud de 25 cm (G.I.S Ibérica, 2023), que se introduce en varias partes del fardo (superior, centro, inferior) de forma recta y perpendicular a las fibras para determinar su humedad como se indica en la figura 63. De esta

manera no solo se obtendrá un valor de humedad sino un promedio de las mismas que el propio equipo las calcula, el F-2000 puede medir humedades en un rango que va desde el 6% hasta el 40% (G.I.S Ibérica, 2023). En esta investigación se ha tomado como referencia el (Código Residencial Internacional , 2018), que permite un contenido de humedad máximo del 20% en los fardos para que estos puedan ser utilizados en la construcción.

Figura 63

Uso del equipo F-2000 para determinar el contenido de humedad en los fardos.



Densidad aparente

La densidad aparente es la relación entre el peso y el volumen del fardo como se indica en la siguiente ecuación:

$$D.A = \frac{P. fardo}{V}$$

Donde:

D.A = Densidad Aparente [kg/m³]

P. fardo = Peso del fardo [kg]

V = Volumen del fardo [m³]

Densidad aparente corregida

El (Código Residencial Internacional , 2018) en su apéndice construcción paja señala que las densidades aparentes de los fardos deben ser corregidas, esto se realiza restando al peso del fardo el peso de la humedad, que es obtenido al realizar la multiplicación entre el

contenido de humedad y el peso del mismo, este valor se lo divide para su volumen con el fin de obtener la densidad aparente corregida. A continuación, se indica la ecuación permite determinar la densidad corregida del fardo:

$$D.A.c = \frac{P.fardo - (P.fardo * C.Humedad)}{V}$$

Donde:

D.A.c = Densidad Aparente Corregida del fardo [kg/m³]

P. fardo = Peso del fardo [kg]

C. Humedad = Contenido de humedad del fardo [%]

V = Volumen del fardo [m³]

La densidad aparente corregida es una propiedad que juega un papel muy importante, ya que su valor permite identificar si el fardo puede o no ser utilizado como material de construcción. Varias investigaciones como las realizadas por (Minke & Manlke, 2006), (Sánchez, 2020), (D'Alessandro, Bianchi, Baldinelli, Rotili, & Schiavoni, 2017), (Sanchez & Hernández, 2017) coinciden que el valor de la densidad aparente debidamente corregida debe ser superior a los 80 kg/m³, ya que los fardos presentan aceptables propiedades como buena resistencia al fuego, aislación térmica, conductividad acústica entre otras más. Por este motivo en la presente investigación se tomará como parámetro de control mínimo el valor de 80kg/m³ para los valores de densidades aparentes de los fardos fabricados.

En la tabla 7, se muestra un resumen de las propiedades y características de los 24 fardos que han sido elaborados con paja de arroz, como por ejemplo sus dimensiones, volumen, peso, contenido de humedad, densidad aparente y densidad aparente corregida

Tabla 7

Propiedades físico – mecánicas de los fardos de paja de arroz

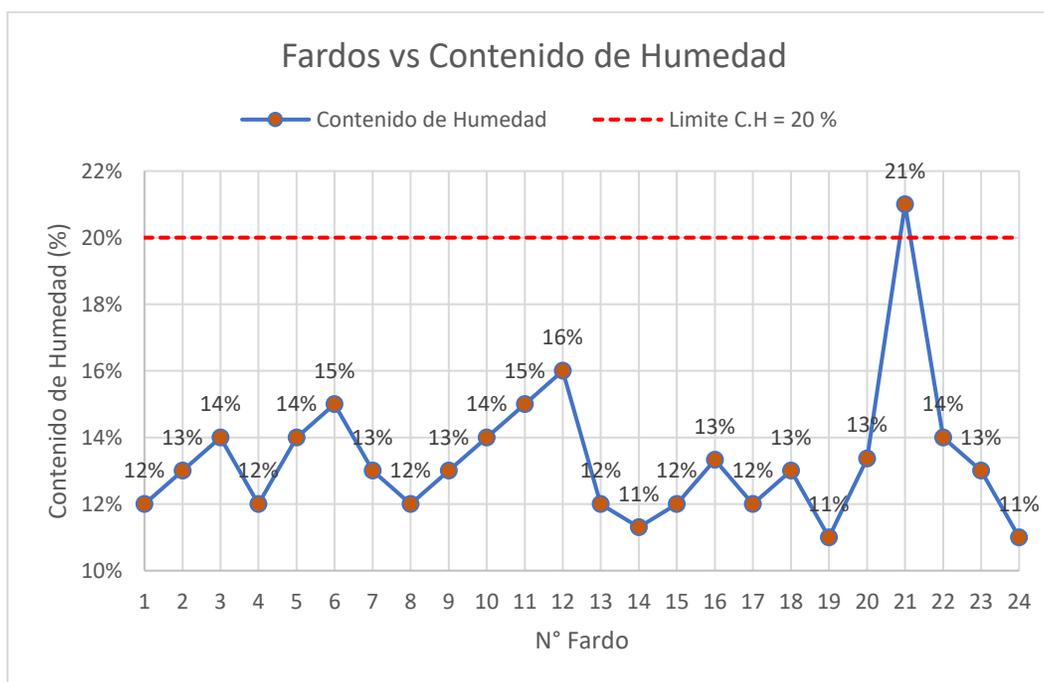
Fardo	Dimensiones			Peso	Volumen	Contenido de Humedad	Contenido de Humedad < 20%	Densidad Aparente	Densidad Aparente Corregida	Densidad Aparente Corregida > 80 [kg/m ³]
	Largo	Ancho	Altura							
N°	[m]	[m]	[m]	[kg]	[m ³]	%	CONDICIÓN	[kg/m ³]	[kg/m ³]	CONDICIÓN
1	0.88	0.45	0.34	14.50	0.135	12%	CUMPLE	107.69	94.77	CUMPLE
2	0.84	0.45	0.33	11.90	0.125	13%	CUMPLE	95.40	83.00	CUMPLE
3	0.90	0.45	0.34	14.60	0.138	14%	CUMPLE	106.03	91.18	CUMPLE
4	0.90	0.45	0.34	14.00	0.138	12%	CUMPLE	101.67	89.47	CUMPLE
5	0.88	0.44	0.32	11.40	0.124	14%	CUMPLE	92.01	79.13	NO CUMPLE
6	0.90	0.43	0.33	12.50	0.128	15%	CUMPLE	97.88	83.20	CUMPLE
7	0.88	0.45	0.34	13.60	0.135	13%	CUMPLE	101.01	87.88	CUMPLE
8	0.82	0.45	0.34	11.70	0.125	12%	CUMPLE	93.26	82.07	CUMPLE
9	0.88	0.44	0.35	12.70	0.136	13%	CUMPLE	93.71	81.53	CUMPLE
10	0.84	0.45	0.34	12.50	0.129	14%	CUMPLE	97.26	83.64	CUMPLE
11	0.82	0.45	0.34	11.80	0.125	15%	CUMPLE	94.05	79.95	NO CUMPLE
12	0.82	0.45	0.33	12.00	0.122	16%	CUMPLE	98.55	82.78	CUMPLE
13	0.85	0.45	0.36	13.05	0.138	12%	CUMPLE	94.77	83.40	CUMPLE
14	0.86	0.48	0.37	14.00	0.153	11%	CUMPLE	91.66	81.30	CUMPLE
15	0.85	0.46	0.36	12.00	0.130	12%	CUMPLE	92.31	81.23	CUMPLE
16	0.83	0.46	0.34	13.70	0.130	13%	CUMPLE	105.54	91.47	CUMPLE
17	0.87	0.43	0.35	12.10	0.131	12%	CUMPLE	92.41	81.32	CUMPLE
18	0.88	0.45	0.36	13.70	0.143	13%	CUMPLE	96.10	83.61	CUMPLE
19	0.85	0.45	0.36	13.50	0.138	11%	CUMPLE	98.04	87.25	CUMPLE
20	0.85	0.44	0.35	13.00	0.131	13%	CUMPLE	99.31	86.03	CUMPLE
21	0.84	0.45	0.37	12.50	0.140	21%	NO CUMPLE	89.38	70.61	NO CUMPLE
22	0.83	0.45	0.37	13.50	0.138	14%	CUMPLE	97.69	84.01	CUMPLE
23	0.82	0.46	0.37	13.00	0.140	13%	CUMPLE	93.15	81.04	CUMPLE
24	0.84	0.45	0.34	12.40	0.129	11%	CUMPLE	96.48	85.87	CUMPLE

Análisis de los resultados.

Una vez que se ha determinado el contenido de humedad de cada uno de los fardos con el equipo F-2000, se ha realizado la figura 64 donde se muestra un resumen de los valores obtenidos.

Figura 64

Valores de contenidos de humedades de los fardos de paja de arroz.



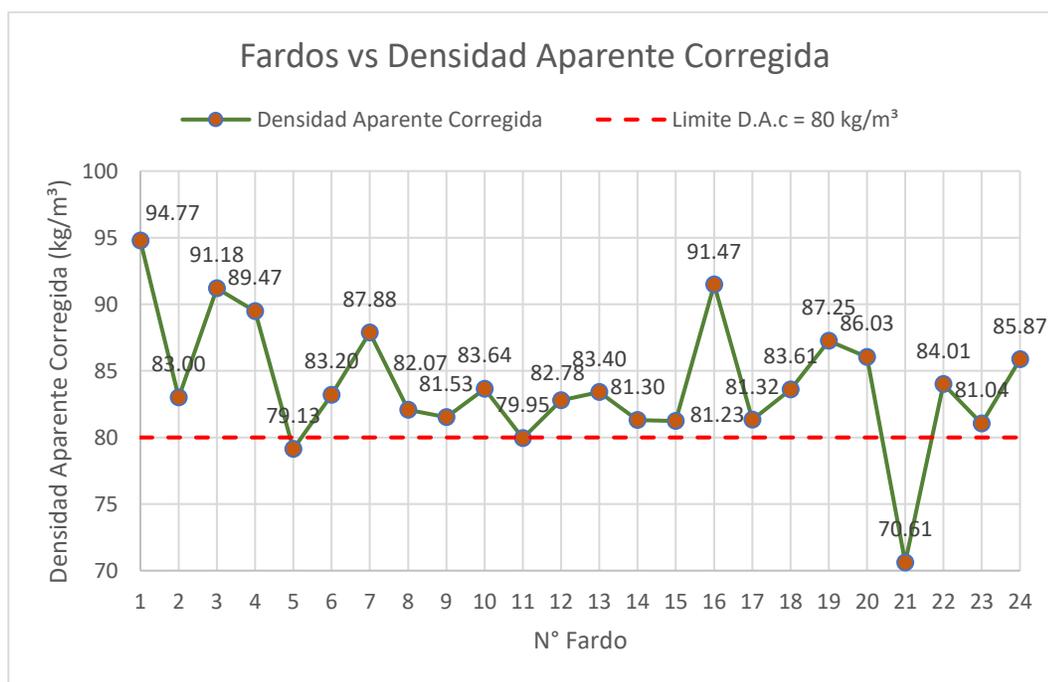
Por lo tanto, se puede observar que los valores de los contenidos de humedades de los 24 fardos de paja arroz varían desde 11 % hasta 21 %, el promedio resultante de los mismos es igual a 13 %. Uno de los fardos presenta un contenido de humedad igual a 21 %, el cual es superior al máximo permitido del 20 % conforme al (Código Residencial Internacional , 2018), mientras que los 23 fardos restantes presentan valores de contenido de humedades por debajo del límite máximo permitido.

De esta manera se puede decir que los fardos elaborados a base de paja arroz son aptos para ser utilizados en la construcción de viviendas, debido a que el 96 % de los fardos presentan un contenido de humedad inferior al 20 % y tan solo el 4 % supera este valor.

En la figura 65, se presenta los valores de las densidades aparentes corregidas de los 24 fardos de paja de arroz, habiéndose obtenido previamente las dimensiones de los lados, pesos, volúmenes de los mismos y siguiendo las recomendaciones indicadas en el apartado anterior.

Figura 65

Valores de densidades aparentes corregidas de los fardos de paja de arroz.



El promedio de las densidades aparentes corregidas de los 24 fardos es igual a 84 kg/m³, dos de los fardos presentan densidades por debajo del valor permitido de 80 kg/m³ y uno de aquellos presenta un valor igual a este. Los 21 fardos restantes cuentan con valores de densidades por encima de los 80 kg/m³, de esta manera se puede decir que los fardos de paja de arroz pueden ser utilizados en la construcción de viviendas debido a que el 92 % de los fardos presentan valores de densidades superiores o iguales a 80 kg/m³, mientras que solo el 8 % restante presenta densidades que están por debajo del valor permitido.

Capítulo IV

Diseño y caracterización de morteros a base de cal para utilizarse como revoco en paneles de paja de arroz y marcos de madera

El presente capítulo de esta investigación se enfoca en el diseño y caracterización de morteros a base de cal para ser usados como recubrimiento en paredes estructurales construidas con fardos de paja y que cumplan con una resistencia a compresión mínima de 6.89 MPa, conforme la tabla 8 que se indica a continuación y que establece el (Código Residencial Internacional , 2018) en su apéndice S - Construcción con paja.

Tabla 8

Resistencia a la compresión mínima de revocos a utilizarse en paredes estructurales construidas con paja.

Tipo de Revoco	Resistencia Mínima a la Compresión	
	PSI	MPa
Arcilla	100	0.69
Suelo - Cemento	1000	6.89
Cal	600	4.14
Cemento - Cal	1000	6.89
Cemento	14000	9.65

Nota. Recuperado de (Código Residencial Internacional , 2018)

Los morteros en las construcciones con paja, son utilizados como recubrimiento o revoco de paredes y deben cumplir varias funciones importantes, por ejemplo, una pared construida con paja la cual ha sido revocada a ambas caras puede alcanzar una resistencia al fuego entre 1.5 horas hasta más de 2 horas (Teslik, 2021), lo cual sin ser revocada estos resultados serían inferiores, además otras investigaciones como la realiza por (Viera, Aguirre, & Monzó, 2020) indican que los morteros elevan la resistencia a compresión de los fardos y que depende del espesor del recubrimiento para que este valor sea aún más alto.

El mortero a más de su resistencia a compresión la cual no debe ser inferior a 6.89 MPa también debe ser permeable, ya que su función debido a la presencia de la paja es controlar la humedad dentro y fuera del panel con la finalidad de aumentar la durabilidad de las edificaciones. Aquellos que han sido fabricados con cemento son impermeables y por lo tanto no son aptos para ser utilizados en estos fines (Walker, Thomson, & Maskell, 2020), los morteros donde se ha incluido la cal como parte de su mezcla presentan aceptable permeancia y permeabilidad (Pavia & Brennan, 2018), de tal manera que evitan la pudrición de la paja, además son considerados como sostenibles ya que disminuyen la huella de carbono y como consecuencia el impacto ambiental, cuentan con menor energía embebida que los morteros a base de cemento (Quirós, 2018),

Por este motivo se ha visto la necesidad de estudiar morteros elaborados a base de cal como sustitución parcial o total del cemento y que cumplan con los requerimientos que se establecen en las normativas y códigos para ser utilizados en las construcciones con paja. Se evidenció que estas mezclas no pueden contener 100% cal debido a que este material en los morteros genera tiempos de fraguados lentos y resistencias bajas a edades tempranas (Pahlavan, Manzi, Sansonetti, & Chiara, 2018), por lo tanto, es necesario incluir el cemento en los morteros a base de cal y dar un enfoque a esta parte de la investigación respecto a la optimización de la cantidad de cemento y cal en las mezclas, con el fin de mejorar los tiempos de fraguado y cumplir con la resistencia mínima de compresión requerida de 6.89 MPa que únicamente con la cal no sería posible.

Materiales seleccionados para el diseño del mortero de recubriendo

Los materiales seleccionados en el diseño y caracterización de los morteros para ser empleados como recubrimiento o revoco en paneles estructurales a base de paja de arroz y marcos de madera son los siguientes: cal, cemento, agregado fino tradicional (arena) y agua. Debido a que el mortero ocupa un volumen considerablemente grande en el panel este aumenta de igual manera su peso significativamente, lo que ocasiona que el esfuerzo físico

como los costos de operación sean mayores durante el proceso de construcción de las edificaciones, por lo tanto, se vio la necesidad de emplear otro agregado fino como la perlita que sustituya al agregado fino tradicional, con la finalidad de obtener morteros de baja densidad y como consecuencia reducir los costos de operación y el peso propio de estas edificaciones.

Debido a que la cal en los morteros retarda los tiempos de fraguado y reduce las resistencias de los mismos a edades tempranas, es necesario considerar la posibilidad de utilizar aditivos acelerantes que reduzcan estos tiempos y que además permitan alcanzar su resistencia mínima a compresión a los 28 días de 6.89 MPa como lo indica el código el (Código Residencial Internacional , 2018) en su apéndice S - Construcción con paja.

La resistencia a compresión mínima se basa en el código europeo antes señalado al no existir en nuestro país una normativa para las construcciones con paja, la (NTE INEN 2518, 2010) es la que se apega más a esta investigación y presenta una clasificación de los morteros para mampostería (M, S, N, O) elaborados con cemento y cal respecto a la resistencia mínima obtenida a los 28 días de edad, a continuación, en la tabla 9 se muestra esta clasificación:

Tabla 9

Clasificación de los morteros de cemento y cal para mampostería de acuerdo a su resistencia

Mortero	TIPO	Resistencia Mínima a la Compresión a 28 días
		MPa
Cemento y Cal	M	17.20
	S	12.40
	N	5.20
	O	2.40

Nota. Recuperado de (NTE INEN 2518, 2010)

Para el mortero a diseñarse en esta investigación y haciendo referencia a la tabla anterior que se muestra en la (NTE INEN 2518, 2010), se lo puede clasificar como un mortero tipo N elaborado con cemento y cal, ya que es el que se aproxima mucho más a la resistencia mínima objetivo de 6.89MPa. El mortero tipo N es utilizado para mamposterías sobre el nivel del suelo debido a su buena resistencia y trabajabilidad, se lo puede usar para el revestimiento de paredes exteriores o superficies que estén expuestas (González J. , 2016).

Cemento

El cemento de acuerdo a la norma (NTE INEN 151, 2010) se lo puede definir como un material que se utiliza en la construcción y que se obtiene a partir de la pulverización de clinker (calcinación de calizas y arcillas) y otras adiciones. Al entrar en contacto con el agua el cemento produce una reacción química lo que causa que este fragüe y se endurezca rápidamente, es por este motivo que recibe el nombre de cemento hidráulico. Según la norma (NTE INEN 2380, 2011), los cementos hidráulicos se los puede clasificar en GU, HE, MS, HS, MH y LH, en la tabla 10 se indica la principal característica de cada uno de estos.

Tabla 10

Clasificación de los cementos hidráulicos

TIPO	Característica
GU	Para construcciones en general
HE	Alta resistencia inicial
MS	Moderada resistencia a los sulfatos
HS	Alta resistencia a los sulfatos
MH	Moderado calor de hidratación
LH	Bajo calor de hidratación

Nota. Recuperado de (NTE INEN 2380, 2011)

El cemento utilizado para el diseño de los morteros de recubrimiento en esta investigación es el tipo HS, que al igual que el GU se lo puede ocupar para cualquier uso en las construcciones ya sea en hormigones y en morteros. Una de sus principales características es

aportar a los morteros resistencias altas a edades tempranas, además de ofrecer durabilidad en los mismos ante los agentes agresivos como la lluvia, desechos industriales, aguas servidas entre otros.

Cal Hidratada Ca(OH)_2

La cal hidratada es conocida también como hidróxido de calcio su fórmula química es Ca(OH)_2 , se la utiliza en la mayoría de casos como aglomerante en las mezclas de morteros. En esta ocasión se utilizó cal extraída de la calera La Paz, ubicada en la provincia del Carchi en el cantón Montufar, vía a la gruta de la Paz, su proceso de extracción y producción es 100% de forma artesanal mediante el uso de maquinaria y herramientas menores. Se optó en utilizar esta cal ya que en el estudio realizado por (Viera & Acero, 2022), se concluye que de todas las cales producidas en Ecuador (Indami, Incoreg, San José, San Juan y La Paz) se logra obtener la mayor resistencia en los morteros con aquella proveniente de la calera la Paz, cuyo antecedente es importante en esta investigación a fin de cumplir con la resistencia objetivo de 6.89MPa en morteros de recubrimiento para las construcciones con paja.

Agregado Fino (Arena)

Para el caso del agregado fino tradicional se utilizó arena extraída de la cantera ubicada parroquia de Pintag al sur de la ciudad de Quito, vía a la reserva ecológica Antisana. En la figura 66 se muestra la ubicación y las coordenadas del lugar ($0^{\circ}25'15.4''\text{S}$ $78^{\circ}21'32.2''\text{W}$), este agregado triturado es fácil de reconocer por su color rojizo característico, como se puede observar en figura 67 que fue obtenida en la visita a la cantera.

Varias investigaciones señalan que este material cuenta con aceptables propiedades ya que al ser incluido en las mezclas de morteros aporta mayor resistencia a compresión a comparación con otros agregados finos. En los siguientes apartados se lo caracterizará mediante la obtención de sus propiedades mecánicas como capacidad de absorción, módulo de finura, densidad aparente suelta y compactada, peso específico entre otras más.

Figura 66

Ubicación de la cantera donde se obtuvo el agregado fino tradicional (Arena).



Nota. Recuperado de (Google Earth, 2023)

Figura 67

Agregado fino tradicional procedente de Pintag.



Agregado Fino (Perlita)

Como parte de esta investigación se ha visto la posibilidad de estudiar en las mezclas de mortero la sustitución de la arena tradicional por otro agregado fino como la perlita, que a más de contribuir con buena resistencia también permita reducir el peso propio en estos

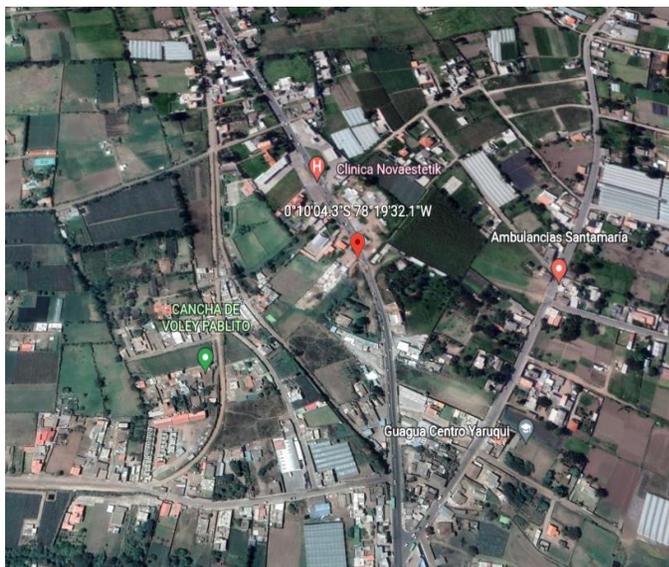
paneles, debido a la cantidad considerable de mortero que contiene en sus caras y por ende el aumento importante en su peso, lo cual no es beneficioso en las construcciones.

La perlita es un material de origen volcánico, cuenta con porosidad y tiene propiedades puzolánicas (Artigas, Quintana, Positieri, & Oshiro, 2022), su apariencia es muy similar a las bolitas de poliestireno, se la utiliza en el campo de la construcción para brindar mayor ligereza, mejorar las propiedades acústicas y térmicas (Mir, Nehme, & Assaad, 2020). Puede retener agua en la superficie, es de color blanco y además cuenta con baja densidad, en nuestro país aún no se han desarrollado investigaciones importantes respecto sobre su uso en morteros.

Este material se lo pudo conseguir en una cantera ubicada en la parroquia de Yaruquí (0°10'04.3"S 78°19'32.1"W), al Este de la ciudad de Quito, vía al Quinche como se indica en la figura 68, es importante señalar que este material se lo consigue fácilmente en Ecuador principalmente en las provincias de Tungurahua, Cotopaxi y Pichincha, su costo es muy similar al del agregado fino tradicional.

Figura 68

Ubicación de la cantera donde se obtuvo el agregado fino (Perlita).



Nota. Recuperado de (Google Earth, 2023)

Aditivo

Debido a la inclusión de la cal a las mezclas de morteros, lo cual produce en los mismos un lento fraguado y por ende reducción en la resistencia a compresión a edades tempranas, se utilizó para su diseño aditivo Plastocrete 161 HE reductor de agua y acelerante de resistencias, con la finalidad de reducir los tiempos de fraguados y alcanzar a los 28 días la resistencia objetivo de 6.89MPa en los morteros de recubrimiento. En la figura 67 se muestra el aditivo utilizado en esta investigación.

Figura 69

Aditivo reductor de agua y acelerante Plastocrete 161 HE.



Caracterización de propiedades físico – mecánicas de materiales utilizados para el diseño del mortero de recubrimiento.

Es importante que, para el diseño del mortero de recubrimiento a utilizarse en construcciones con paja, previamente se determine las propiedades físico – mecánicas de los materiales que componen el mismo como la arena, perlita, cemento y cal. Los valores de estas propiedades deberán satisfacer los requerimientos de las normas ecuatorianas INEN y sus similares ASTM, con el objetivo de obtener morteros de excelente calidad y además verificar si estos materiales pueden o no ser utilizarlos en las mezclas de morteros.

Cabe señalar que si bien es cierto los valores de las propiedades físico - mecánicas verifican la calidad de los materiales y definen su uso o no en la mezcla de mortero, también sirve como punto de partida para el diseño del mismo, independientemente del método que se utilice. Las propiedades físico – mecánicas se determinaron en las instalaciones del Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Hormigón (INECYC) que cumple con las normativas técnicas para la realización de los ensayos.

Con el objetivo de determinar las propiedades físico - mecánicas del agregado fino tradicional y la perlita, se realizaron los siguientes ensayos:

- Peso específico: Norma NTE INEN 856 y similar ASTM C – 127.
- Densidad aparente suelta: Norma NTE INEN 858 y similar ASTM C – 29.
- Densidad aparente compactada: Norma NTE INEN 858 y similar ASTM C – 29.
- Contenido de humedad: Norma NTE INEN 862 y similar ASTM C – 566.
- Capacidad de absorción: Norma NTE INEN 856 y similar ASTM C – 127.
- Módulo de finura: Norma: NTE INEN 696, NTE INEN 2536 y similar ASTM C – 136.
- Colorimetría: Norma NTE INEN 855 y similar ASTM C - 40

Mientras que para determinar las propiedades físico – mecánicas del cemento y la cal, se realizaron los siguientes ensayos:

- Densidad: Norma NTE INEN 156 y similar ASTM C 144

Cabe señalar que para tener una mayor confiabilidad en los resultados de las propiedades físico – mecánicas de los materiales se realizaron por duplicado cada uno de los ensayos, con el objetivo de verificar en primer lugar una similitud entre los mismo y después determinar el promedio entre los mismos.

Árido Fino (Arena)

- **Peso Específico**

Se define al peso específico como la relación entre la masa y el volumen que puede ocupar el agregado fino en un determinado espacio, sin considerar la presencia de vacíos. El valor del peso específico se lo expresa en kg/m^3 , (NTE INEN 856, 2010).

Norma a seguir:

Para determinar el peso específico de la arena tradicional procedente de la parroquia de Pintag, se siguieron los procedimientos, indicaciones y parámetros que rige la norma NTE INEN 856. "Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino".

Materiales:

- Balanza: Capacidad de 1 kg o más, sensibilidad de 0.1 g y una precisión de 0.1%.
- Picnómetro: El volumen contenido dentro del mismo sea legible para $\pm 0.1 \text{ cm}^3$, capacidad $\pm 500 \text{ ml}$.
- Muestra de árido fino: Considerar una cantidad suficiente para realizar el ensayo.
- Molde y compactador para ensayo de humedad superficial: Molde metálico con espesor mínimo de 0.8 mm y forma de cono trucado, diámetro superior $40 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$, diámetro de la base de $90 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ y altura de $75 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$. Compactador metálico con masa $340 \text{ g} \pm 15 \text{ g}$ y diámetro de $25 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$.
- Bandejas o contenedores
- Embudo
- Pipeta

Procedimiento:

- Dejar remojando la muestra de árido fino durante 24 horas.
- Una vez que haya transcurrido el tiempo se deberá secar la muestra hasta obtenerla en estado S.S.S.
- Con ayuda de la balanza tomar el peso del picnómetro vacío y también cuando esté lleno de agua hasta la marca de 500 ml.
- Introducir en el picnómetro vacío 250 gramos de árido fino en estado S.S.S y pesar en la balanza.
- Llenar el picnómetro de agua hasta la marca de 500 ml cuando el árido fino en estado S.S.S ya se haya colocado dentro del mismo, girar el picnómetro con movimientos circulares para sacar los vacíos generados, posteriormente tomar el peso del conjunto y anotarlo.

Ecuaciones:

$$Mass = (M_{picv} + Mass) - M_{picv}$$

$$V.des = (M_{picc} - M_{picv}) - [(M_{pic} + Mass + M_{ll}) - (M_{pic} + Mass)]$$

$$\gamma_{arena} = \frac{Mass}{V.des}$$

Donde:

Mass = Masa de la arena en estado S.S.S [g]

M_{picv} = Masa del picnómetro vacío [g]

M_{picc} = Masa del picnómetro calibrado [g]

M_{ll} = Masa del agua contenida en el picnómetro [g]

V.des = Volumen desalojado por el árido fino [cm³]

γ_{arena} = Peso específico de la arena [g/ cm³]

Ensayo:

En la figura 70, se indica las imágenes sobre el procedimiento del ensayo realizado para la obtención del peso específico de las dos muestras de árido fino (arena).

Figura 70

Ensayo realizado para obtención del peso específico del árido fino.

**Resultados:**

En la tabla 11, se indica los resultados del peso específico de las dos muestras ensayadas de árido fino, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones antes señaladas.

Tabla 11

Peso específico para muestra 1 y 2 de árido fino (arena)

Peso específico o densidad volumétrica de los áridos				
Árido fino (Arena)				
Descripción	Muestra 1		Muestra 2	
a. Masa Picnómetro vacío	142.00	g	142.00	g
b. Masa Picnómetro + Arena en estado SSS	717.40	g	583.40	g
c. Masa de la Arena en estado SSS	575.40	g	441.40	g
d. Masa del Picnómetro calibrado	654.00	g	654.30	g
e. Masa del Picnómetro + Arena SSS +Líquido	990.20	g	911.80	g
f. Volumen desalojado	239.20	cm ³	183.90	cm ³
Peso Específico de la Arena	2.41	g/cm³	2.40	g/cm³
	2406	kg/m³	2400	kg/m³

- **Capacidad de absorción**

Se define como capacidad de absorción a la propiedad que mide el porcentaje de agua que puede almacenar un árido, luego de remojarlo completamente en agua y secarlo superficialmente, lo que representan las condiciones que los áridos adquieren dentro de una mezcla de hormigón o mortero. La arena posee poros que pueden ser saturables o su vez no saturables, pero dependen de otras propiedades del agregado como de su porosidad. Estos pueden encontrarse en 4 estados diferentes: totalmente secos, parcialmente secos, saturados superficialmente y totalmente húmedos, (NTE INEN 856, 2010).

Norma a seguir:

Para determinar la capacidad de absorción de la arena tradicional procedente de la parroquia de Pintag, se siguieron los procedimientos, indicaciones y parámetros que rige la norma NTE INEN 856. “Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino”.

Materiales:

- Balanza: Capacidad de 1 kg o más, sensibilidad de 0.1 g y una precisión de 0.1%.

- Muestra de árido fino: 500 g de árido fino en estado S.S.S
- Horno: Temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Molde y compactador para ensayo de humedad superficial: Molde metálico con espesor mínimo de 0.8 mm y forma de cono truncado, diámetro superior $40 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$, diámetro de la base de $90 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ y altura de $75 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$. Compactador metálico con masa $340\text{g} \pm 15 \text{ g}$ y diámetro de $25 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$.
- Bandejas o contenedores
- Embudo
- Pipeta

Procedimiento:

- Dejar remojando la muestra de árido fino durante 24 horas.
- Una vez que haya transcurrido el tiempo secar la muestra hasta obtenerla en estado S.S.S.
- Medir el peso de un recipiente vacío con ayuda de la balanza.
- Colocar el recipiente sobre la balanza y encerrar la misma, proceder a colocar sobre este 250 g de árido fino en estado S.S.S.
- Colocar la muestra con el recipiente en el horno a $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$, por un tiempo de 24 horas.
- Después de que haya transcurrido las 24 horas, sacar la muestra del horno y dejarla enfriar por un tiempo prudente.
- Tomar el peso de la muestra más el recipiente cuando ya se haya enfriado.

Ecuaciones:

$$C.A = \frac{Mass - Marenash}{Marenash} * 100$$

Donde:

C.A = Contenido de absorción [%]

Mass = Masa de la arena en estado S.S.S [g]

Marenash= Masa de la arena seca al horno [g]

Resultados:

En la tabla 12, se indica los resultados de la capacidad de absorción de las dos muestras ensayadas de árido fino, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones antes señaladas.

Tabla 12

Capacidad de absorción para muestra 1 y 2 de árido fino (arena)

Capacidad de absorción de los áridos				
Árido fino (Arena)				
Descripción	Muestra 1		Muestra 2	
h. Masa de la arena en estado SSS + recipiente	580.50	g	578.60	g
i. Masa de la arena seca al horno + recipiente	569.50	g	567.50	g
j. Masa del recipiente que contiene la arena	80.10	g	77.60	g
k. Masa de la arena en estado SSS	500.40	g	501.00	g
l. Masa de la arena seca al horno	489.40	g	489.90	g
Capacidad de absorción de la arena	2.25	%	2.27	%

- **Contenido de Humedad**

Se define al contenido de humedad como la cantidad de agua que se encuentra dentro de un material debido a su porosidad y que se lo puede medir en porcentaje, un material está completamente libre de agua cuando posee un contenido de humedad del 0%. Es importante conocer este valor en los áridos cuando se desea diseñar un hormigón o mortero, ya que se tiene una cierta cantidad de agua inicialmente que se encuentra almacenada en los poros de los áridos, conociendo este valor se podrán realizar las debidas correcciones a la cantidad de agua de mezclado y así evitar posibles variaciones en el diseño de mezclas, (NTE INEN 862, 2011)

Norma a seguir:

Para determinar el contenido de humedad de la arena tradicional procedente de la parroquia de Pintag, se siguieron los procedimientos, indicaciones y parámetros que rige la norma NTE INEN 862. "Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad".

Materiales:

- Balanza: Capacidad de 1 kg o más, sensibilidad de 0.1 g y una precisión de 0.1%.
- Muestra de árido fino: 350 g de árido fino seco al aire.
- Horno: Temperatura de 110°C ± 5°C
- Bandejas o contenedores

Procedimiento:

- Medir el peso de un recipiente vacío con ayuda de la balanza.
- Colocar el recipiente sobre la balanza y encerar la misma, proceder a colocar sobre este 350 g de árido fino seco al aire.
- Colocar la muestra en el horno a 100 ± 5°C, por un tiempo de 24 horas.
- Después de que haya transcurrido las 24 horas, sacar la muestra del horno y dejarla enfriar por un tiempo prudente.
- Tomar el peso de la muestra más el recipiente cuando ya se haya enfriado.

Ecuaciones:

$$C.H = \frac{Marenasa - Marenash}{Marenash} * 100$$

Donde:

C.H = Contenido de humedad [%]

Marenasa = Masa de la arena seca al aire [g]

Marenash= Masa de la arena seca al horno [g]

Resultados:

En la tabla 13, se indica los resultados del contenido de humedad de las dos muestras ensayadas de árido fino, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones antes señaladas.

Tabla 13

Contenido de humedad para muestra 1 y 2 de árido fino (arena)

Contenido de humedad de los áridos		
Árido fino (Arena)		
Descripción	Muestra 1	Muestra 2
m. Masa del recipiente	184.20 g	182.50 g
n. Masa de la arena seca al horno + recipiente	531.00 g	528.34 g
o. Masa de la arena seca al horno	346.80 g	345.84 g
p. Masa de la arena seca al aire	350.40 g	349.40 g
Contenido de humedad de la arena	1.04 %	1.03 %

- **Densidad aparente suelta y compactada**

La densidad aparente de los áridos conocida también como peso volumétrico, se define como la masa de una unidad de volumen del árido total, donde a más de tomar en cuenta el volumen de las partículas individuales también se considera el volumen de vacíos que se genera entre ellas, la densidad aparente se la expresa en kg/m^3 y mide el grado de compactación de los áridos, (NTE INEN 858, 2010).

El valor de la densidad aparente suelta en todos los casos será menor a la compactada, debido a que la cantidad de partículas sueltas ocupan un mayor volumen en un espacio determinado, por ende, cuenta con una mayor relación de vacíos ocasionando que su peso sea menor. A diferencia que cuando estas son compactadas, llenan estos espacios aumentando su volumen y peso, los valores de estas propiedades son determinantes para seleccionar las dosificaciones en las mezclas de hormigón y morteros.

Norma a seguir:

Para determinar la densidad aparente suelta y compactada de la arena tradicional procedente de la parroquia de Pintag, se siguieron los procedimientos, indicaciones y parámetros que rige la norma NTE INEN 858. "Áridos. Determinación de la masa unitaria (Peso volumétrico) y porcentaje de vacíos".

Materiales:

- Balanza: Capacidad de 1 kg o más, sensibilidad de 0.1 g y una precisión de 0.1%.
- Varilla: Longitud 60 cm y diámetro 1 cm.
- Recipiente: Masa 629.10 g y volumen 1000 cm³.
- Muestra de árido fino: Cantidad suficiente para llenar el recipiente.
- Horno: Temperatura de 110°C ± 5°C
- Bandeja pequeña.
- Pala pequeña.

Procedimiento densidad aparente suelta:

- Secar la muestra de árido fino de preferencia en el horno a una temperatura constante de 110°C ± 5°C.
- Medir el peso del recipiente vacío y su volumen a su máxima capacidad, registrar estos valores.
- Utilizando la pala pequeña llenar el recipiente con arena y retirar el excedente con ayuda de la varilla, realizando movimientos horizontales y sin compactar.
- Utilizando la balanza pesar el recipiente lleno de arena cuidadosamente y registrar estos valores.
- Repetir los pasos anteriores por dos más ocasiones y registrar los resultados obtenidos.

Procedimiento densidad aparente compacta:

- Secar la muestra de árido fino de preferencia en el horno a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Medir el peso del recipiente vacío y su volumen a su máxima capacidad, registrar estos valores.
- Utilizando la pala pequeña llenar el recipiente con arena hasta un tercio de su capacidad y con la varilla realizar una compactación de 25 golpes de adentro hacia a fuera formando un espiral.
- Llenar el recipiente un tercio más de su capacidad y realizar la compactación de la misma forma anteriormente indicada.
- Terminar de llenar el recipiente con el árido fino y realizar una última compactación de 25 golpes.
- Retirar el excedente de arena con ayuda de la varilla, realizando movimientos horizontales y sin compactar.
- Utilizando la balanza pesar el recipiente lleno de arena cuidadosamente y registrar estos valores.
- Repetir los pasos anteriores por dos ocasiones más y registrar los resultados obtenidos.

Ecuaciones:

$$Masr = \frac{Masr1 + Masr2 + Masr3}{3}$$

$$D.A.S = \frac{Masr - Mrv}{Vrv}$$

$$Macr = \frac{Macr1 + Macr2 + Macr3}{3}$$

$$D.A.C = \frac{Macr - Mrv}{Vrv}$$

Donde:

M_{sr} = Masa promedio de la arena suelta + recipiente [g]

M_{cr} = Masa promedio de la arena compactada + recipiente [g]

M_{rv} = Masa del recipiente vacío [g]

V_{rv} = Volumen del recipiente vacío [cm³]

Ensayo:

En la figura 71, se indica las imágenes sobre el procedimiento del ensayo realizado para la obtención de la densidad aparente suelta y compactada para las muestras de árido fino (arena).

Figura 71

Ensayo realizado para obtención de la densidad suelta y compactada del árido fino (arena).



Resultados:

En la tabla 14 y 15, se indican los resultados de la densidad aparente suelta y compactadas de las dos muestras ensayadas de árido fino, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones antes señaladas.

Tabla 14

Densidad aparente suelta y compacta para la muestra 1 de árido fino (arena)

Densidad suelta y compactada de los áridos							
Árido fino (Arena)							
Masa del recipiente vacío		=	629.10		g		
Volumen del recipiente vacío		=	1000.00		cm ³		
Árido suelto			Árido compactado				
Masa de arena + recipiente	=	2040.10	g	Masa de arena + recipiente	=	2219.20	g
	=	2044.30	g		=	2235.50	g
	=	2042.50	g		=	2240.20	g
Promedio	=	2042.30	g	Promedio	=	2231.63	g
Densidad aparente suelta	=	1.41	g/cm³	Densidad aparente compactada	=	1.60	g/cm³
	=	1413	kg/m³		=	1603	kg/m³

Tabla 15

Densidad aparente suelta y compacta para la muestra 2 de árido fino (arena)

Densidad suelta y compactada de los áridos							
Árido fino (Arena)							
Masa del recipiente vacío		=	629.10		g		
Volumen del recipiente vacío		=	1000.00		cm ³		
Árido suelto			Árido compactado				
Masa de arena + recipiente	=	2043.50	g	Masa de arena + recipiente	=	2224.50	g
	=	2042.70	g		=	2215.50	g
	=	2044.40	g		=	2219.70	g
Promedio	=	2043.53	g	Promedio	=	2219.90	g
Densidad aparente suelta	=	1.41	g/cm³	Densidad aparente compactada	=	1.59	g/cm³
	=	1414	kg/m³		=	1590.80	kg/m³

- **Módulo de Finura**

Para determinar el módulo de finura de un árido es necesario realizar el ensayo de granulometría del mismo, que se refiere a la distribución del tamaño de sus partículas y se obtiene mediante el uso de tamices. Un tamiz es un objeto formado por una malla de tela o metal que se encuentra sujeta por un aro, cuya función es separar de los áridos las

partículas finas de las gruesas. Esta propiedad es importante ya que define otras propiedades de los mortero u hormigones como su trabajabilidad, durabilidad, contracción, economía, así también la relación agua cemento, (NTE INEN 696, 2011).

Para realizar este ensayo se deberá ocupar tamices con diferentes aberturas que vienen estandarizadas en las normas y que permiten identificar la distribución de las partículas que conforman los áridos finos. A este conjunto de tamices se lo conoce como serie de Tyler, que se identifican por un número que corresponde al tamaño de la abertura de cada tamiz y que se mide en pulgada lineal. El módulo de finura obtenido a partir del análisis granulométrico se define como un índice que describe de forma aproximada la proporción de partículas finas y gruesas de un árido, se determina mediante la relación entre la suma de las cantidades acumuladas de las partículas correspondientes a los tamices que constituyen la serie de Tyler y la cantidad total del árido (100%).

A medida que el valor del módulo de finura es mayor el árido es considerado como grueso, mientras que si este valor es menor se considera como fino, la Norma (NTE INEN 872, 2011) establece que el módulo de finura de un árido fino puede ser mayor a 2.3 e inferior a 3.5.

Norma a seguir:

Para determinar el módulo de finura de la arena tradicional procedente de la parroquia de Pintag, se siguieron los procedimientos, indicaciones y parámetros que rige la norma NTE INEN 696. "Áridos. Análisis granulométrico en los áridos", además se consideró los límites granulométricos de la norma NTE INEN 2536. "Áridos para uso en morteros para mampostería. Requisitos" que se utilizan cuando el árido fino es parte de un mortero que se emplea en las mamposterías.

Materiales:

- Balanza: Capacidad de 1 kg o más, sensibilidad de 0.1 g y una precisión de 0.1%.
- Recipientes: Diferentes tamaños y pesos.

- Agitador mecánico de tamices.
- Tamices: 4 ;8 ;16 ;30 ;50 ;100; 200
- Cepillo de alambre
- Muestra: 500 g a 600 g de árido fino.
- Horno: Temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Pala pequeña.

Procedimiento:

- Secar la muestra de árido fino de preferencia en el horno a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Ordenar los tamices de acuerdo al tamaño de su abertura de menor a mayor y colocarlos verticalmente de forma ascendente.
- Dejar caer cuidadosamente la muestra de árido fino sobre el tamiz N° 4, posteriormente colocar la tapa protectora encima del mismo para evitar pérdidas de finos durante el ensayo.
- Llevar todo el bloque de tamices hacia el agitador mecánico y colocar los seguros correspondientes antes de encenderlo.
- Cerrar la compuerta del agitador mecánico y programarlo durante un tiempo prudente, aproximadamente 5 minutos.
- Sacar el conjunto de tamices del agitador y pesar la cantidad de árido que retuvo cada tamiz, realizar este procedimiento con ayuda de recipientes donde se colocará estas cantidades y posteriormente se procederá a obtener su peso en la balanza.
- Verificar que toda la cantidad de árido salga de los tamices, si es necesario ayudarse de una brocha o de un cepillo de alambre.
- Anotar estos pesos y proceder a determinar el módulo de finura.

Ecuaciones:

$$\%Ret = \frac{Masa.A}{Masa.T} * 100$$

$$\%Pasa = 100 - \%Ret$$

$$M.F = \frac{\Sigma\%Ret}{100}$$

Donde:

Masa.A = Masa retenida acumulada por el tamiz de la serie de Tyler [g].

Masa.T = Masa total retenida acumulada en la bandeja final [g].

%Ret = Porcentaje de peso retenido por el tamiz de la serie de Tyler [%].

%Pasa = Porcentaje de peso que pasa por el tamiz de la serie de Tyler [%].

$\Sigma\%Ret$ = Suma de porcentajes de los pesos retenidos por los tamices de la serie de Tyler [%].

MF = Módulo de finura del árido fino.

Ensayo:

En la figura 72, se indica las imágenes sobre el procedimiento del ensayo de granulometría realizado para la obtención del módulo de finura de las muestras de árido fino (arena).

Figura 72

Ensayo realizado para obtención del módulo de finura del árido fino (arena).



Resultados:

En la tabla 16, se indica los resultados obtenidos del ensayo de granulometría de la primera muestra ensayada de árido fino, estos permiten determinar la curva granulométrica del árido que se indica en la figura 73.

Tabla 16

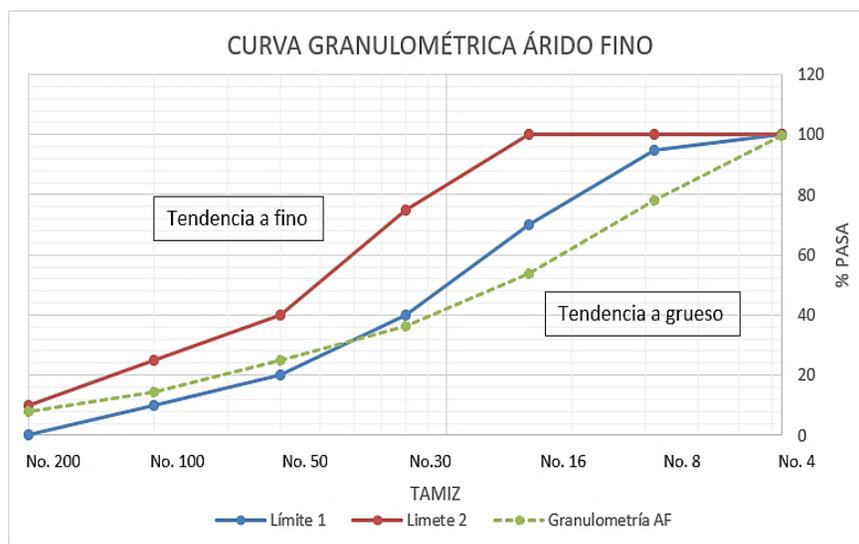
Ensayo de granulometría muestra 1 de árido fino (arena)

N°	Tamiz		Retenido		%	%	Límites Específicos		
	Número	Tamaño	Parcial	Acumulado	Retenido	Pasa			
		mm	g	g					
2	No. 4	4.750	0.80	0.80	0.14	99.86	100	-	100
3	No.8	2.360	123.20	124.00	22.02	77.98	95	-	100
4	No. 16	1.180	136.40	260.40	46.25	53.75	70	-	100
5	No. 30	0.600	98.70	359.10	63.78	36.22	40	-	75
6	No. 50	0.300	64.30	423.40	75.20	24.80	20	-	40
7	No. 100	0.150	58.80	482.20	85.65	14.35	10	-	25
8	No. 200	0.075	35.90	518.10	92.02	7.98	0	-	10
9	Bandeja	-	44.90	563.00	100.00	0.00		-	

Masa inicial	=	563.90 g
%ERROR	=	0.16 %
Módulo de finura	=	2.93

Figura 73

Curva granulométrica de la muestra 1 de árido fino (arena).



En la tabla 17, se indica los resultados obtenidos del ensayo de granulometría de la segunda muestra ensayada de árido fino, estos permiten determinar la curva granulométrica del árido que se indica en la figura 74.

Tabla 17

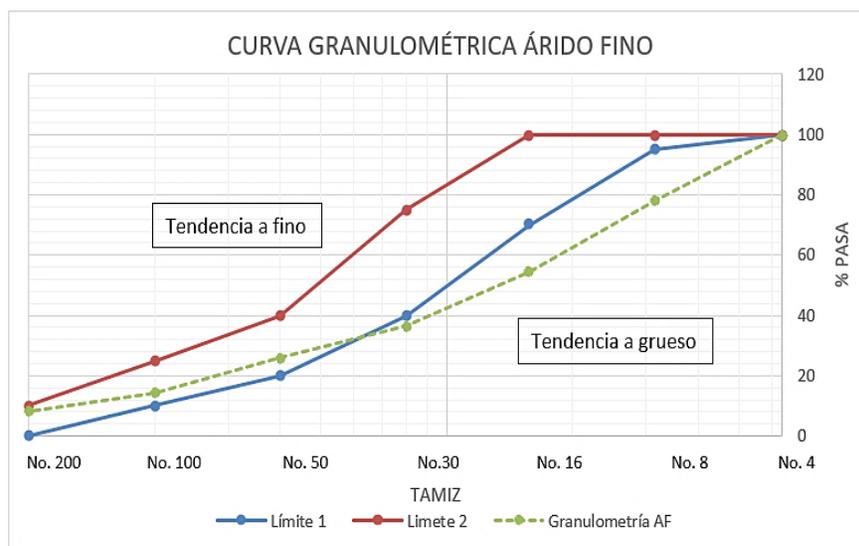
Ensayo de granulometría muestra 2 de árido fino (arena)

N°	Tamiz		Retenido		%	%	Límites Específicos	
	Número	Tamaño	Parcial	Acumulado				
		mm	g	g				
2	No. 4	4.750	0.60	0.60	0.10	99.90	100	- 100
3	No.8	2.360	128.30	128.90	21.87	78.13	95	- 100
4	No. 16	1.180	139.80	268.70	45.58	54.42	70	- 100
5	No. 30	0.600	105.70	374.40	63.51	36.49	40	- 75
6	No. 50	0.300	62.37	436.77	74.10	25.90	20	- 40
7	No. 100	0.150	69.30	506.07	85.85	14.15	10	- 25
8	No. 200	0.075	34.70	540.77	91.74	8.26	0	- 10
9	Bandeja	-	48.70	589.47	100.00	0.00		-

Masa inicial	=	590.50 g
% ERROR	=	0.17 %
Módulo de finura	=	2.91

Figura 74

Curva granulométrica de la muestra 2 de árido fino (arena).



- **Colorimetría**

El ensayo de colorimetría se lo realiza en los áridos finos para determinar la presencia de impurezas orgánicas como restos de plantas y animales que generalmente contienen carbono y nitrógeno. Estas impurezas afectan directamente a propiedades esenciales de los mortero u hormigones como por ejemplo en la resistencia final, trabajabilidad, tiempos de fraguado y durabilidad.

El ensayo de colorimetría consiste en mezclar el árido fino con una solución normalizada de hidróxido de sodio y dejarlo sumergido por 24 horas en un frasco de vidrio. Luego de transcurrido este tiempo el color obtenido en la solución deberá ser comparado por una serie de colores normalizados de la escala Gardner, este color nos indicará el contenido de materia orgánica que contiene el árido fino, con la finalidad de evaluar su uso o no en las mezclas de morteros. A continuación, en la tabla 18, se indica la interpretación de los colores para la solución obtenida del árido fino.

Tabla 18

Escala de colores para interpretación de resultados del ensayo de colorimetría del árido fino (arena)

Color	Interpretación
Blanco, claro o transparente	Árido fino de buena calidad, no contiene materia orgánica
Amarillo pálido	Árido fino de buena calidad, poca materia orgánica
Amarillo encendido	Alta cantidad de materia orgánica, se utiliza para mortero u hormigones de baja densidad
Café	Árido fino de mala calidad, concentraciones elevadas de materia orgánica
Café chocolate	Árido fino de mala calidad

Nota. Recuperado de (NTE INEN 855, 2010).

- **Norma a seguir:**

Para determinar las impurezas orgánicas de la arena tradicional procedente de la parroquia de Pintag, se siguieron los procedimientos, indicaciones y parámetros que rige la norma NTE INEN 855. "Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón".

Materiales:

- Balanza: Capacidad de 1 kg o más, sensibilidad de 0.1 g y una precisión de 0.1%.
- Frasco de vidrio calibrado con tapa.
- Muestra: Cantidad suficiente de árido fino para llenar el frasco de vidrio hasta la marca 130 cm³.
- Sodio (Na): Cantidad 30 g.
- Agua: Cantidad 1000 ml.
- Embudo.
- Vaso de precipitación: Capacidad de 1000 ml o 1000 cm³ y apreciación de 50 ml.

Procedimiento:

- Pesar en la balanza sodio al 3% equivalente a 30 g.
- Mezclar los 30 g de sodio con 1000 ml de agua y dejar reposar la solución.
- Llenar el frasco de vidrio con árido fino hasta la marca de 130 cm³, posteriormente llenarlo con solución de Na (OH) hasta la marca de 200 cm³.
- Tapar el frasco y revolver el conjunto, dejarlo reposar durante 24 horas en un lugar libre de humedad.
- Transcurrido este tiempo, verificar el color de la solución que está dentro del frasco con el árido fino.
- Comparar el color obtenido con la escala Gardner y anotar el resultado.

Ensayo:

En la figura 75, se indica la imagen del ensayo de colorimetría realizado para determinar las impurezas orgánicas de la muestra de árido fino (arena).

Figura 75

Ensayo de colorimetría para obtención de impurezas orgánicas del árido fino (arena).



Resultados:

En la tabla 19, se indica los resultados del ensayo de colorimetría de la muestra de árido fino, por lo tanto, al presentar un color totalmente transparente se logra verificar que el árido no contiene materia orgánica alguna y se lo puede usar sin problema para las mezclas de morteros.

Tabla 19

Resultado de la solución del ensayo de colorimetría para el árido fino (arena)

Colorimetría del árido fino	
a. Procedencia del árido fino	Pintag
b. Color presentado a las 24 horas	Figura 75
c. Observaciones	Material sin presencia de materia orgánica

Agregado Fino (Perlita)

Para la perlita, árido fino procedente de la parroquia Yaruquí, se determinaron las mismas propiedades físico - mecánicas evaluadas en la arena tradicional, por este motivo, en esta parte de la investigación se ha evitado describir nuevamente las normas, materiales, procedimientos y ecuaciones utilizadas ya que son exactamente iguales, la diferencia radica en el árido fino utilizado (perlita). Por lo tanto, a continuación, únicamente se muestran los resultados y figuras de los ensayos realizados con la perlita.

- **Peso Específico**

Ensayo:

En la figura 76, se indica las imágenes sobre el procedimiento del ensayo realizado para la obtención del peso específico de las muestras de perlita.

Figura 76

Ensayo realizado para obtención del peso específico del árido fino (perlita).



Resultados:

En la tabla 20, se indica los resultados del peso específico de las dos muestras ensayadas de perlita, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones descritas en los apartados anteriores.

Tabla 20

Peso específico para muestra 1 y 2 de árido fino (perlita).

Peso específico o densidad volumétrica de los áridos		
Árido fino (Perlita)		
Descripción	Muestra 1	Muestra 2
a. Masa Picnómetro vacío	156.20 g	156.20 g
b. Masa Picnómetro + Arena en estado SSS	370.30 g	378.20 g
c. Masa de la Arena en estado SSS	214.10 g	222.00 g
d. Masa del Picnómetro calibrado	654.10 g	654.30 g
e. Masa del Picnómetro + Arena SSS +Líquido	719.20 g	720.80 g
f. Volumen desalojado	149.00 cm ³	155.50 cm ³
Peso Específico de la perlita	1.44 g/cm³	1.43 g/cm³
	1437 kg/m³	1428 kg/m³

- **Capacidad de absorción**

Resultados:

En la tabla 21, se indica los resultados de la capacidad de absorción de las dos muestras ensayadas de perlita, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones descritas en los apartados anteriores.

Tabla 21

Capacidad de absorción para muestra 1 y 2 de árido fino (perlita).

Capacidad de absorción de los áridos		
Árido fino (Perlita)		
Descripción	Muestra 1	Muestra 2
h. Masa de la arena en estado SSS + recipiente	541.30 g	622.40 g
i. Masa de la arena seca + recipiente	510.80 g	579.20 g
j. Masa del recipiente que contiene la arena	191.30 g	126.90 g
k. Masa de la arena en estado SSS	350.00 g	495.50 g
l. Masa de la arena seca	319.50 g	452.30 g
Capacidad de absorción de la perlita	9.55 %	9.55 %

- **Contenido de Humedad**

Resultados:

En la tabla 22, se indica los resultados del contenido de humedad de las dos muestras ensayadas de perlita, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones descritas en los apartados anteriores.

Tabla 22

Contenido de humedad para muestra 1 y 2 de árido fino (perlita).

Contenido de humedad de los áridos		
Árido fino (Perlita)		
Descripción	Muestra 1	Muestra 2
m. Masa del recipiente	96.90 g	108.70 g
n. Masa de la arena seca al horno + recipiente	441.00 g	452.10 g
o. Masa de la arena seca al horno	344.10 g	343.40 g
p. Masa de la arena seca al aire	393.00 g	392.20 g
Contenido de humedad de la perlita	14.21 %	14.21 %

- **Densidad aparente suelta y compactada**

Ensayo:

En la figura 77, se indica las imágenes sobre el procedimiento del ensayo realizado para la obtención de la densidad aparente suelta y compactada para las muestras de perlita.

Figura 77

Ensayo realizado para obtención de la densidad suelta y compactada del árido fino (perlita).



Resultados:

En la tabla 23 y 24, se indican los resultados de la densidad aparente suelta y compactadas de las dos muestras ensayadas de perlita, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones descritas en los apartados anteriores.

Tabla 23

Densidad aparente suelta y compacta para la muestra 1 de árido fino (perlita)

Densidad suelta y compactada de los áridos					
Árido fino (Perlita)					
Masa del recipiente vacío		=	629.10 g		
Volumen del recipiente vacío		=	1000.00 cm ³		
Árido suelto			Árido compactado		
Masa de arena + recipiente	=	1228.50 g	Masa de arena + recipiente	=	1308.20 g
	=	1231.90 g		=	1312.10 g
	=	1227.10 g		=	1308.30 g
Promedio	=	1229.17 g	Promedio	=	1309.53 g
Densidad aparente suelta	=	0.60 g/cm³	Densidad aparente compactada	=	0.68 g/cm³
	=	600 kg/cm³		=	680 kg/cm³

Tabla 24

Densidad aparente suelta y compacta para la muestra 2 de árido fino (perlita)

Densidad suelta y compactada de los áridos					
Árido fino (Perlita)					
Masa del recipiente vacío		=	629.10 g		
Volumen del recipiente vacío		=	1000.00 cm ³		
Árido suelto			Árido compactado		
Masa de arena + recipiente	=	1220.60 g	Masa de arena + recipiente	=	1298.90 g
	=	1215.50 g		=	1292.80 g
	=	1217.30 g		=	1292.30 g
Promedio	=	1217.80 g	Promedio	=	1294.67 g
Densidad aparente suelta	=	0.59 g/cm³	Densidad aparente compactada	=	0.67 g/cm³
	=	589 kg/m³		=	666 kg/m³

- **Módulo de Finura**

Ensayo:

En la figura 78, se indica las imágenes sobre el procedimiento del ensayo de granulometría realizado para la obtención del módulo de finura de las muestras de perlita.

Figura 78

Ensayo realizado para obtención del módulo de finura del árido fino (perlita).



Resultados:

En la tabla 25, se indica los resultados obtenidos del ensayo de granulometría de la primera muestra ensayada de perlita, estos permiten determinar la curva granulométrica del árido que se indica en la figura 79.

Tabla 25

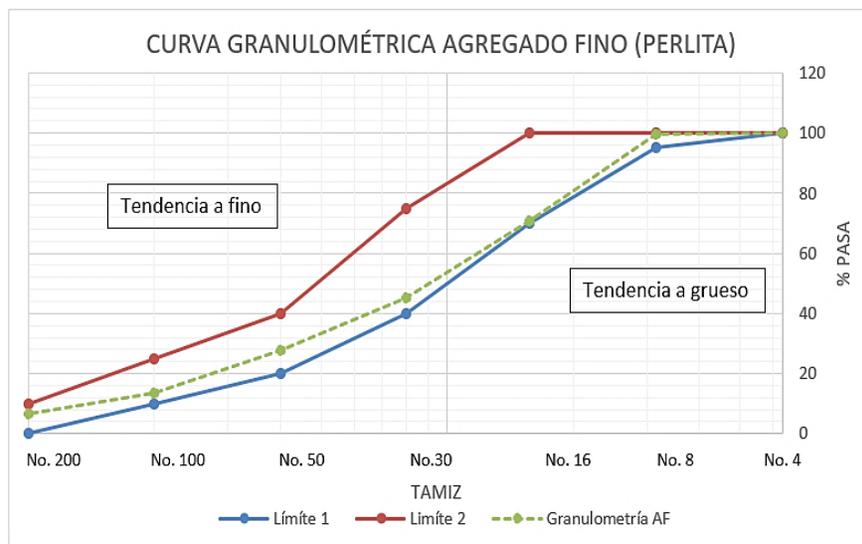
Ensayo de granulometría muestra 1 de árido fino (perlita).

N°	Tamiz		Retenido		%	%	Límites Específicos	
	Número	Tamaño mm	Parcial g	Acumulado g	Retenido	Pasa		
2	No. 4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00	100	- 100
3	No.8	2.360	1.70	1.70	0.31	99.69	95	- 100
4	No. 16	1.180	158.70	160.40	29.24	70.76	70	- 100
5	No. 30	0.600	139.30	299.70	54.64	45.36	40	- 75
6	No. 50	0.300	95.70	395.40	72.09	27.91	20	- 40
7	No. 100	0.150	79.10	474.50	86.51	13.49	10	- 25
8	No. 200	0.075	38.20	512.70	93.47	6.53	0	- 10
9	Bandeja	-	35.80	548.50	100.00	0.00		-

Masa inicial	=	550.00 g
%ERROR	=	0.27 %
Módulo de finura	=	2.43

Figura 79

Curva granulométrica de la muestra 1 de árido fino (perlita).



En la tabla 26, se indica los resultados obtenidos del ensayo de granulometría de la segunda muestra ensayada de perlita, estos permiten determinar la curva granulométrica del árido que se indica en la figura 80.

Tabla 26

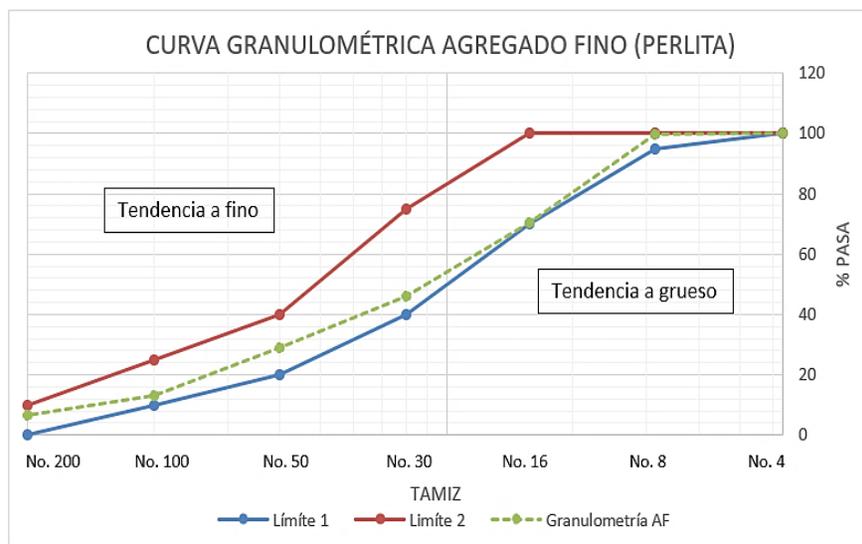
Ensayo de granulometría muestra 2 de árido fino (perlita).

N°	Tamiz		Retenido		%	%	Límites Específicos		
	Número	Tamaño	Parcial	Acumulado					
		mm	g	g					
2	No. 4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00	100	-	100
3	No.8	2.360	1.20	1.20	0.22	99.78	95	-	100
4	No. 16	1.180	160.20	161.40	29.37	70.63	70	-	100
5	No. 30	0.600	134.50	295.90	53.84	46.16	40	-	75
6	No. 50	0.300	95.50	391.40	71.22	28.78	20	-	40
7	No. 100	0.150	86.40	477.80	86.94	13.06	10	-	25
8	No. 200	0.075	36.60	514.40	93.60	6.40	0	-	10
9	Bandeja	-	35.20	549.60	100.00	0.00		-	

Masa inicial	=	550.00 g
% ERROR	=	0.07 %
Módulo de finura	=	2.42

Figura 80

Curva granulométrica de la muestra 2 de árido fino (perlita).



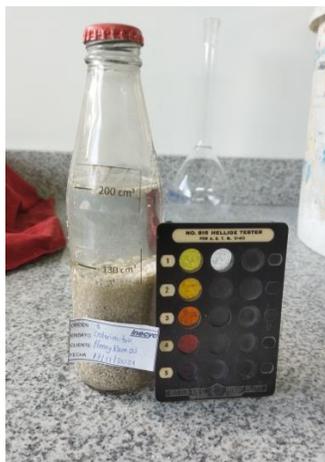
- **Colorimetría**

Ensayo:

En la figura 81, se indica la imagen del ensayo de colorimetría realizado para determinar las impurezas orgánicas de la muestra de árido fino (perlita).

Figura 81

Ensayo de colorimetría para obtención de impurezas orgánicas del árido fino (perlita).



Resultados:

En la tabla 27, se indica los resultados del ensayo de colorimetría de la muestra de perlita, por lo tanto, al presentar un color totalmente transparente se logra verificar que el árido no contiene materia orgánica alguna y se lo puede usar sin problema para las mezclas de morteros.

Tabla 27

Resultado de la solución del ensayo de colorimetría para el árido fino (perlita)

Colorimetría del árido fino	
a. Procedencia del árido fino (perlita)	Yaruquí
b. Color presentado a las 24 horas	Figura 81
c. Observaciones	Material sin presencia de materia orgánica

Cemento

- **Densidad**

Se define como densidad del cemento a la masa de un volumen unitario de sólidos, sin considerar la cantidad de vacíos, generalmente se mide en kg/m^3 . El valor numérico de esta propiedad no determina la calidad del cemento o de la cal, pero en la mayoría de casos se lo utiliza para el cálculo de pesos y volúmenes de morteros u hormigones dentro de un diseño de mezclas, este valor varía entre 2.90 a 3.15 g/cm^3 (NTE INEN 156, 2009). El ensayo que determina la densidad del cemento y de la cal consiste es establecer la relación entre la masa del conglomerante (cal o cemento) y el volumen de líquido que es desplazado por esta masa en el frasco de Le Chatelier, para realizar este ensayo se deberá mantener una temperatura de 20 °C hasta finalizar el mismo (NTE INEN 156, 2009).

- **Norma a seguir:**

Para determinar la densidad del cemento utilizado en esta investigación, se ensayaron dos muestras siguieron los procedimientos, indicaciones y parámetros que rige la norma NTE INEN 156. "Cemento hidráulico. Determinación de la densidad".

Materiales:

- Balanza: Capacidad de 1 kg o más, sensibilidad de 0.1 g y una precisión de 0.1%.
- Frasco de Le Chatelier: Capacidad de 24 ml o 24 cm³ y apreciación de 0.1 ml.
- Vaso de precipitación: Capacidad de 1000 ml o 1000 cm³ y apreciación de 50 ml.
- Pipeta.
- Espátula.
- Cemento: Dos muestras de 500 g.
- Diesel.
- Embudo de metálico pequeño.
- Embudo de vidrio pequeño.

Procedimiento:

- Utilizando el embudo llenar de diesel el frasco de Le Chatelier hasta que el mismo este entre la marca de 0 y 1 cm³, anotar esta medida.
- En la balanza pesar el frasco de Le Chatelier con el diesel y tomar esta lectura.
- Introducir 65 g de cemento en el frasco de Le Chatelier que contiene diesel, realizar este paso cuidadosamente sin que el cemento caiga fuera del frasco.
- Una vez que el cemento se encuentre dentro del frasco de Le Chatelier, hacer girar el mismo sobre la palma de la mano las veces que sean necesarias, con la finalidad de sacar los vacíos que se genera en la mezcla.
- Tomar la marca del volumen final que se desplazó al ingresar los 65 g de cemento y anotar esta medida.

- En la balanza verificar el peso del conjunto, es decir, frasco de Le Chatelier, diesel y cemento, finalmente tomar esta última lectura.
- Lavar el frasco de Le Chatelier con diesel y dejarlo completamente seco.

Ecuaciones:

$$D.C = \frac{\text{Masa } (F + D + C) - \text{Masa } (F + D)}{L.vol.final - L.vol.inicial}$$

Donde:

Masa (F+D+C) = Masa del frasco de Le Chatelier + diesel + cemento [g].

Masa (F+D) = Masa del frasco de Le Chatelier + diesel [g].

L.vol.inicial = Lectura del volumen inicial [ml].

L.vol.final = Lectura del volumen final [ml].

Ensayo:

En la figura 82, se indica la imagen del ensayo realizado para determinar la densidad de las dos muestras de cemento.

Figura 82

Ensayo realizado en el cemento para determinar su densidad.



Resultados:

En la tabla 28, se indica los resultados de la densidad de las dos muestras ensayadas de cemento, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones antes señaladas.

Tabla 28

Ensayo para determinar la densidad de la muestra 1 y 2 de cemento.

Densidad del cemento		
Cemento		
Descripción	Muestra 1	Muestra 2
a. Masa frasco de Le Chatelier + diésel	320.60 g	320.60 g
b. Lectura volumen inicial frasco Le Chatelier	0.10 ml	0.40 ml
c. Masa del frasco de Le Chatelier + diésel + cemento	385.60 g	385.60 g
d. Lectura volumen final en el frasco Le Chatelier	23.40 ml	23.60 ml
Densidad del cemento	2.79 g/cm³	2.80 g/cm³
	2789.70 kg/cm³	2801.72 kg/cm³

Cal

Al igual que en el cemento, para la cal se determinó únicamente el valor de su densidad, por lo tanto, las normas, materiales, procedimientos y ecuaciones utilizadas para el cemento son las mismas que para la cal, estas ya han sido descritas en los apartados anteriores. La diferencia en este ensayo comparándolo con el realizado en el cemento radica en el conglomerante utilizado, a continuación, únicamente se indicará los resultados obtenidos de esta propiedad para las dos muestras de cal.

- **Densidad**

Resultados:

En la tabla 29, se indica los resultados de la densidad de las dos muestras ensayadas de cal, que se obtuvieron utilizando las ecuaciones descritas en los apartados anteriores.

Tabla 29

Ensayo para determinar la densidad de la muestra 1 y 2 de cal.

Densidad de la cal			
Cal			
Descripción	Muestra 1	Muestra 2	
a. Masa frasco de Le Chatelier + diésel	321.90 g	321.50	g
b. Lectura volumen inicial frasco Le Chatelier	0.60 ml	0.60	ml
c. Masa del frasco de Le Chatelier + diésel + cal	373.20 g	371.30	g
d. Lectura volumen final frasco Le Chatelier	24.00 ml	23.10	ml
Densidad de la cal	2.19 g/cm³	2.21	g/cm³
	2192.31 kg/cm³	2213.33	kg/cm³

- **Composición química**

La cal proveniente de la calera la Paz, al ser extraída de forma artesanal no cuenta con una ficha técnica sobre sus características. Por este motivo para evaluar su composición química se ha toma como referencia la investigación realizada por (Viera & Acero, 2022), las autoras realizaron el ensayo de espectrofotometría para esta cal, mostrándose los resultados a continuación en la tabla 30.

Tabla 30

Composición química de la cal de La Paz.

Composición química cal de La Paz	
Composición	Cantidad
Óxido de Magnesio	1,9 %
Óxido de Calcio	36,0 %
Contenido total	37,9 %

Nota. Recuperado de (Viera & Acero, 2022)

Según la norma (NTE INEN 247, 2015) señala que las cales para ser utilizadas en las mamposterías deberán contener un 95% de óxidos de calcio y magnesio, que ninguna de las cales producidas en Ecuador cumple este requisito, sin embargo se decide utilizar esta cal debido a su rápida obtención en nuestro medio, además de que investigaciones como la

realizada por (Viera & Acero, 2022) demuestran que esta aporta mayor resistencia en los morteros a comparación con las otras cales de producción nacional.

Resumen de propiedades físico – mecánicas obtenidas en los materiales utilizados para el diseño del mortero de recubrimiento.

En la tabla 31, se muestra el resumen de las propiedades físico – mecánicas para los áridos finos utilizados en el diseño del mortero de recubrimiento, es decir para la arena y la perlita. Finalmente, estos resultados se utilizarán como punto de partida para el diseño de mezclas del mortero en estudio.

Tabla 31

Propiedades físico – mecánicas obtenidas para la arena y la perlita.

Propiedades físico – mecánicas de los áridos finos (arena y perlita)								
Propiedades Mecánicas	NTE INEN	ASTM	Arena			Perlita		
			Valor 1	Valor 2	Valor Final	Valor 1	Valor 2	Valor Final
Peso específico (g/cm ³)	856	C-127	2,41	2,40	2,41	1,44	1,43	1,44
Densidad Aparente Suelta (g/cm ³)	858	C-29	1,41	1,41	1,41	0,60	0,59	0,60
Densidad Aparente Compactada (g/cm ³)	858	C-29	1,60	1,59	1,60	0,68	0,67	0,68
Contenido de Humedad (%)	862	C-566	1,04	1,03	1,04	14,21	14,21	3,39
Capacidad de Absorción (%)	856	C-127	2,25	2,27	2,26	9,55	9,55	9,55
Módulo de Finura	696	C-136	2,93	2,91	2,44	2,43	2,42	2,43
Colorimetría	855	C-40	SPMO	SPMO	SPMO	SPMO	SPMO	SPMO
SPMO: Sin presencia de materia orgánica								

En la tabla 32, se muestra el resumen de las propiedades físico – mecánicas para los aglomerantes utilizados en el diseño del mortero de recubrimiento, es decir para el cemento y la cal. Finalmente, estos resultados se utilizarán como punto de partida para el diseño de mezclas del mortero en estudio.

Tabla 32

Resumen de las propiedades físico – mecánicas obtenidas para el cemento y la cal.

Densidad para los aglomerantes (cemento y cal)								
Propiedades Mecánicas	NTE INEN	ASTM	Cemento			Cal		
			Valor 1	Valor 2	Valor Final	Valor 1	Valor 2	Valor Final
Densidad (g/cm ³)	156	C-144	2,79	2,80	2,80	2,19	2,21	2,20

Diseño de mezclas de morteros a base de cal para utilizarse como revoco en paneles de paja de arroz y marcos de madera.

El diseño de mezclas consiste en determinar las proporciones de las cantidades de materiales que componen un mortero, en función de ciertas propiedades y características que el mismo debe cumplir ya sea en estado fresco o endurecido. Entre las propiedades más importantes para tomarse en cuenta dentro de un diseño de mezclas se puede mencionar las siguientes:

- Relación agua – cemento (W/C).
- Resistencia a compresión (f'c).
- Asentamiento de la mezcla.

Estas propiedades están directamente relacionadas con el uso que se va a dar al mortero, ya sea para ser aplicados como recubrimientos o formar parte de elementos estructurales y no estructurales. La obtención de un correcto diseño de mezclas para morteros u hormigones es fundamental, ya que garantiza en el mismo una adecuada resistencia, durabilidad, trabajabilidad y consistencia.

Metodología

Una vez que se han determinado las propiedades de los materiales que conforman el mortero, se procedió a realizar dos diseños de mezclas patrón MP1 y MP2 por el método de densidad óptima. Como punto de partida para ambos diseños además de las propiedades de los materiales se consideró también un valor de 6.89 MPa para la resistencia a compresión del

mismo, esto según lo establece el (Código Residencial Internacional , 2018) cuando el mortero es usado como recubrimiento de muros o paredes construidas con fardos de paja.

Para la mezcla MP1 se utilizó como árido fino la arena procedente la parroquia de Pintag y el 100 % de la cantidad cemento obtenido en el diseño de mezclas, mientras que para la mezcla MP2 como árido fino se utilizó perlita procedente de la parroquia Yaruquí y el 100 % de la cantidad cemento obtenido en el diseño de mezclas. La variación de los áridos finos se da principalmente con el objetivo de buscar un mortero que a más de cumplir con la resistencia a compresión presente también una menor densidad, debido a que este ocupa un volumen considerable en el panel lo que genera un aumento en el peso en el mismo.

De MP1 se obtiene 8 mezclas, las 4 primeras corresponde a la variación de la cantidad de cemento por la cal en porcentajes de 30 %, 50 %, 70 % y 90 %, las cuatro restantes se obtuvieron a partir de las 4 primeras, donde a cada una se les añadió aditivo acelerante de resistencias al 2.5 % del peso del cemento. Para las mezclas obtenidas a partir de MP2 se sigue la misma metodología que para MP1, es decir de MP2 se obtiene 8 mezclas, las 4 primeras corresponde a la variación de la cantidad de cemento por la cal en porcentajes de 30 %, 50 %, 70 % y 90 %, las cuatro restantes se obtuvieron a partir de las 4 primeras, donde a cada una se les añadió aditivo acelerante de resistencias al 2.5 % del peso del cemento.

El remplazo del cemento por la cal en porcentajes del 30 %, 50 %, 70 % y 90 %, en las mezclas derivadas de MP1 y MP2, permitirá encontrar el porcentaje óptimo de cal que deberá añadirse a la mezclas, con la finalidad de utilizar la mayor cantidad posible de cal y cumplir con la resistencia objetivo de 6.89 MPa, mientras tanto, con la adición de aditivo acelerante en las mezclas se podrá evaluar la resistencia en los morteros y verificar si es conveniente su uso al ser utilizado conjuntamente con la cal, debido que este material en los morteros reduce los tiempos de fraguado y por ende su resistencia.

A continuación, en tabla 33 se indica la codificación con su respectivo significado de cada una de las mezclas realizadas en la presente investigación, conforme lo descrito los párrafos anteriores:

Tabla 33

Mezclas realizadas en la investigación con su codificación y significado.

Id.	Significado de las codificaciones asignadas a las mezclas
MP1	Mezcla patrón 1: 0% de cal + 100% de cemento + Arena + Agua
9010AM1	90: 90% de cal ; 10: 10% de cemento ; A: Con aditivo ; M1: Modificada de MP1
9010SM1	90: 90% de cal ; 10: 10% de cemento ; S: Sin aditivo ; M1: Modificada de MP1
7030AM1	70: 70% de cal ; 30: 30% de cemento ; A: Con aditivo ; M1: Modificada de MP1
7030SM1	70: 70% de cal ; 30: 30% de cemento; S: Sin aditivo ; M1: Modificada de MP1
5050AM1	50: 50% de cal ; 50: 50% de cemento ; A: Con aditivo ; M1: Modificada de MP1
5050SM1	50: 50% de cal ; 50: 50% de cemento; S: Sin aditivo ; M1: Modificada de MP1
3070AM1	30: 30% de cal ; 70: 70% de cemento ; A: Con aditivo ; M1: Modificada de MP1
3070SM1	30: 30% de cal ; 70: 70% de cemento ; S: Sin aditivo ; M1: Modificada de MP1
MP2	Mezcla patrón 2: 0% de cal + 100% de cemento + Perlita + Agua
9010AM2	90: 90% de cal ; 10: 10% de cemento ; A: Con aditivo ; M2: Modificada de MP2
9010SM2	90: 90% de cal ; 10: 10% de cemento ; S: Sin aditivo ; M2: Modificada de MP2
7030AM2	70: 70% de cal ; 30: 30% de cemento ; A: Con aditivo ; M2: Modificada de MP2
7030SM2	70: 70% de cal ; 30: 30% de cemento ; S: Sin aditivo ; M2: Modificada de MP2
5050AM2	50: 50% de cal ; 50: 50% de cemento ; A: Con aditivo ; M2: Modificada de MP2
5050SM2	50: 50% de cal ; 50: 50% de cemento ; S: Sin aditivo ; M2: Modificada de MP2
3070AM2	30: 30% de cal ; 70: 70% de cemento ; A: Con aditivo ; M2: Modificada de MP2
3070SM2	30: 30% de cal ; 70: 70% de cemento ; S: Sin aditivo ; M2: Modificada de MP2

Diseño de mezcla patrón MP1.

Para realizar el diseño de mezclas de MP1 se utilizó el método de la densidad óptima, esta mezcla patrón se caracteriza principalmente por contener como árido fino arena procedente de la parroquia de Pintag, además de utilizar la cantidad total de cemento obtenida por el método de diseño, es decir sin ser este remplazado por la cal en ningún porcentaje. Previamente a utilizar el método de la densidad óptima es necesario tener los resultados de las propiedades físico – mecánicas del árido fino (arena), estas se muestran en la tabla 34.

Tabla 34

Propiedades físico – mecánicas para el árido fino (arena).

Propiedades físico - mecánicas para el árido fino (arena)					
Propiedades Mecánicas	NTE INEN	ASTM	Arena		
			Valor 1	Valor 2	Valor Final
Peso específico (g/cm ³)	856	C-127	2,41	2,40	2,41
Densidad Aparente Suelta (g/cm ³)	858	C-29	1,41	1,41	1,41
Densidad Aparente Compactada (g/cm ³)	858	C-29	1,60	1,59	1,60
Contenido de Humedad (%)	862	C-566	1,04	1,03	1,04
Capacidad de Absorción (%)	856	C-127	2,25	2,27	2,26
Módulo de Finura	696	C-136	2,93	2,91	2,44
Colorimetría	855	C-40	SPMO	SPMO	SPMO
SPMO: Sin presencia de materia orgánica					

A continuación, se detalla el procedimiento realizado para la obtención del diseño de mezclas de MP1 por el método de la densidad óptima, además se utilizan las propiedades físico – mecánicas de la arena que ya fueron determinadas anteriormente.

- **Densidad real de la mezcla (D.R.M).**

La densidad real de la mezcla se determina a partir del peso específico en estado SSS de los áridos y el porcentaje que estos ocupan en la mezcla, al no contar con árido grueso en la en los morteros, el valor del peso específico y el porcentaje se considera como 0. La D.R.M se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$D.R.M = \frac{P.E.A.F.sss * \%A.F}{100} + \frac{P.E.A.G.sss * \%A.G}{100}$$

$$D.R.M = \frac{2.41 * 100}{100} + 0$$

$$D.R.M = 2.41 \text{ g/cm}^3$$

D.R.M = Densidad real de la mezcla [g/cm³].

P.E.A.F.sss = Peso específico del árido fino en estado SSS [g/cm³].

P.E.A.G.sss = Peso específico del árido grueso en estado SSS [g/cm³].

%A.F = Porcentaje de árido fino que contiene la mezcla [%].

%A.G = Porcentaje de árido grueso que contiene la mezcla [%].

- **Densidad aparente compactada de los áridos (D.A.C.A.F).**

Al no contener árido grueso las mezclas, se considera como densidad aparente compactada de los áridos únicamente al valor obtenido en la arena.

$$D. A. C. A. F = 1.60 \text{ g/cm}^3$$

D.A.C.A.F = Densidad aparente compactada del árido fino [g/cm³].

- **Densidad óptima de la mezcla (D.O.M).**

Para este caso al tratarse del diseño de un mortero el cual solo contiene árido fino mas no grueso, la densidad óptima de la mezcla es igual a la densidad aparente compactada del árido fino.

$$D. O. M = D. A. C. A. F$$

$$D. O. M = 1.60 \text{ g/cm}^3$$

D.O.M = Densidad óptima de la mezcla [g/cm³].

D.A.C.A.F = Densidad aparente compactada del árido fino [g/cm³].

- **Porcentaje óptimo de vacíos (%OV).**

El porcentaje óptimo de vacíos se calcula en función de la densidad real y óptima de la mezcla, mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$\%O.V = \frac{D. R. M - D. O. M}{D. R. M}$$

$$\%O.V = \frac{2.41 - 1.60}{2.41} * 100$$

$$\%O.V = 33.61 \%$$

D.R.M = Densidad real de la mezcla [g/cm³].

D.O.M = Densidad óptima de la mezcla [g/cm³].

%O.V = Porcentaje óptimo de vacíos [%].

- **Cantidad de pasta en la mezcla (C.P).**

Para determinar la cantidad de pasta en las mezclas de morteros se utiliza la tabla 35, donde se muestra las ecuaciones a utilizar para determinar este valor, las mismas están en función del asentamiento requerido en la mezcla y del porcentaje óptimo de vacíos. Se establece como valor del asentamiento entre 12 - 15 cm, debido que las mezclas de morteros no deberán ser muy consistentes como en los hormigones, sino que al contrario deben tener una consistencia media y ofrecer una adecuada trabajabilidad, de acuerdo a la experiencia estas condiciones se obtienen cuando el asentamiento en la mezcla de mortero es superior a 12 cm.

Tabla 35

Expresiones para determinar la cantidad de pasta en las mezclas en función del asentamiento y % O.V

Cantidad de pasta en las mezclas	
Asentamiento (cm)	Cantidad de pasta (%)
0 - 3	%O.V + 2% + 3%(%OV)
3 - 6	%O.V + 2% + 6%(%OV)
6 - 9	%O.V + 2% + 8%(%OV)
9 - 12	%O.V + 2% + 11%(%OV)
12 -15	%O.V + 2% + 13%(%OV)

Nota. Recuperado de (Camaniero, 2007)

Por lo tanto, la cantidad de pasta en la mezcla se calcula con la siguiente ecuación:

$$CP = \%O.V + 2\% + 13\%(\%O.V)$$

$$C.P = \left(\frac{33.61}{100} + \frac{2}{100} + \frac{13}{100} \left(\frac{33.61}{100} \right) \right) * 100$$

$$C.P = (0.3998) * 100$$

$$\mathbf{C.P = 39.98 \%}$$

%O.V = Porcentaje óptimo de vacíos [%].

C.P = Cantidad de pasta en la mezcla [%].

- **Resistencia a compresión de diseño (f'_{cr}).**

Cuando la resistencia a compresión del mortero se evalúe mediante pruebas o ensayos de laboratorio, debido a las variaciones que pueda darse en su medición y resultados, este deberá ser diseñado para una resistencia media requerida (f'_{cr}) que está por encima de la resistencia objetivo ($f'c$), (NEC - SE - HC, 2015). A continuación, en la tabla 36, se indican las ecuaciones que determinan la resistencia (f'_{cr}) en función del valor de la resistencia objetivo ($f'c$).

Tabla 36

Resistencia especificada ($f'c$) en función de la resistencia objetivo requerida ($f'c$).

Resistencia especificada $f'c$ (MPa)	Resistencia media requerida f'_{cr} (MPa)
< 21	$f'c + 7.0$
$21 \leq f'c \leq 35$	$f'c + 8.5$
> 35	$1.10f'c + 5.0$

Nota. Recuperado de (NEC - SE - HC, 2015)

En la presente investigación el valor de la resistencia objetivo ($f'c$) es de 6.89 MPa, que establece el (Código Residencial Internacional , 2018) para morteros a base de cal y cemento que son utilizados como recubrimiento en paredes o muros construidos con paja. Al ser la resistencia objetivo ($f'c$) inferior a 21 MPa, para el cálculo de la resistencia media requerida (f'_{cr}) se utiliza la primera ecuación que se muestra en la tabla 35 y su cálculo se indica a continuación:

$$f_{cr} = f'c + 7$$

$$f_{cr} = 6.89 + 7$$

$$f_{cr} = 13.89 \text{ MPa}$$

$$f_{cr} = \mathbf{14 \text{ MPa}}$$

$f'c$ = Resistencia a compresión objetivo [MPa].

f'_{cr} = Resistencia a compresión media requerida [MPa].

- **Relación agua – cemento (W/C).**

La relación agua – cemento de la mezcla está en función de la resistencia a compresión requerida del mortero a los 28 días y se la calcula conforme la tabla 37 que se indica a continuación:

Tabla 37

Relación agua – cemento según la resistencia requerida del mortero a los 28 días.

Resistencia requerida a los 28 días (MPa)	W/C
	Sin aire incorporado
15	0.80
20	0.70
25	0.62
30	0.55
35	0.48

Nota. Recuperado de (Camaniero, 2007)

Como en la tabla anterior no existe un valor de W/C para la resistencia requerida de 14 MPa que se establece en esta investigación, entonces se deberá realizar una interpolación entre los valores de W/C y f'_{cr} que se indican en la tabla. A continuación, se muestra el cálculo de la interpolación para obtener el valor de W/C cuando la resistencia requerida es igual 14 MPa:

$$\frac{20 - 14}{x - 0.7} = \frac{20 - 15}{0.8 - 0.7}$$

$$\frac{6}{x - 0.7} = \frac{5}{0.10}$$

$$0.60 = 5(x - 0.7)$$

$$0.60 = 5x - 3.5$$

$$5x = 4.10$$

$$x = \frac{W}{C} = \mathbf{0.82}$$

- **Cálculo de la cantidad de cemento en la mezcla (C).**

Para determinar la cantidad de cemento en la mezcla de mortero se utiliza la siguiente ecuación, la cual está en función de la cantidad de pasta en la mezcla, relación agua – cemento y densidad del cemento, su cálculo se indica a continuación:

$$C = \frac{C.P * 10}{\frac{W}{C} + \frac{1}{D.C}}$$

$$C = \frac{39.98\% * 10}{0.82 + \frac{1}{2.80}}$$

$$C = 339.63 \text{ kg}$$

C = Cantidad de cemento en la mezcla [kg].

C.P = Cantidad de pasta en la mezcla [%].

D.C = Densidad de cemento [g/cm³].

W/C = Relación agua – cemento.

- **Cálculo de la cantidad de agua (W).**

Para determinar la cantidad de agua en la mezcla se utiliza la siguiente ecuación, la cual está en función de la relación agua – cemento y la cantidad de cemento, su cálculo se indica a continuación:

$$W = \frac{W}{C} * C$$

$$W = 0.82 * 339.63$$

$$W = 278.50 \text{ kg}$$

W/C = Relación agua – cemento.

C = Cantidad de cemento en la mezcla [kg].

- **Cálculo de la cantidad de arena (A).**

Al tratarse del diseño de un mortero no se tiene áridos gruesos en su mezcla, por lo tanto, el porcentaje de áridos finos es 100 %, previamente al cálculo de la cantidad de arena se debe tener definido el valor de su peso específico en estado SSS. A continuación, se indica la ecuación que determina este valor:

$$A = (1 - C.P) * \left(\frac{P.E.A.F.sss * \%A.F}{100} \right)$$

$$A = \left(1 - \frac{39.98}{100} \right) * \left(\frac{(2.41 * 1000) * 100}{100} \right)$$

$$A = 1446.48 \text{ kg}$$

P.E.A.F.sss = Peso específico del árido fino en estado SSS [kg/m³].

%A.F = Porcentaje de árido fino que contiene la mezcla [%].

C.P = Cantidad de pasta en la mezcla [%].

Dosificación al peso de la mezcla patrón MP1 para 1 m³ de mortero.

En la tabla 38, se muestra la dosificación al peso de la mezcla patrón MP1 para 1 m³ de mortero, obtenida por el método de la densidad óptima:

Tabla 38

Dosificación en kg y al peso de la mezcla patrón MP1 para 1 m³ de mortero.

Materiales	Dosificación en (kg)	Dosificación al peso
Cemento	339.63	1.00
Agua	278.50	0.82
Arena	1446.50	4.26
PESO TOTAL	2064.63	

Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP1 para 1 m³ de mortero.

De la dosificación en kg de MP1 para 1 m³ de mortero, se obtienen 8 mezclas de las cuales son el resultado de sustituir en las mismas el cemento por la cal en varios porcentajes,

además de la incorporación de aditivo acelerante en 4 de estas, esto con la finalidad de evaluar su uso mediante a la verificación de los resultados de las resistencias a compresiones obtenidas en los cubos de morteros.

A continuación, en la tabla 39 se indica las dosificaciones en kg para 1 m³ de mortero de las mezclas obtenidas a partir de MP1, cabe indicar que a cada una de estas se realizó la corrección de la cantidad de agua debido al contenido de humedad y capacidad de absorción de la arena utilizada, además se verificó que todas cumplan con un flujo de 110±5 mediante la ejecución del ensayo respectivo que se indica en la norma (NTE INEN 2502, 2009).

Tabla 39

Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP1 para 1 m³ de mortero.

Id.	Cal	Cemento	Arena	Agua	Aditivo
	(kg/m ³)				
MP1	0.00	339.63	1446.50	295.55	0.00
9010AM1	305.67	33.96	1446.50	390.29	8.49
9010SM1	305.67	33.96	1446.50	390.29	0.00
7030AM1	237.74	101.89	1446.50	370.75	8.49
7030SM1	237.74	101.89	1446.50	370.75	0.00
5050AM1	169.82	169.82	1446.50	354.29	8.49
5050SM1	169.82	169.82	1446.50	354.29	0.00
3070AM1	101.89	237.74	1446.50	342.86	8.49
3070SM1	101.89	237.74	1446.50	342.86	0.00

Dosificación al peso de la mezcla patrón MP1 para 7 cubos de mortero.

Con la finalidad de evaluar la resistencia a compresión y la densidad de los morteros a edades de 1, 3, 7, 28 y 50 días, con cada una de las mezclas generadas a partir de MP1 se fabricaron 15 cubos de arista de 50 mm, es decir 3 cubos para cada edad establecida, estos fueron elaborados siguiendo los procedimientos que se indica en la norma (NTE INEN 488, 2009).

Debido a la deficiente capacidad de la batidora a utilizarse para la fabricación de los 15 cubos a la vez, fue necesario realizar 3 mezclas con dosificaciones de 6 cubos, considerando

uno adicional por posibles pérdidas durante su fabricación hasta completar los 15 cubos para cada una de las mezclas. En la tabla 40 se indica las dimensiones de los cubos, volumen y la cantidad de mortero necesario para fabricar los mismos.

Tabla 40

Volumen de mortero para fabricar 7 cubos con las mezclas derivadas de MP1.

Lado del cubo	Longitud	Cantidad	Volumen unitario	Volumen unitario	Volumen total	Volumen total	Cantidad de mortero
	cm		cm ³	m ³	cm ³	m ³	kg
Arista 1	5	7	125	0.000125	875	0.000875	1.81
Arista 2	5						
Arista 3	5						

La cantidad de cemento para fabricar 7 cubos de mortero con arista de 50 mm se determina mediante la siguiente ecuación, donde los coeficientes corresponden a la dosificación al peso de los materiales de la mezcla MP1 para 1 m³ de mortero.

$$1.00C + 0.82C + 4.26C = 1.81 \text{ kg}$$

$$6.10C = 1.81 \text{ kg}$$

$$C = \frac{1.81 \text{ kg}}{6.10}$$

$$C = 0.30 \text{ kg}$$

Mientras tanto para determinar la cantidad de agua y de arena se deberá multiplicar los coeficientes conseguidos de estos materiales de la dosificación al peso de la mezcla MP1 para 1 m³ de mortero, con la cantidad de cemento obtenida.

A continuación, se indican las ecuaciones y el procedimiento de cálculo para determinar la cantidad de cemento, agua y arena que se utiliza en la elaboración de los 7 cubos de mortero.

- **Cemento (C).**

$$C = 1.00 \times 0.30$$

$$C = 0.30 \text{ kg}$$

- **Agua (W).**

$$W = 0.82 \times 0.30$$

$$W = 0.24 \text{ kg}$$

- **Arena (A).**

$$A = 4.26 \times 0.30$$

$$A = 1.27 \text{ kg}$$

En la tabla 41, se indica la dosificación en kg para elaborar 7 cubos de mortero con las mezclas obtenidas a partir de MP1.

Tabla 41

Dosificación al peso para 7 cubos de morteros a elaborarse con la mezcla patrón MP1.

Materiales	Dosificación en (kg)	Dosificación al peso
Cemento	0.30	1.00
Agua	0.24	0.82
Arena	1.27	4.26
PESO TOTAL	1.81	

- **Corrección de la cantidad de agua en la mezcla debido a la humedad y absorción del árido fino (arena).**

Para corregir la cantidad de agua de amasado se deberá tener como datos preliminares el valor del contenido de humedad y capacidad de absorción del árido fino (arena), a continuación, se indica la ecuación que determina la cantidad de arena corregida debido a su humedad y absorción:

$$A. c = A * \frac{100 + C. H}{100 + C. A}$$

$$A.c = 1.27 * \frac{100 + 1.04\%}{100 + 2.26\%}$$

$$\mathbf{A.c = 1.25 kg}$$

Ac = Cantidad de árido fino corregido en la mezcla [kg].

C.H = Contenido de humedad del árido fino [%]

C.A = Capacidad de absorción del árido fino [%]

Finalmente, con la siguiente ecuación se determina la cantidad de agua que debe añadirse o quitarse a la mezcla, la misma está en función de la cantidad de arena corregida que fue determinada anteriormente:

$$Agua = A.c * \frac{C.H - C.A}{100 + C.A}$$

$$Agua = 1.25 * \frac{1.04\% - 2.26\%}{100 + 2.26\%}$$

$$Agua = -0.015 kg$$

$$W.c = W - Agua$$

$$W.c = 0.24 - (-0.015)$$

$$\mathbf{W.c = 0.26 kg}$$

Ac = Cantidad de árido fino corregido en la mezcla [kg].

Agua = Cantidad de agua que se quita o se añade a la mezcla [kg]

W.c = Cantidad de agua corregida en la mezcla [kg]

W = Cantidad de agua obtenida en el diseño de mezclas inicial [kg]

- **Cálculo de la cantidad de aditivo en la mezcla**

En algunas de estas mezclas se decidió añadir aditivos acelerantes de resistencias al 2.5% de la cantidad de cemento, con la finalidad de evaluar su posible uso en las mismas, este

valor es el máximo recomendable que se indica en la ficha técnica del producto. A continuación, se presenta la ecuación que permite determinar la cantidad de aditivo en la mezcla para una dosificación de 7 cubos de mortero:

$$\text{Aditivo} = C * 2.5\% * 1000$$

$$\text{Aditivo} = 0.30 * 2.5\% * 1000$$

$$\text{Aditivo} = 7.5 \text{ g}$$

Aditivo = Cantidad de aditivo en la mezcla [g].

C = Cantidad de cemento en la mezcla [kg].

En la tabla 42, se indica la dosificación definitiva en kg para elaborar 7 cubos de morteros con las mezclas obtenidas a partir de MP1, cabe indicar que en esta dosificación ya presenta la corrección en la cantidad de agua de amasado por humedad y capacidad de absorción del árido fino (arena).

Tabla 42

Dosificación corregida por humedad para 7 cubos de morteros a elaborarse con la mezcla patrón MP1.

Materiales	Dosificación en (kg)	Dosificación al peso
Cemento	0.30	1.00
Agua	0.26	0.87
Arena	1.27	4.26
PESO TOTAL	1.82	

Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP1 para 7 cubos de mortero.

En la tabla 43, se indica la dosificación en gramos para 7 cubos de morteros, de todas las mezclas obtenidas a partir de MP1, cabe indicar que en estas dosificaciones ya presentan la corrección en la cantidad de agua de amasado por humedad y capacidad de absorción del árido fino y que además todas cumplen con el flujo de 110 ± 5 como lo indica en la norma ((NTE INEN 2502, 2009)

Tabla 43

Dosificación en gramos para 7 cubos de mortero a elaborarse con las mezclas derivadas de MP1.

Id.	Cal	Cemento	Arena	Agua	Aditivo	Flujo
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	105±5
MP1	0.00	297.18	1265.69	258.60	0.00	102
9010AM1	267.46	29.72	1265.69	341.50	7.43	108
9010SM1	267.46	29.72	1265.69	341.50	0.00	105
7030AM1	208.02	89.15	1265.69	324.40	7.43	109
7030SM1	208.02	89.15	1265.69	324.40	0.00	104
5050AM1	148.6	148.6	1265.69	310.00	7.43	108
5050SM1	148.6	148.6	1265.69	310.00	0.00	103
3070AM1	89.15	208.02	1265.69	300.00	7.43	107
3070SM1	89.15	208.02	1265.69	300.00	0.00	103

Diseño de mezcla patrón MP2

Para realizar el diseño de mezclas de MP2 se utilizó el método de la densidad óptima, esta mezcla patrón se caracteriza principalmente por contener como árido fino perlita procedente de la parroquia de Yaruquí, además de utilizar la cantidad total de cemento obtenida por el método de diseño, es decir sin ser este remplazado por la cal en ningún porcentaje. Previamente a utilizar el método de la densidad óptima es necesario tener los resultados de las propiedades físico – mecánicas del árido fino (perlita), estas se muestran en la tabla 44.

Tabla 44

Propiedades físico – mecánicas para el árido fino (perlita).

Resumen de resultados para áridos fino (perlita)					
Propiedades Mecánicas	NTE INEN	ASTM	Perlita		
			Valor 1	Valor 2	Valor Final
Peso específico (g/cm ³)	856	C-127	1,44	1,43	1,44
Densidad Aparente Suelta (g/cm ³)	858	C-29	0,60	0,59	0,60
Densidad Aparente Compactada (g/cm ³)	858	C-29	0,68	0,67	0,68
Contenido de Humedad (%)	862	C-566	14,21	14,21	14,21
Capacidad de Absorción (%)	856	C-127	9,55	9,55	9,55
Módulo de Finura	696	C-136	2,43	2,42	2,43
Colorimetría	855	C-40	SPMO	SPMO	SPMO
SPMO: Sin presencia de materia orgánica					

A continuación, se detalla el procedimiento realizado para la obtención del diseño de mezclas de MP2 por el método de la densidad óptima, además se utilizan las propiedades físico – mecánicas de la perlita que ya fueron determinadas anteriormente.

- **Densidad real de la mezcla (D.R.M).**

La densidad real de la mezcla se determina a partir del peso específico en estado SSS de los áridos y el porcentaje que estos ocupan en la mezcla, al no contar con árido grueso en la en los morteros, el valor del peso específico y el porcentaje se considera como 0. La D.R.M se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$D.R.M = \frac{P.E.A.F.sss * \%A.F}{100} + \frac{P.E.A.G.sss * \%A.G}{100}$$

$$D.R.M = \frac{1.44 * 100}{100} + 0$$

$$D.R.M = 1.44 \text{ g/cm}^3$$

D.R.M = Densidad real de la mezcla [g/cm³].

P.E.A.F.sss = Peso específico del árido fino (perlita) en estado SSS [g/cm³].

P.E.A.G.sss = Peso específico del árido grueso en estado SSS [g/cm³].

%A.F = Porcentaje de árido fino (perlita) que contiene la mezcla [%].

%A.G = Porcentaje de árido grueso que contiene la mezcla [%].

- **Densidad aparente compactada de los áridos (D.A.C.A.F).**

Al no contener árido grueso las mezclas, se considera como densidad aparente compactada de los áridos únicamente al valor obtenido en la perlita.

$$D.A.C.A.F = 0.68 \text{ g/cm}^3$$

D.A.C.A.F = Densidad aparente compactada del árido fino (perlita) [g/cm³].

- **Densidad óptima de la mezcla (D.O.M).**

Para este caso al tratarse del diseño de un mortero el cual solo contiene árido fino mas no grueso, la densidad óptima de la mezcla es igual a la densidad aparente compactada del árido fino.

$$D.O.M = D.A.C.A.F$$

$$D.O.M = 0.68 \text{ g/cm}^3$$

D.O.M = Densidad óptima de la mezcla [g/cm³].

D.A.C.A.F = Densidad aparente compactada del árido fino (perlita) [g/cm³].

- **Porcentaje óptimo de vacíos (%OV).**

El porcentaje óptimo de vacíos se calcula en función de la densidad real y óptima de la mezcla, mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$\%O.V = \frac{D.R.M - D.O.M}{D.R.M}$$

$$\%O.V = \frac{1.44 - 0.68}{1.44} * 100$$

$$\%O.V = 52.78 \%$$

D.R.M = Densidad real de la mezcla [g/cm³].

D.O.M = Densidad óptima de la mezcla [g/cm³].

%O.V = Porcentaje óptimo de vacíos [%].

- **Cantidad de pasta en la mezcla (C.P).**

Para determinar la cantidad de pasta en las mezclas de morteros se utilizó la tabla 34, se establece como valor del asentamiento entre 12 - 15 cm, debido que las mezclas de morteros no deberán ser muy consistentes como en los hormigones, sino que al contrario deben tener una consistencia media y ofrecer una adecuada trabajabilidad, de acuerdo a la experiencia estas condiciones se obtienen cuando el asentamiento en la mezcla de mortero es superior a 12 cm. Por lo tanto, la cantidad de pasta en la mezcla se calcula con la siguiente ecuación:

$$CP = \%O.V + 2\% + 13\%(\%O.V)$$

$$C.P = \left(\frac{52.78}{100} + \frac{2}{100} + \frac{13}{100} \left(\frac{52.78}{100} \right) \right) * 100$$

$$C.P = (0.6164) * 100$$

$$C.P = 61.64 \%$$

%O.V = Porcentaje óptimo de vacíos [%].

C.P = Cantidad de pasta en la mezcla [%].

- **Resistencia a compresión de diseño (f'_{cr}).**

En la presente investigación el valor de la resistencia objetivo (f'_c) es de 6.89 MPa, que establece el (Código Residencial Internacional , 2018) para morteros a base de cal y cemento que son utilizados como recubrimiento en paredes o muros construidos con paja. Al ser la resistencia objetivo (f'_c) inferior a 21 MPa, para el cálculo de la resistencia media requerida (f'_{cr}) se utiliza la primera ecuación que se muestra en la tabla 35 y su cálculo se indica a continuación:

$$f_{cr} = f_c + 7$$

$$f_{cr} = 6.89 + 7$$

$$f_{cr} = 13.89 \text{ MPa}$$

$$f_{cr} = 14 \text{ MPa}$$

$f'c$ = Resistencia a compresión objetivo [MPa].

$f'cr$ = Resistencia a compresión media requerida [MPa].

- **Relación agua – cemento (W/C).**

La relación agua – cemento de la mezcla está en función de la resistencia a compresión requerida del mortero a los 28 días y se la calcula conforme la tabla 36. Al igual que para el diseño de MP1 el valor de W/C para MP2 es de 0.82, ya que la resistencia requerida de MP2 es igual a 14MPa, por lo tanto, se deberá realizar la misma interpolación para MP2 como se realizó con MP1 y que ya se indicó anteriormente.

$$\frac{W}{C} = 0.82$$

- **Cálculo de la cantidad de cemento en la mezcla (C).**

Para determinar la cantidad de cemento en la mezcla de mortero se utiliza la siguiente ecuación, la cual está en función de la cantidad de pasta en la mezcla, relación agua – cemento y densidad del cemento, su cálculo se indica a continuación:

$$C = \frac{C.P * 10}{\frac{W}{C} + \frac{1}{D.C}}$$

$$C = \frac{61.64\% * 10}{0.82 + \frac{1}{2.80}}$$

$$C = 523.63 \text{ kg}$$

C = Cantidad de cemento en la mezcla [kg].

C.P = Cantidad de pasta en la mezcla [%].

D.C = Densidad de cemento [g/cm³].

W/C = Relación agua – cemento.

- **Cálculo de la cantidad de agua (W).**

Para determinar la cantidad de agua en la mezcla se utiliza la siguiente ecuación, la cual está en función de la relación agua – cemento y la cantidad de cemento, su cálculo se indica a continuación:

$$W = \frac{W}{C} * C$$

$$W = 0.82 * 523.63$$

$$W = 429.38 \text{ kg}$$

W/C = Relación agua – cemento.

C = Cantidad de cemento en la mezcla [kg].

- **Cálculo de la cantidad de perlita (P).**

Al tratarse del diseño de un mortero no se tiene áridos gruesos en su mezcla, por lo tanto, el porcentaje de áridos finos es 100%, previamente al cálculo de la cantidad de perlita se debe tener definido el valor de su peso específico en estado SSS. A continuación, se indica la ecuación que determina este valor:

$$P = (1 - C.P) * \left(\frac{P.E.A.F.sss * \%A.F}{100} \right)$$

$$P = \left(1 - \frac{61.64}{100} \right) * \left(\frac{(1.44 * 1000) * 100}{100} \right)$$

$$P = 552.40 \text{ kg}$$

P.E.A.F.sss = Peso específico del árido fino (perlita) en estado SSS [kg/m³].

%A.F = Porcentaje de árido fino (perlita) que contiene la mezcla [%].

C.P = Cantidad de pasta en la mezcla [%].

Dosificación al peso de la mezcla patrón MP2 para 1 m³ de mortero.

En la tabla 45, se muestra la dosificación al peso de la mezcla patrón MP2 para 1 m³ de mortero, obtenida por el método de la densidad óptima:

Tabla 45

Dosificación en kg y al peso de la mezcla patrón MP2 para 1 m³ de mortero.

Materiales	Dosificación en (kg)	Dosificación al peso
Cemento	523.63	1.00
Agua	429.38	0.82
Perlita	552.40	1.05
PESO TOTAL	1505.41	

Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP2 para 1 m³ de mortero.

De la dosificación en kg de MP2 para 1 m³ de mortero, se obtienen 8 mezclas de las cuales son el resultado de sustituir en las mismas el cemento por la cal en varios porcentajes, además de la incorporación de aditivo acelerante en 4 de estas, esto con la finalidad de evaluar su uso mediante a la verificación de los resultados de las resistencias a compresiones obtenidas en los cubos de morteros.

A continuación, en la tabla 46 se indica las dosificaciones en kg para 1 m³ de mortero de las mezclas obtenidas a partir de MP2, cabe indicar que a cada una de estas se realizó la corrección de la cantidad de agua debido al contenido de humedad y capacidad de absorción de la perlita utilizada, además se verificó que todas cumplan con un flujo de 110±5 mediante la ejecución del ensayo respectivo que se indica en la norma (NTE INEN 2502, 2009).

Tabla 46

Dosificaciones en kg para 1 m³ de morteros, de las mezclas obtenidas a partir de MP2.

Id.	Cal	Cemento	Perlita	Agua	Aditivo
	(kg/m ³)				
MP2	0.00	523.63	552.40	404.88	0.00
9010AM2	471.27	52.36	552.40	408.31	13.09
9010SM2	471.27	52.36	552.40	408.31	0.00
7030AM2	366.54	157.09	552.40	383.05	13.09
7030SM2	366.54	157.09	552.40	383.05	0.00
5050AM2	261.82	261.82	552.40	371.62	13.09
5050SM2	261.82	261.82	552.40	371.62	0.00
3070AM2	157.09	366.54	552.40	360.20	13.09
3070SM2	157.09	366.54	552.40	360.20	0.00

Dosificación al peso de la mezcla patrón MP2 para 7 cubos de mortero.

Con la finalidad de evaluar la resistencia a compresión y la densidad de los morteros a edades de 1, 3, 7, 28 y 50 días, con cada una de las mezclas generadas a partir de MP2 se fabricaron 15 cubos de arista de 50 mm, es decir 3 cubos para cada edad establecida, estos fueron elaborados siguiendo los procedimientos que se indica en la norma (NTE INEN 488, 2009).

Debido a la deficiente capacidad de la batidora a utilizarse para la fabricación de los 15 cubos a la vez, fue necesario realizar 3 mezclas con dosificaciones de 6 cubos, considerando uno adicional por posibles pérdidas durante su fabricación hasta completar los 15 cubos para cada una de las mezclas. En la tabla 47 se indica las dimensiones de los cubos, volumen y la cantidad de mortero necesario para fabricar los mismos.

Tabla 47

Volumen de mortero para fabricar 7 cubos con las mezclas derivadas de MP2.

Lado del cubo	Longitud	Cantidad	Volumen unitario	Volumen unitario	Volumen total	Volumen total	Cantidad de mortero
	cm		cm ³	m ³	cm ³	m ³	kg
Arista 1	5	7	125	0.000125	875	0.000875	1.32
Arista 2	5						
Arista 3	5						

La cantidad de cemento para fabricar 7 cubos de mortero con arista de 50 mm se determina mediante la siguiente ecuación, donde los coeficientes corresponden a la dosificación al peso de los materiales de la mezcla MP2 para 1 m³ de mortero.

$$1.00C + 0.82C + 1.05C = 1.32 \text{ kg}$$

$$2.87C = 1.32 \text{ kg}$$

$$C = \frac{1.32 \text{ kg}}{2.87}$$

$$C = 0.46 \text{ kg}$$

Mientras tanto para determinar la cantidad de agua y de arena se deberá multiplicar los coeficientes conseguidos de estos materiales de la dosificación al peso de la mezcla MP2 para 1 m³ de mortero, con la cantidad de cemento obtenida.

A continuación, se indican las ecuaciones y el procedimiento de cálculo para determinar la cantidad de cemento, agua y perlita que se utiliza en la elaboración de los 7 cubos de mortero.

○ **Cemento (C).**

$$C = 1.00 \times 0.46$$

$$C = 0.46 \text{ kg}$$

- **Agua (W).**

$$W = 0.82 \times 0.46$$

$$W = 0.38 \text{ kg}$$

- **Perlita (P).**

$$P = 1.05 \times 0.46$$

$$P = 0.48 \text{ kg}$$

En la tabla 48, se indica la dosificación en kg para elaborar 7 cubos de mortero con las mezclas obtenidas a partir de MP2.

Tabla 48

Dosificación al peso para 7 cubos de morteros a elaborarse con la mezcla patrón MP2.

Materiales	Dosificación en (kg)	Dosificación al peso
Cemento	0.46	1.00
Agua	0.38	0.82
Perlita	0.48	1.05
PESO TOTAL	1.32	

- **Corrección de la cantidad de agua en la mezcla debido a la humedad y absorción del árido fino (perlita).**

Para corregir la cantidad de agua de amasado se deberá tener como datos preliminares el valor del contenido de humedad y capacidad de absorción del árido fino (perlita), a continuación, se indica la ecuación que determina la cantidad de perlita corregida debido a su humedad y absorción:

$$P.c = P * \frac{100 + C.H}{100 + C.A}$$

$$P.c = 0.48 * \frac{100 + 14.21\%}{100 + 9.55\%}$$

$$P.c = 0.50 \text{ kg}$$

Pc = Cantidad de árido fino (perlita) corregido en la mezcla [kg].

C.H = Contenido de humedad del árido fino (perlita) [%]

C.A = Capacidad de absorción del árido fino (perlita) [%]

Finalmente, con la siguiente ecuación se determina la cantidad de agua que debe añadirse o quitarse a la mezcla, la misma está en función de la cantidad de perlita corregida que fue determinada anteriormente:

$$Agua = P.c * \frac{C.H - C.A}{100 + C.A}$$

$$Agua = 0.50 * \frac{14.21\% - 9.55\%}{100 + 9.55\%}$$

$$Agua = 0.021 \text{ kg}$$

$$W.c = W - Agua$$

$$W.c = 0.38 - (0.021)$$

$$W.c = 0.35 \text{ kg}$$

Pc = Cantidad de árido fino (perlita) corregido en la mezcla [kg].

Agua = Cantidad de agua que se quita o se añade a la mezcla [kg]

W.c = Cantidad de agua corregida en la mezcla [kg]

W = Cantidad de agua obtenida en el diseño de mezclas inicial [kg]

- **Cálculo de la cantidad de aditivo en la mezcla**

En algunas de estas mezclas se decidió añadir aditivos acelerantes de resistencias al 2.5 % de la cantidad de cemento, con la finalidad de evaluar su posible uso en las mismas, este valor es el máximo recomendable que se indica en la ficha técnica del producto. A continuación, se presenta la ecuación que permite determinar la cantidad de aditivo en la mezcla para una dosificación de 7 cubos de mortero:

$$Aditivo = C * 2.5\% * 1000$$

$$\text{Aditivo} = 0.46 * 2.5\% * 1000$$

$$\text{Aditivo} = 11.5 \text{ g}$$

Aditivo = Cantidad de aditivo en la mezcla [g].

C = Cantidad de cemento en la mezcla [kg].

En la tabla 49, se indica la dosificación definitiva en kg para elaborar 7 cubos de morteros con las mezclas obtenidas a partir de MP2, cabe indicar que en esta dosificación ya presenta la corrección en la cantidad de agua de amasado por humedad y capacidad de absorción del árido fino (perlita).

Tabla 49

Dosificación corregida por humedad para 7 cubos de morteros a elaborarse con la mezcla patrón MP2.

Materiales	Dosificación en (kg)	Dosificación al peso
Cemento	0.46	1.00
Agua	0.35	0.77
Perlita	0.48	1.05
PESO TOTAL	1.31	

Dosificaciones de las mezclas obtenidas a partir de MP2 para 7 cubos de mortero.

En la tabla 50, se indica la dosificación en gramos para 7 cubos de morteros, de todas las mezclas obtenidas a partir de MP2, cabe indicar que en estas dosificaciones ya presentan la corrección en la cantidad de agua de amasado por humedad y capacidad de absorción del árido fino (perlita) y que además todas cumplen con el flujo de 110 ± 5 como lo indica en la norma (NTE INEN 2502, 2009).

Tabla 50

Dosificación en gramos para 7 cubos de mortero a elaborarse con las mezclas derivadas de MP2.

Id.	Cal	Cemento	Perlita	Agua	Aditivo	Flujo
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	105±5
MP2	0.00	458.18	483.35	354.27	0.00	109
9010AM2	412.36	45.82	483.35	357.27	11.5	101
9010SM2	412.36	45.82	483.35	357.27	0.00	106
7030AM2	320.72	137.46	483.35	335.17	11.5	107
7030SM2	320.72	137.46	483.35	335.17	0.00	108
5050AM2	229.09	229.09	483.35	325.17	11.5	109
5050SM2	229.09	229.09	483.35	325.17	0.00	107
3070AM2	137.45	320.73	483.35	315.17	11.5	107
3070SM2	137.45	320.73	483.35	315.17	0.00	105

Realización de cubos de mortero a base de cal y cemento.

Con la finalidad de evaluar las propiedades físico – mecánicas de las mezclas de morteros a base de cal y cemento para utilizarse como recubrimiento en las construcciones con paja, se realizaron probetas cúbicas de 50 mm de arista siguiendo los procedimientos, indicaciones y parámetros que rigen las normas NTE INEN 488 “Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista” y NTE INEN 155 “Cemento hidráulico. Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica”.

Especímenes a realizar en la investigación.

Tanto para las mezclas patrones MP1, MP2 y las derivadas de estas, se decidió realizar en total 270 especímenes cúbicos, con el objetivo de evaluar su resistencia a compresión y densidad en estado endurecido de los mismos a edades de 1, 3, 7, 28 y 50 días. A continuación, en la tabla 51 se indica la distribución del número de especímenes fabricados en función de su edad para cada una de las mezclas estudiadas en la presente investigación.

Tabla 51

Número de especímenes a fabricarse para cada una de las mezclas.

Id.	Número de especímenes a fabricarse					
	1 día	3 días	7 días	28 días	50 días	Total
MP1	3	3	3	3	3	15
9010AM1	3	3	3	3	3	15
9010SM1	3	3	3	3	3	15
7030AM1	3	3	3	3	3	15
7030SM1	3	3	3	3	3	15
5050AM1	3	3	3	3	3	15
5050SM1	3	3	3	3	3	15
3070AM1	3	3	3	3	3	15
3070SM1	3	3	3	3	3	15
MP2	3	3	3	3	3	15
9010AM2	3	3	3	3	3	15
9010SM2	3	3	3	3	3	15
7030AM2	3	3	3	3	3	15
7030SM2	3	3	3	3	3	15
5050AM2	3	3	3	3	3	15
5050SM2	3	3	3	3	3	15
3070AM2	3	3	3	3	3	15
3070SM2	3	3	3	3	3	15

Elaboración de las mezclas.

Las mezclas se realizaron en los laboratorios del Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Hormigón (INECYC), siguiendo el procedimiento que se describe a continuación conforme la norma NTE INEN 155 “Cemento hidráulico. Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica”:

- Pesar en la balanza los materiales necesarios para elaborar 7 cubos de mortero.
- Verificar que la paleta y el tazón de la mezcladora se encuentren completamente secos.
- Colocar el agua de mezclado en el tazón, seguidamente añadir el cemento con la cal y arrancar la mezcladora a velocidad baja por 30 segundos.

- Durante 30 segundos más y a la misma velocidad colocar todo el árido fino (arena o perlita) en el tazón cuidadosamente.
- Detener la mezcladora y cambiar su velocidad de baja a media y mezclar durante 30 segundos más.
- Detener la mezcladora y en 15 segundos bajar la pasta adherida en las paredes del tazón con ayuda del apisonador, durante 75 segundos más tapar el tazón y dejar reposar la mezcla.
- Finalmente encender la mezcladora a velocidad media y terminar el mezclado durante 60 segundos más.

Determinación del flujo en las mezclas.

Para determinar el flujo en cada de una de las mezclas realizadas, se siguió el procedimiento descrito a continuación y que se detalla en la norma NTE INEN 2502 “Cemento hidráulico. Determinación del flujo en morteros”:

- Limpiar y secar la mesa de flujo.
- Colocar en el centro de la mesa de flujo el molde y sobre este poner una capa de mortero de 25 mm, posteriormente proceder a compactar 20 veces con el apisonador.
- Llenar el molde completamente con mortero y compactar por 20 veces más.
- Con ayuda de una espátula nivelar el borde del molde con la superficie del mortero y limpiar mesa de tal manera que no quede mortero sobre ella.
- Levantar el molde y dejar caer la mesa 25 veces durante 15 segundos.
- Finalmente, con ayuda del calibrador medir el diámetro de la circunferencia de mortero y verificar su flujo.

En la figura 83, se indica las imágenes sobre el procedimiento del ensayo realizado para la obtención del flujo de cada mezcla.

Figura 83

Ensayo de flujo realizado en las mezclas.



Elaboración de cubos de mortero.

Para la elaboración de los cubos de mortero con cada una de las mezclas realizadas, se siguió el procedimiento descrito a continuación y que se detalla en la norma NTE INEN 488 “Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista”:

- Realizar el llenado de los moldes metálicos con mortero en un tiempo no mayor a 2 minutos y 30 segundos.
- Colocar una capa de mortero de aproximadamente 25 mm de espesor en los compartimientos del molde y compactar 32 veces en 10 segundos. La compactación realizarse en 4 rondas de 8 golpes.
- Llenar los moldes completamente con mortero y realizar una segunda compactación de la misma manera como se realizó para la primera capa.
- Con ayuda de las manos colocar sobre los moldes el mortero que haya caído fuera de los mismos, con la finalidad de llenar las superficies vacías.
- Enrazar con la espátula cada uno de los moldes para retirar el mortero excedente, no olvidar que la superficie del mortero deberá sobresalir ligeramente de los moldes metálicos.

- Alisar cada cubo pasando una y otra vez la espátula sobre la superficie de los mismos, retirar el exceso de mortero a fin de que los bordes del mismo coincidan con los bordes de los moles.

En la figura 84, se indica las imágenes sobre la elaboración de los cubos de morteros con las mezclas estudiadas en la presente investigación:

Figura 84

Elaboración de cubos de mortero.



Curado de cubos de mortero.

Una vez fabricados los cubos de morteros estos deberán ser curados en los mismos moldes en el gabinete húmedo durante un día, para después ser desencontrados como se indica en la figura 85.

Figura 85

Desencontrado de los cubos de mortero a base de cal y cemento.



Una vez que se haya desencofrado todos los cubos, estos deberán ser curados hasta completar la edad de ensayo, es decir 1, 3, 7, 28 y 50 días. El curado consiste en dejar completamente sumergidos los cubos en agua a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ dentro de la cámara de curado, siguiendo el procedimiento que se indica en la norma ASTM C511. Cabe indicar que estos cubos al contener cal en su mezcla requieren estar al aire libre e interactuar con el CO_2 para poder fraguar, por lo tanto, únicamente se procedió a curarlos colocándolos en la cámara de curado dentro de una bolsa plástica sin sumergirlos, como se indica en la figura 86.

Figura 86

Curado de los cubos de mortero a base de cal y cemento.



Determinación de las propiedades físico – mecánicas en morteros a base de cal para utilizarse como revoco en paneles de paja de arroz y marcos de madera.

Dimensiones.

Las dimensiones de los lados de cada cubo de mortero se deberán obtener con un calibrador, que se colocará cuidadosamente de forma central en 3 caras del cubo, es decir en el centro de la arista superior e inferior que forma cada uno de los lados.

Volumen.

El volumen de cada cubo de mortero se determinará con la siguiente ecuación:

$$V = a_1 * a_2 * a_3$$

Donde:

V = Volumen del espécimen cúbico [mm^3]

a_1 = Lado o arista 1 del cubo [mm]

a_2 = Lado o arista 2 del cubo [mm]

a_3 = Lado o arista 3 del cubo [mm]

Masa.

La masa de cada cubo de mortero se determinará con ayuda de la balanza como se indica en la figura 87, cuando los mismos hayan sido desencofrados y debidamente curados a edades de 1, 3, 7, 28 y 50 días.

Figura 87

Obtención de la masa en los cubos de mortero.



Densidad del mortero.

La densidad se define como la relación entre la masa y el volumen del mortero como se indica en la siguiente ecuación:

$$\delta m = \frac{m}{V}$$

Donde:

δm = Densidad del mortero [g/cm^3].

M = Masa del mortero endurecido [g].

V: Volumen del espécimen cúbico [cm³].

Resistencia a compresión del mortero.

El ensayo a compresión de los cubos de mortero se ejecutó en los laboratorios del Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Hormigón (INECYC), siguiendo el procedimiento que se describe en la norma NTE INEN 488 “Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista”. Este ensayo se realizó con la ayuda de una máquina universal de 200 toneladas que se indica en la figura 88, luego de que los cubos hayan cumplido con el tiempo de curado. La máquina esta acoplada con discos metálicos con la finalidad de que exista una distribución efectiva de la carga hacia el área de aplicación del cubo, además la velocidad con la se aplica la misma es igual a 0.25 MPa/s, la cual es controlada por un sistema automatizado.

Figura 88

Máquina universal de 200 toneladas.



La resistencia a compresión en los cubos de mortero se calcula mediante la siguiente ecuación que se establece en la norma NTE INEN 488:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Donde:

F_m : Resistencia a la compresión del mortero [MPa]

P : Carga total máxima de falla en el mortero [N]

A : Área de la sección transversal del cubo a la que se aplica la carga [mm²]

El la figura 89, se muestra las imágenes del ensayo a compresión de los cubos de mortero realizados con las mezclas estudiadas en la presente investigación.

Figura 89

Ensayo a compresión en cubos de mortero.



Análisis de los resultados.

En el siguiente apartado se describe el análisis de los resultados de las resistencias a compresión y densidades obtenidas en los cubos de mortero elaborados con las mezclas derivadas de MP1 y MP2. Cabe indicar que estos resultados son obtenidos mediante las ecuaciones que se indicaron anteriormente, los mismos se resumen en las siguientes figuras

debido a la gran cantidad de mezclas analizadas. Para cada una de estas mezclas se fabricaron 15 cubos que se ensayaron en grupos de 3, a edades de 1, 3, 7, 28 y 50 días. Con la finalidad de obtener un solo valor de resistencia y densidad de los morteros a estas edades, se determinó el promedio de los resultados obtenidos en los 3 cubos.

Resistencia a compresión en morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP1.

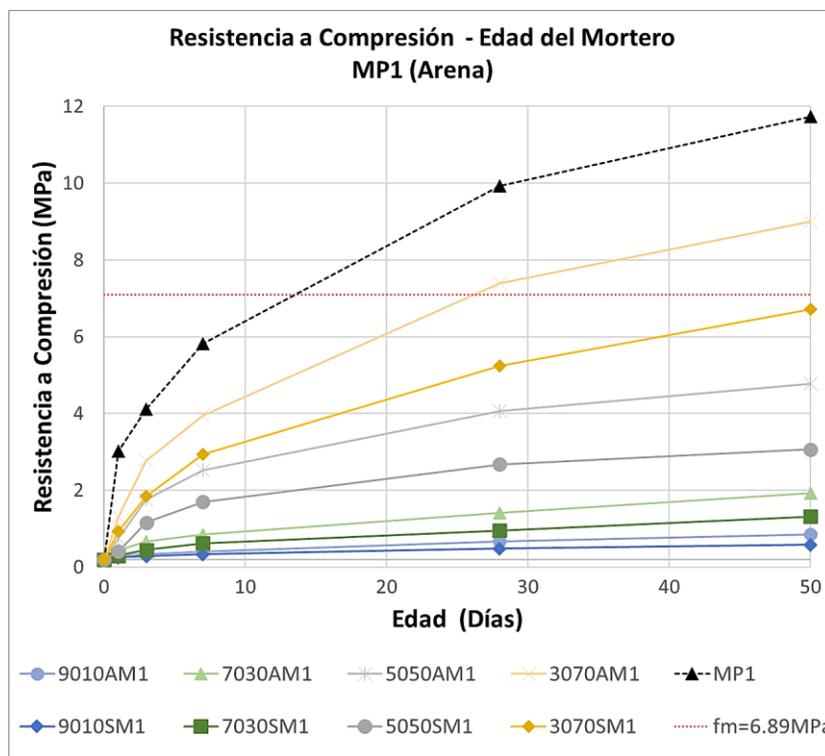
En la figura 90, se muestra los resultados de las resistencias a compresión de los cubos de mortero elaborados con las mezclas derivadas de MP1, en esta se puede observar que la mezcla patrón MP1 que contiene 100 % de la cantidad de cemento presenta la mayor resistencia a compresión a los 28 días y que es igual a 9.73 MPa, esta resistencia disminuye conforme se va sustituyendo el cemento por la cal en diferentes porcentajes. Además, se puede apreciar que aquellos morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP1 presentan un aumento en su resistencia a compresión cuando en los mismos se ha incorporado aditivo.

La mezcla derivada de MP1 que cumple con el objetivo en esta parte de la investigación es la 3070AM1 (30% de cal; 50% de cemento; con aditivo; Modificada de MP1), ya que cumple con la resistencia requerida de 6.89 MPa para utilizarse como revoco en paneles de paja de arroz y marcos de madera. La resistencia a compresión a los 28 días del mortero elaborado con esta mezcla alcanza un valor de 7.19 MPa superando a la resistencia requerida en solo 0.30 MPa.

La mezcla patrón MP1 si bien es cierto supera la resistencia requerida de 6.89 MPa, esta no cumple con el objetivo de la investigación por no contener cal en su mezcla, mientras que las mezclas 9010AM1, 9010SM1, 7030AM1, 7030SM1, 5050AM1, 5050SM1 y 3070SM1 presentan valores de resistencias a los 28 días inferiores a la resistencia objetivo requerida de 6.89 MPa, por lo tanto, estas son descartadas. Finalmente se puede señalar que la incorporación de aditivo acelerante de resistencias a las mezclas que contienen cal, arena y cemento es beneficioso ya que puede aumentar su resistencia hasta un 51.52 %.

Figura 90

Resistencia a compresión en morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP1.



Resistencia a compresión en morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP2.

Las mezclas obtenidas a partir de MP2 de acuerdo al diseño de mezclas patrón se puede verificar que poseen 54 % más cantidad de cemento que las mezclas obtenidas a partir de MP1. Esto se debe a que las mismas contienen como árido fino perlita con una densidad de 0.68 g/cm³ lo que genera que la cantidad de pasta en la mezcla sea mayor, mientras que la mezcla patrón MP1 al contener como árido fino arena con una densidad de 1.60 g/cm³ la cantidad de pasta en la mezcla disminuye, la densidad de la perlita al ser comparada con la densidad de la arena presenta una reducción del 57.5 %.

En la figura 91, se muestra los resultados de las resistencias a compresión de los cubos de mortero elaborados con las mezclas derivadas de MP2, en esta se puede observar que la mezcla patrón MP2 que contiene 100 % de la cantidad de cemento presenta la mayor resistencia a compresión a los 28 días y que es igual a 14.66 MPa, esta resistencia disminuye

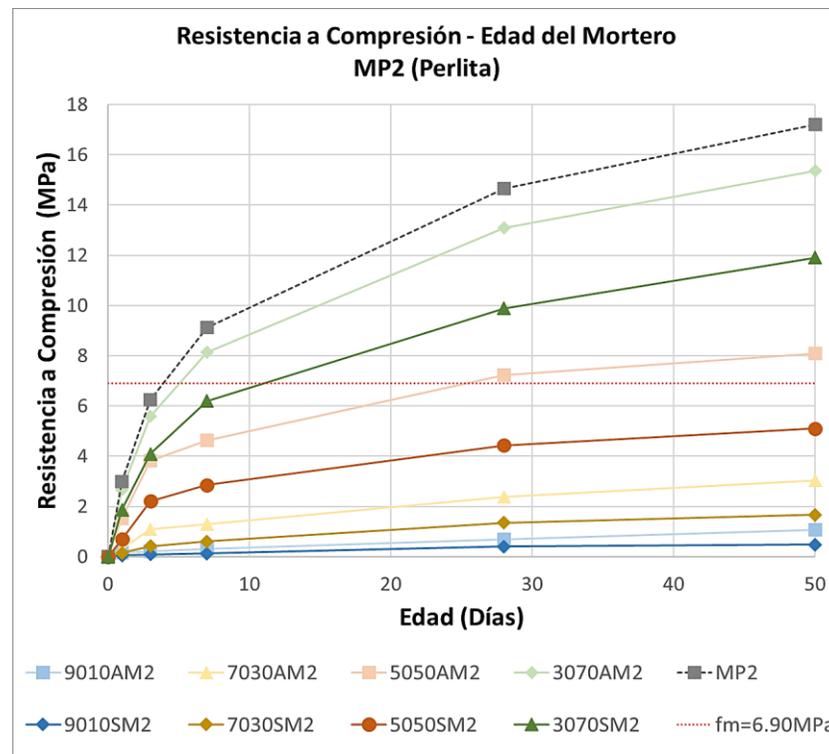
conforme se va sustituyendo el cemento por la cal en diferentes porcentajes. Además, se puede apreciar que aquellos morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP2 presentan un aumento en su resistencia a compresión cuando en los mismos se ha incorporado aditivo.

Las mezclas derivadas de MP2 que cumplen con el objetivo de esta parte de la investigación son la 3070AM2 (30% de cal; 70% de cemento; con aditivo; Modificada de MP2), 3070SM2 (30% de cal; 70% de cemento; sin aditivo; Modificada de MP2) y 5050AM2 (50% de cal; 50% de cemento; con aditivo; Modificada de MP2) ya que todas cumplen con la resistencia requerida de 6.89 MPa para utilizarse como revoco en paneles de paja de arroz y marcos de madera, al presentar una resistencia a compresión a los 28 días de 13.09, 9.89 y 7.22 MPa respectivamente. Sin embargo, la mezcla que se selecciona como válida es la 5050AM2 (50% de cal; 50% de cemento; con aditivo; Modificada de MP2) al contener el mayor porcentaje de cal entre las mezclas seleccionadas. Además, la mezcla 5050AM2 supera la resistencia objetivo requerida en solo 0.33 MPa mientras que las mezclas 3070AM2 Y 3070SAM2 al contener menor porcentaje de cal superan muy por encima a la resistencia objetivo, por lo que son consideradas como mezclas no óptimas.

La mezcla patrón MP2 si bien es cierto supera la resistencia requerida de 6.89 MPa, esta no cumple con el objetivo de la investigación por no contener cal en su mezcla, mientras que las mezclas 9010AM2, 9010SM1, 7030AM2, 7030SM2, 5050SM2 y 3070SM1, 5050AM1 presentan valores de resistencias a los 28 días inferiores a la resistencia objetivo requerida de 6.89 MPa, por lo tanto, estas son descartadas. Finalmente se puede señalar que la incorporación de aditivo acelerante de resistencias a las mezclas que contienen cal, perlita y cemento es beneficioso ya que puede aumentar su resistencia hasta un 72.28 %.

Figura 91

Resistencia a compresión en morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP2.



Selección de la mezcla óptima de mortero a utilizarse como recubrimiento en las construcciones con paja.

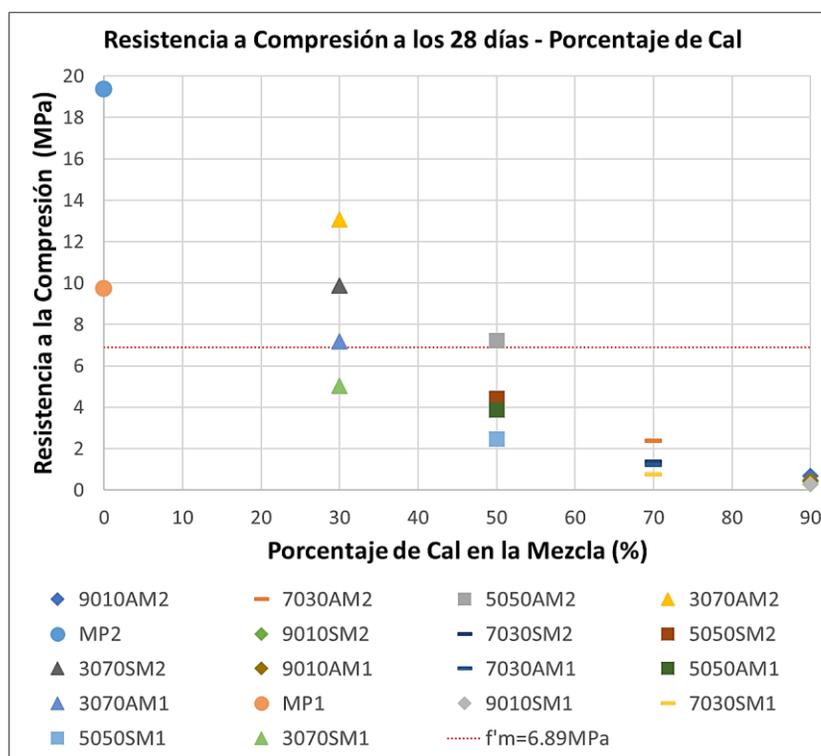
El la figura 92, se muestra el resumen de los resultados de las resistencias a compresión a los 28 días de todas las mezclas estudiadas en la investigación, se observa claramente que las mezclas preseleccionadas que cumplen con el objetivo de la investigación es la 3070AM1 (30% de cal; 70% de cemento; con aditivo; Modificada de MP1) derivada de la mezcla patrón MP1 y la 5050AM2 (50% de cal; 50% de cemento; con aditivo; Modificada de MP2) derivada de la mezcla patrón MP2, cuyos valores de resistencia a compresión superan a la requerida en 0.30 MPa y 0.33 MPa respectivamente. Sin embargo, al realizar una comparación entre los valores de las resistencias obtenidas estas son casi iguales en ambas mezclas, pero la 5050AM2 contiene mayor cantidad de cal que la 3070AM1, además en la primera se utiliza como árido fino perlita cuya densidad es menor a la que ofrece la arena

convencional en la segunda mezcla, esta propiedad al ser menor en la mezcla 5050AM2 permitiría obtener morteros de recubriendo de baja densidad.

Por estos motivos se considera como mezcla óptima seleccionada a la 5050AM2 al ofrecer una resistencia a compresión de 7.22 MPa con el mayor porcentaje de cal como sustitución del cemento, cumpliendo de esta manera con la resistencia requerida de 6.89MPa para utilizarse como recubrimiento en paredes construidas con paja, según lo indica el (Código Residencial Internacional , 2018).

Figura 92

Resistencia a compresión en morteros elaborados con las mezclas derivadas de MP1 y MP2 vs porcentaje de cal.



Ajuste polinomial en las mezclas derivadas de MP1 y MP2 que contienen aditivo.

En la figura 93, se muestra la tendencia de los resultados obtenidos sobre la resistencia de compresión a los 28 días en base al porcentaje de cal de las mezclas derivadas de MP1 y MP2 que contienen aditivo. Al realizarse un ajuste polinómico de las curvas se obtienen dos

ecuaciones, una para las mezclas derivadas de MP1 y otra para las derivadas de MP2, las cuales permiten determinar la resistencia a compresión a los 28 días en función del porcentaje de cal que se adiciona a la mezcla como sustitución del cemento.

$$f_{m_{P1}} = 0.0016(\%Cal)^2 - 0.3084(\%Cal) + 15.047$$

$$f_{m_{P2}} = 0.0026(\%Cal)^2 - 0.5237(\%Cal) + 26.553$$

Donde:

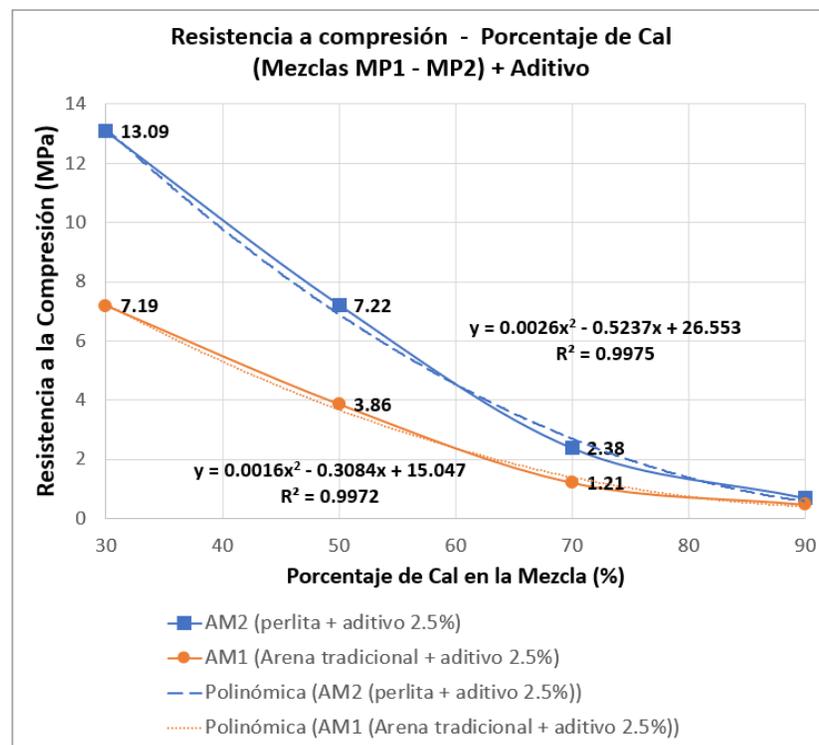
$f_{m_{P1}}$: Resistencia a la compresión de las mezclas AM1 (arena+cal+cemento+aditivo) [MPa].

$f_{m_{P2}}$: Resistencia a la compresión de las mezclas AM2 (perlita+cal+cemento+aditivo) [MPa].

%Cal: Porcentaje de cal en las mezclas que se sustituye por el cemento.

Figura 93

Ajuste polinomial de las mezclas derivadas de MP1 y MP2 que contienen aditivo.



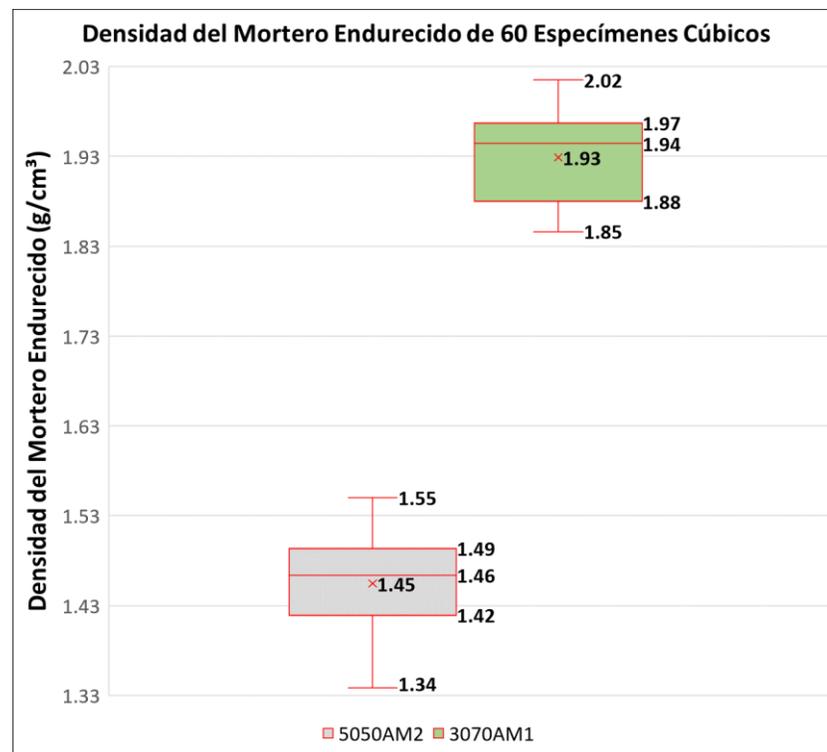
Densidad del mortero.

En la figura 94, se muestran los diagramas de caja y bigote realizados con los valores de 60 densidades, obtenidas en los cubos de mortero elaborados con las dos mezclas

preseleccionadas 3070AM1 y 5050AM2. Con cada una de estas mezclas se elaboraron 30 cubos. Para la mezcla 3070AM1 se tiene valores de densidades entre 1.85 g/cm³ hasta 2.02 g/cm³ sin presentar valores atípicos, la densidad promedio obtenida con esta mezcla es de 1.93 g/cm³. Mientras que para para la mezcla 5050AM2 se tiene valores de densidades entre 1.34 g/cm³ hasta 1.55 g/cm³ sin presentar valores atípicos, la densidad promedio obtenida con esta mezcla es de 1.45 g/cm³. Por lo tanto, los morteros que presentan menor densidad son aquellos elaborados con la mezcla 5050AM2 (50% de cal; 50% de cemento; con aditivo; Modificada de MP2), este valor es menor ya que en esta mezcla se utiliza como árido fino perlita de baja densidad, mientras que para la mezcla 3070AM1 el árido fino utilizado es la arena convencional que tiene una densidad mayor.

Figura 94

Reporte de las densidades obtenidas con las mezclas preseleccionadas.

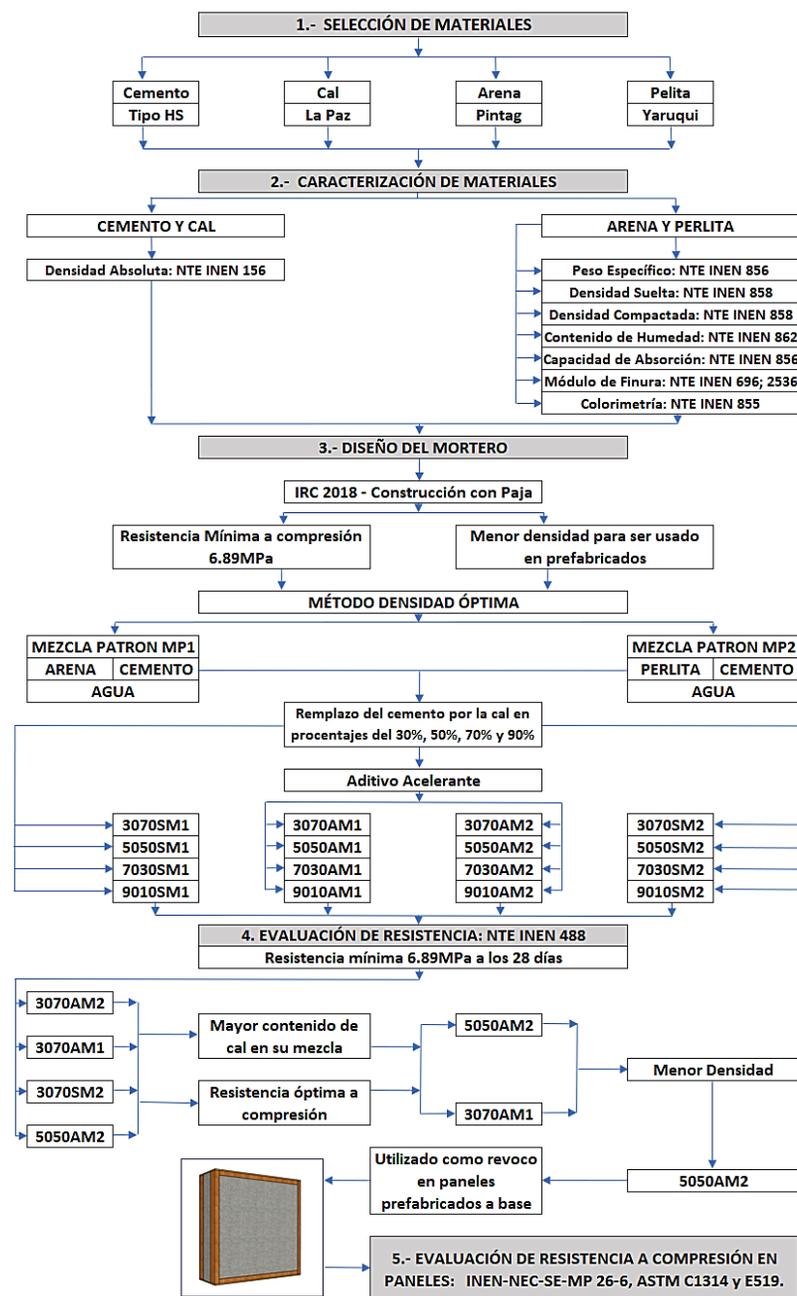


Resumen metodológico utilizado para el diseño y selección de la mezcla óptima.

En la figura 95, se indica el resumen de la metodología empleada en el diseño y selección de la mezcla óptima para la elaboración de morteros a base de cal a utilizarse como recubrimiento de paredes en las construcciones con paja.

Figura 95

Resumen metodológico para el diseño y selección de la mezcla óptima.



Capítulo V

Construcción y caracterización físico – mecánica de paneles elaborados a base de paja de arroz.

Paneles elaborados a base de paja de arroz.

Una vez determinadas las propiedades físico – mecánicas de los fardos de paja, del mortero de recubrimiento a base cal y además de verificar que los mismos cumplan con las condiciones necesarias y suficientes para ser utilizados en las construcciones con paja, se procede a realizar con estos materiales el montaje de paneles prefabricados, que también cuenta con marcos de madera; esto con la finalidad de evaluar sus propiedades físico – mecánicas en conjunto.

Las construcciones de viviendas con paneles prefabricados a base de paja es un sistema novedoso en Ecuador y su uso ha aumentado en otros países, lo que ha generado que existan gran cantidad de empresas que los fabriquen, como por ejemplo EcoConcón, Modcell y Balabox. Todas estas comparten una misma filosofía, la cual es producir el menor impacto ambiental en las construcciones, no solo con el medio ambiente sino también en las personas que las habitan.

Dimensiones.

El tamaño, dimensiones y las formas de estos paneles son muy variados y dependen de la configuración de la vivienda como, por ejemplo, la ubicación de las puertas, ventanas, diseño arquitectónico entre otras más. En esta investigación para el panel se estableció un espesor de 35 cm, que es tomado como referencia de los paneles que fabrican las empresas antes indicadas, donde el mismo puede variar de 30 cm hasta 40 cm. La altura y el largo es de 120 cm, este valor se adoptó debido al tamaño de las muestras que se especifican en las normas ASTM C1314 y ASTM E519 para la realización del ensayo a compresión y tensión diagonal del panel. En el ensayo a compresión, la relación entre la altura (120 cm) y espesor (35 cm) del

panel debe estar entre 1.3 hasta 5.0, mientras que para el ensayo a tensión diagonal la altura (120 cm) y el largo (120 cm) del panel deberá ser el mismo y no será inferior a 120 cm.

Propiedades de los materiales utilizados.

- **Paja**

La paja utilizada para la construcción de los paneles, como se indicó en los capítulos anteriores es obtenida a partir de la cosecha del arroz y para la evaluación de sus propiedades tuvo que ser enfardada. Los valores de estas propiedades cumplen con los mínimos establecidos para utilizarse en las construcciones de viviendas y se indican a continuación en la tabla 52.

Tabla 52

Propiedades de los fardos de paja de arroz.

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m ³)	84.00
Contenido de Humedad (%)	13.00

- **Mortero**

El mortero utilizado como recubrimiento de los paneles es el obtenido con la mezcla 5050AM2 que tiene 50 % de cal, 50 % de cemento, perlita de baja densidad como árido fino y aditivo acelerante de resistencia al 2.5 % de la cantidad de aglomerante. Este cumple con la resistencia mínima de 6.89 MPa establecida por el (Código Residencial Internacional , 2018) para morteros de cal y cemento que son utilizados en paredes y muros construidos con paja. A continuación, en la tabla 53, se resume las propiedades del mortero elaborado con la mezcla 5050AM2.

Tabla 53

Propiedades del mortero de cal y cemento obtenido con la mezcla 5050AM2.

Propiedad	Valor
Densidad (g/cm ³)	1.45
Resistencia a compresión fm (MPa)	7.22
Módulo de elasticidad Ec (MPa)	12628.93
Coefficiente de Poisson ν	0.20
Módulo de Corte G (MPa)	5262.05

- **Madera.**

Para la selección del tipo de madera a utilizarse en la elaboración de los marcos que forman parte de los paneles, se ha tomado como referencia el catálogo de Madera Estructural del Ecuador, que es el resultado de una investigación realizada en la Universidad del Azuay en el año 2019, donde se estudian 40 tipos de maderas producidas en diferentes regiones del Ecuador y que además cumplen los requisitos mínimos y necesarios para ser consideradas como parte de elementos estructurales en las construcciones.

Por lo tanto, para construir los marcos de madera se utilizó laurel del oriente, por sus lugares de producción, propiedades arquitectónicas principalmente como su resistencia a las plagas y al agua, además de las propiedades físico – mecánicas que presenta. Esta madera se la puede conseguir fácilmente en las tres regiones del Ecuador, su producción se da en las provincias del Carchi, Imbabura, Napo y Zamora Chinchipe, presenta alta resistencia a las plagas y al agua, lo cual hace de esta madera ideal para ser utilizada en los marcos, ya que en su gran mayoría estos se encuentran expuestos al aire libre, además de estar siempre en contacto con la paja.

En la tabla 54, se resumen las propiedades arquitectónicas que presenta esta madera:

Tabla 54

Propiedades arquitectónica del laurel del oriente.

Propiedades Arquitectónicas	Baja	Media	Alta
Resistencia al agua			x
Resistencia a plagas			x
Resistencia a factores externos		x	
Textura		x	
Brillo		x	
Veteado longitudinal			x
Veteado tangencial			x

Nota. Recuperado de: (Espinosa, Proaño, & Barrera, 2019)

De igual manera, este tipo de madera cuenta con propiedades físico – mecánicas adecuadas para formar parte de elementos estructurales en las construcciones de viviendas, estas se resumen en la tabla 55:

Tabla 55

Propiedades físico - mecánicas del laurel del oriente.

Propiedades físico - mecánicas	Valor
Clase resistente	C16
Densidad (g/cm ³)	0.37
Módulo de elasticidad E0 (MPa)	8000
Módulo de cortante principal G (MPa)	500
Resistencia a flexión fm,k (MPa)	16
Resistencia a tracción 0 ft0 (MPa)	10
Resistencia a tracción 90 ft90 (MPa)	0.5
Resistencia a compresión 0, fc0 (MPa)	17
Resistencia a compresión 90, fc90 (MPa)	2.2
Resistencia a constante fv (MPa)	1.8

Nota. Recuperado de: (Espinosa, Proaño, & Barrera, 2019)

- **Malla hexagonal.**

Con el objetivo de evitar el fisuramiento del mortero, debido a los efectos de temperatura y contracción generados por la gran cantidad de volumen aplicado en las caras del

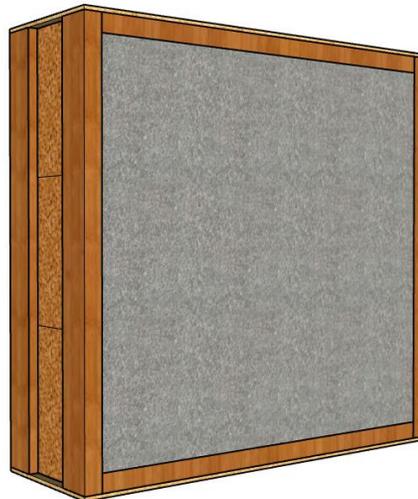
panel, se utiliza malla hexagonal metálica de 1". Esta aparte de contrarrestar el fisuramiento brinda agarre y distribuye de manera uniforme el mortero, manteniendo un mismo espesor de aplicación en toda la superficie del panel.

Configuración del panel.

Para la configuración del panel, por ejemplo, la forma del marco, dimensiones, número de elementos de madera, detalle de uniones entre otras más, fueron adoptadas tomando como referencia el panel tipo o estándar que se indica en la figura 96, que lo fabrica la empresa EcoCocon ubicada en España. La selección de este panel se debe al ser el más utilizado en las construcciones con paja, su forma y tamaño puede variar dependiendo del diseño arquitectónico de la edificación como de su ubicación dentro de la misma.

Figura 96

Panel estándar a base de paja de arroz, marcos de madera y mortero de cal y cemento.

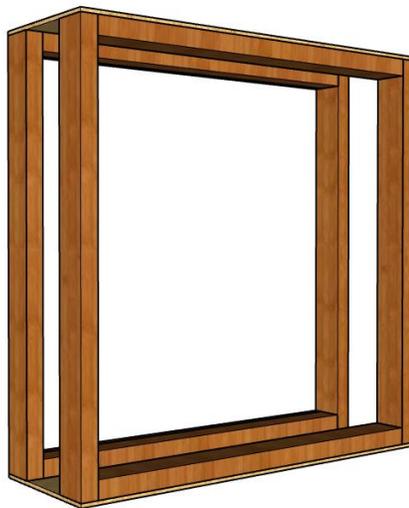


- **Marco de madera.**

Para un panel tipo o estándar, el marco de madera es el que se indica en la figura 97, está compuesto por 8 elementos que tienen una sección transversal de 45 x 95 mm. Los elementos verticales a los cuales se les ha denominado con el nombre de columnetas y los elementos horizontales a los cuales se les ha denominado con el nombre viguetas tienen una longitud de 120 cm.

Figura 97

Marco de madera del panel estándar.

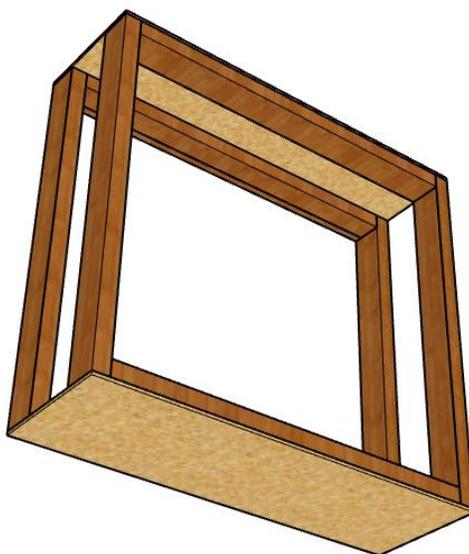


○ **Cara superior e inferior.**

Para un panel tipo o estándar, en la cara superior e inferior se colocan tableros contrachapados de 12 mm de espesor, con dimensiones de 120 x 35 cm, como se indica en la figura 98.

Figura 98

Cara superior e inferior del marco de madera para un panel estándar.



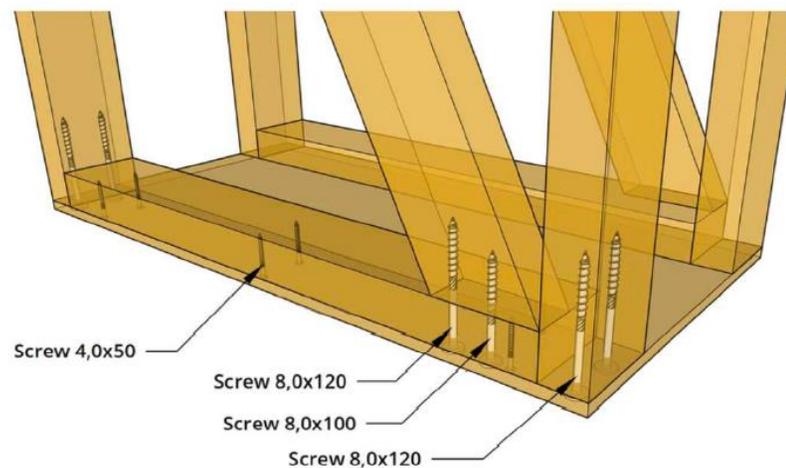
- **Uniones**

Para un panel tipo o estándar, se colocarán las columnetas una en cada esquina de los tableros, de forma que el ancho más largo de la sección transversal de las columnetas se alinee con el borde más pequeño del mismo. Las columnetas y los tableros deben unirse mediante 2 tornillos alineados de forma paralela como se indica en la figura 99, estos tienen un diámetro 8 mm y longitud de 120 mm.

Las viguetas se colocan en cada borde largo de los tableros, de forma que el ancho de 95 mm de la sección transversal de las viguetas entre en contacto con el mismo. Las viguetas y los tableros deberán unirse mediante 2 tornillos de 4 mm de diámetro y longitud de 50 mm, que se colocarán de forma paralela en los extremos y en el centro de las viguetas como se indica en la figura 99.

Figura 99

Detalle de uniones del marco de madera del panel estándar.

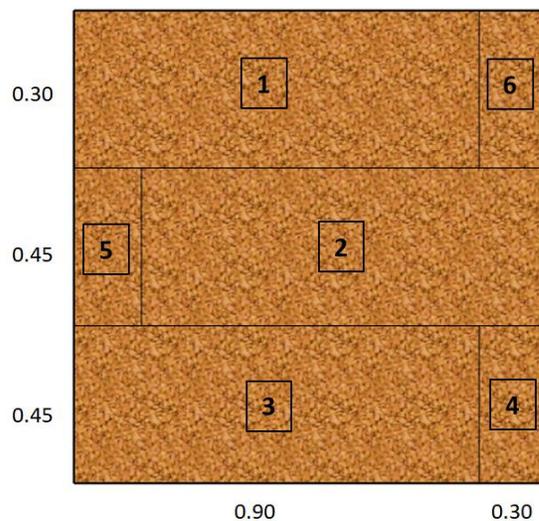


- **Relleno.**

Como relleno del panel se utilizan los fardos de paja, los mismos que deben ser colocados siguiendo la distribución que se indica en la figura 100, con la finalidad de rellenar todo el marco sin dejar espacios vacíos.

Figura 100

Distribución de fardos de paja para un panel estándar.



- **Recubrimiento.**

El mortero de recubrimiento se colocará en la cara frontal y posterior del panel como se indica en la figura 101, el mismo tendrá un espesor de 25 mm. Previamente a la colocación del mortero los fardos de paja deberán estar dentro del marco principal e instalada la malla hexagonal sobre los mismos.

Figura 101

Proceso de recubrimiento con mortero para el panel estándar.



Proceso constructivo del panel.

Una vez establecidas las dimensiones del panel, configuración del marco de madera en cuanto a la ubicación, dimensiones, detalle de uniones entre los elementos que conforman el mismo y distribución de los fardos de paja a colocarse dentro del marco principal, se procedió al montaje de los paneles. A continuación, se detalla paso a paso el proceso constructivo a seguir para la obtención de los mismos, que son elaborados con fardos de paja, marcos de madera y mortero de recubrimiento a base de cal y cemento.

<p>1. OBTENCIÓN DE LA MADERA</p> 	<p>Una vez seleccionada la madera con la que se va a trabajar para la elaboración de viguetas y columnetas que conforman los marcos, se procedió a adquirir cuartones de laurel del oriente de 19 cm x 4.5 cm x 240 cm, para posteriormente realizar el corte adecuado según las dimensiones establecidas para estos elementos.</p>
<p>2. CORTE DE MADERA (VIGENTAS Y COLUMNETAS)</p> 	<p>Cada cuartón de madera se deberá marcar con un lápiz en la mitad del lado largo como en el corto, posteriormente con ayuda de una moladora manual o mecánica cortar los cuartones tomando como guía las marcas realizadas previamente. De esta manera se obtendrán elementos de madera de 9.5 cm x 4.5 cm x 120 cm, que se los podrán utilizar tanto como columnetas y viguetas.</p>

3. TAPAS SUPERIORES E INFERIORES DE LOS MARCOS



Las tapas superiores e inferiores de los paneles a estudiarse en esta investigación se fabrican a partir de planchas de tableros contrachapados que se distribuyen en el medio local con medidas de 122 cm x 244 cm x 1.2 cm. Para la obtención de estos elementos, las planchas se deberán cortar en piezas de 120 cm x 35 cm x 120 cm.

4. ESPIGAS EN COLUMNETAS Y VIGETAS



Con la finalidad de obtener una unión estable y fuerte entre columnetas y viguetas que conforman el marco, se realizaron espigas en los extremos de las columnetas, mientras que en los extremos de las viguetas se dejaron los respectivos espacios para que ingresen las mismas.

5. MONTAJE Y ENCUADRE DE MARCOS DE MADERA



Una vez realizadas las espigas en los elementos de madera, se procede a realizar un montaje provisional entre los mismos, en cada una de las espigas se colocará pegamento blanco y posteriormente serán introducidas en las viguetas, de tal manera de formar los marcos secundarios que son parte del marco principal. Con el objetivo de evitar cuarteaduras o imperfecciones, en cada lado del marco se realizará un encuadre, verificando que todos tengan una dimensión de 120 cm de largo. En uno de los lados del marco principal donde se disponga instalar la tapa superior o inferior, no se deberá colocar pegamento en las espigas de las columnetas, esto con la finalidad de dejar este lado completamente desmontable y así introducir la paja por este lugar.

6. MONTAJE DE TAPAS COMO ELEMENTOS INDIVIDUALES



En los lados de los marcos que han sido seleccionados para introducir la paja, se construyen tapas que son desmontables y que se colocarán de manera definitiva hasta rellenar completamente el panel con este desecho agroindustrial. Para la construcción de las mismas, las viguetas se deberán unir con los tableros mediante tornillos de 4 mm de diámetro y 50 mm de longitud que son ubicados de forma paralela en los extremos y en el centro de cada vigueta, con la finalidad de formar un solo elemento.

Con el objetivo de mantener una misma distancia y separación entre los tornillos, se deberá realizar marcas sobre el tablero que servirán como una guía cuando se coloquen los mismos mediante el uso del taladro. Para el otro lado del panel donde la tapa no es desmontable, el tablero se colocará directamente sobre las viguetas y el proceso para el colocado de los tornillos será exactamente el mismo.

7. MONTAJE FINAL DE MARCOS



Las tapas deberán ser colocadas sobre los marcos secundarios que están separados entre sí 35 cm medidos desde los bordes externos, posteriormente se procede a instalar de forma paralela y alineados en una sola fila dos tornillos de 8 mm de diámetro y 120 mm de longitud en cada una de la esquina del marco y sobre los tableros.

Estos tornillos cumplen la función de formar un solo elemento entre los marcos secundarios y la tapa superior e inferior, además de reforzar las uniones entre las columnetas y las viguetas y así obtener el montaje definitivo del marco principal, para posteriormente proceder a rellenar el mismo con paja.

8. RELLENO DE PANELES CON FARDOS DE PAJA



Para iniciar el proceso de relleno, el marco se colocará en una superficie completamente recta y sin la tapa superior. Una vez en esta posición sobre la tapa inferior y dentro del marco se ubicará un fardo pegado a una de las esquinas del mismo, para completar el relleno de la primera fila se cortará un fardo a la mitad donde será cosido para evitar que se desarme.



Posteriormente con ayuda de un tablero dispuesto de forma vertical y colocado entre el fardo completo y el espacio aun sin rellenar, se introducirá la mitad del fardo haciéndolo resbalar sobre el tablero e ingresándolo a presión con las manos y pies, el tablero se deberá retirar cuando se haya rellenado completamente la primera fila.

A fin de evitar que las columnetas de los marcos se cuarteen o se abran durante este procedimiento debido a la presión con la que es introducida la paja y como consecuencia de haber dejado el marco sin su tapa superior, se colocará una cuerda alrededor de las cuatro columnetas, la misma que mantendrá el ancho y posición correcta de todos los elementos que con forman el marco principal, hasta terminar el proceso de relleno.

Para la siguiente fila a rellenar, el procedimiento es similar tal como se realizó con la primera fila, pero el fardo completo se deberá colocar sobre la mitad del fardo de la fila inferior y la mitad del fardo para esta fila se colocará sobre el fardo completo de la fila inferior.

9. INSTALACIÓN DE LA TAPA SUPERIOR DEL PANEL



Todos los paneles deberán ser rellenos hasta que la paja sobresalga unos 20 cm aproximadamente por la parte superior del marco, posteriormente y como procedimiento final se colocará la tapa superior desmontable para confinar completamente la paja. La tapa se instalará sobre el marco mediante dos tornillos de 8 mm de diámetro y 120 mm de longitud, dispuestos paralelamente en cada una de sus esquinas y sobre el tablero contrachapado, los tornillos perforaran las viguetas y columnetas logrando de esta manera la unión entre estos elementos a fin de conformar un solo elemento monolítico cuyo resultado final será el panel.

10. INSTALACIÓN DE LA MALLA HEXAGONAL EN EL PANEL.



Culminado el proceso de montaje de los paneles y previamente a la colocación del mortero de recubrimiento, en las caras de los mismos se instalará una malla hexagonal de 120 cm de ancho por 120 cm de alto, con la finalidad de evitar el fisuramiento del mortero.

Para la colocación de la malla, los paneles serán ubicados de forma horizontal sobre una superficie lisa y nivelada, en los bordes internos del marco se colocarán clavos de vidrio a 2 cm medidos desde el borde externo y separados cada 15 cm, en estos se fijarán los bordes de la malla metálica, la cual deberá estar correctamente templada y fija en el panel.

11. COLOCACIÓN DEL MORTERO DE RECUBRIMIENTO.



Una vez que la malla metálica haya sido instalada en el panel se procederá a colocar el mortero de recubrimiento elaborado con la mezcla 5050AM2. Primero se deberá determinar la dosificación correspondiente que permita encontrar las cantidades de agua, cemento, perlita, cal, aditivo para obtener el mortero necesario que recubra una de las caras de todos los paneles fabricados.

La mezcla de los materiales se realizará de forma manual en sitio mediante el uso de herramientas menores, una vez que esta esté lista, los paneles deberán ser colocados de forma horizontal para realizar el vertido del mortero en las caras superiores de los mismos.

Mediante el uso de un codal el mortero vertido se distribuirá de forma uniforme en toda la cara del panel y sin que queden esquinas por rellenar, en el caso de que el nivel del mortero no coincida con el nivel del marco se colocará o retirará el mortero según sea el caso.

Cuando se haya recubierto todas las caras superiores de los paneles estos se dejarán en la misma posición por cinco días en un lugar libre de humedad y envueltos en plástico, luego de



transcurrido este tiempo los paneles se colorarán de forma vertical por 10 días más hasta que el mortero adquiera resistencia.

Cuando se haya cumplido en total 15 días desde que fue colocado el mortero de recubrimiento en las caras superiores del panel, se procederá a recubrir con mortero las caras faltantes siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Para que este último recubrimiento alcance la resistencia esperada, se deberá dejar los paneles envueltos en plástico por 28 días desde su colocación.

Finalmente habiendo cumplido los paneles con la edad requerida, los mismos fueron trasladados al Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, para la realización de los ensayos respectivos que permitan determinar sus propiedades físico – mecánicas.

Determinación de las propiedades físico – mecánicas en paneles elaborados a base de paja de arroz.

Con la finalidad de verificar el aporte de la paja y del mortero de recubrimiento en las propiedades mecánicas de los paneles, se realizó el ensayo a compresión y a tensión diagonal de los siguientes especímenes:

- Marcos de madera de 120 cm x 120 cm.
- Paneles (Marcos de madera + paja) de 120 cm x 120 cm.
- Paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento) de 120 cm x 120 cm.

En la tabla 56, se muestra la cantidad de especímenes a ensayarse a compresión conforme la distribución anterior, además de la nomenclatura establecida para cada uno de los mismos.

Tabla 56

Cantidad de especímenes para el ensayo a compresión de paneles.

Ensayo a compresión de paneles		
Id.	Composición del panel	Cantidad
MC1	Marco de madera + paja + recubrimiento	3
MC2	Marco de madera + paja	3
MC3	Marco de madera	3

En la tabla 57, se muestra la cantidad de especímenes a ensayarse a tensión diagonal conforme la distribución indicada anteriormente, además de la nomenclatura establecida para cada uno de los mismos.

Tabla 57

Cantidad de especímenes para el ensayo a tensión diagonal de paneles.

Ensayo a tensión diagonal de paneles		
Id.	Composición del panel	Cantidad
MT1	Marco de madera + paja + recubrimiento	3
MT2	Marco de madera + paja	3
MT3	Marco de madera	3

En este sentido para determinar la resistencia a compresión y tensión diagonal de los paneles a base de paja de arroz, se fabricaron un total de 18 especímenes que se diferencian por los elementos que los conforman (marcos de madera, paja y recubrimiento), 9 se ensayaron a compresión y 9 a tensión diagonal, conforme la distribución indicada en las tablas anteriores.

Paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento)

- **Dimensiones.**

Se construyeron un total de 6 paneles completos compuestos por marcos de madera, fardos de paja y recubrimiento a base de cal y cemento, tres se utilizaron para la realización del ensayo a compresión simple y los tres restantes para el ensayo de tensión diagonal. En la tabla 58 se indican las dimensiones de los mismos y la codificación asignada para cada uno:

Tabla 58

Dimensiones de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento)

Ensayo	Id.	Dimensiones		
		Altura	Largo	Ancho
		cm	cm	cm
Compresión axial	MC1 - 1	120.00	120.00	35.20
	MC1 - 2	120.00	120.00	35.40
	MC1 - 3	120.00	120.00	34.50
Tensión diagonal	MT1 - 1	120.00	120.00	35.20
	MT1 - 2	120.00	120.00	35.20
	MT1 - 3	120.00	120.00	35.20

- **Masa.**

Cuando los recubrimientos aplicados en las caras de los paneles hayan cumplido un tiempo no menor a 28 días desde su colocación, mediante el uso de una balanza tipo báscula que es atada a cada uno de los paneles, se determinará la masa de los mismos como se indica en la figura 102.

Figura 102

Determinación de la masa de los paneles.



En la tabla 59, se muestra la masa obtenida para cada uno de los paneles compuestos por marcos de madera, fardos de paja y recubrimiento a base de cal y cemento.

Tabla 59

Masa de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).

Ensayo	Id.	Masa
		kg
Compresión axial	MC1 - 1	152.20
	MC1 - 2	150.00
	MC1 - 3	149.65
Tensión diagonal	MT1 - 1	153.60
	MT1 - 2	151.00
	MT1 - 3	148.20

- **Resistencia a compresión axial.**

Los ensayos a compresión de los paneles, se ejecutaron en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, siguiendo los procedimientos que se describen en las normas NTE INEN 3153 “Ensayo de compresión de muretes” y ASTM C1314 “Compressive Strength of Masonry Prisms”.

El ensayo a compresión consiste en aplicar una carga vertical continua y uniforme en el centro de la cara superior del panel hasta alcanzar la carga máxima donde este falle, para

calcular el esfuerzo máximo a compresión de cada espécimen se deberá determinar la relación entre la carga máxima a compresión soportada por el panel y el área transversal neta donde se aplicó la carga. A continuación, se indica la ecuación que permite calcular el esfuerzo a compresión:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

f_m = Esfuerzo a compresión máximo del panel [MPa].

P = Carga máxima aplicada sobre el panel [N].

A = Área transversal del panel perpendicular a la carga aplicada [mm²].

En la figura 103 se puede observar el ensayo a compresión de los paneles compuestos por marcos de madera, fardos de paja y recubrimiento a base de cal.

Figura 103

Ensayo a compresión de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).



Según la norma NTE INEN 3153 “Ensayo de compresión de muretes” y ASTM C1314 “Compressive Strength of Masonry Prisms” señalan que la relación entre h_p/tp (altura/ancho) del panel debe estar entre 1.5 a 5.0, para el caso de los paneles fabricados esta relación es igual a 3.43 y permite determinar el factor de corrección por esbeltez que se indica en la tabla 60.

Tabla 60

Factores de corrección para la resistencia a la compresión de los paneles.

hp/tp	1.30	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
Factor de corrección	0.75	0.86	1.00	1.04	1.07	1.15	1.22

Cuando el factor de corrección para el valor de la relación hp/tp no se pueda determinar de forma directa utilizando la tabla 60 como en el caso de los paneles fabricados en la presente investigación, entonces se deberá realizar una interpolación lineal entre los valores presentados. Finalmente, para calcular el esfuerzo a compresión definitivo de los paneles se deberá multiplicar el esfuerzo determinado previamente por el factor de corrección. A continuación, se indica la ecuación que permite determinar el esfuerzo a compresión corregido:

$$f_{mt} = \frac{P}{A} * C_m$$

f_{mt} = Esfuerzo a compresión máximo corregido del panel [MPa].

P = Carga máxima aplicada sobre el panel [N].

A = Área transversal del panel perpendicular a la carga aplicada [mm²].

C_m = Factor de corrección por esbeltez del panel [mm²].

En la tabla 61 se muestra los esfuerzos a compresión corregidos por esbeltez de los tres paneles compuestos por marcos de madera, fardos de paja y recubrimiento a base de cal.

Tabla 61

Esfuerzos a compresión máximos en paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).

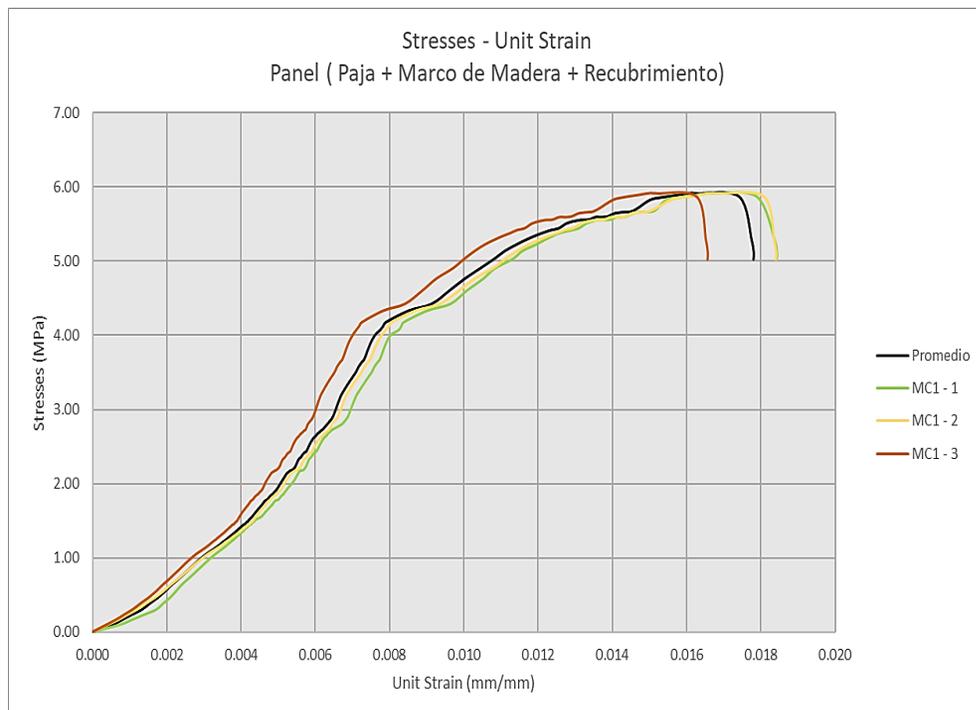
Panel	Edad del mortero	Carga Máxima	f _m	Promedio (f _m)	hp/tp	C _m	f _{mt}	Promedio (f _{mt})
	días	kN	MPa	MPa			MPa	MPa
MC1-1	45	182.78	5.38	5.37	3.43	1.102	5.93	5.92
MC1-2	45	182.49	5.37				5.92	
MC1-3	45	182.78	5.38				5.93	

- **Módulo de elasticidad.**

De los ensayos a compresión realizados, se obtienen los registros de cargas y desplazamientos para diferentes instantes de tiempo. De estos registros y mediante el uso de las ecuaciones anteriormente indicadas se construyen los diagramas esfuerzos vs deformaciones unitarias de cada panel, los mismos se indican en la figura 104, además se obtiene un diagrama adicional con los valores promedios de los tres paneles ensayados MC1 – 1, MC1 – 2, MC1 – 3.

Figura 104

Diagramas esfuerzos vs deformaciones de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).



Una vez obtenidos los diagramas esfuerzo vs deformación para los paneles con marcos de madera, fardos de paja y recubrimiento a base de cal, se procedió a determinar el módulo de elasticidad experimental de cada uno de estos, para lo cual se aplicó el método de la cuerda tangente descrito en la norma ASTM C469 “Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compresión, al igual que lo describe la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE “

Determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad en muros de mampostería”. Por lo tanto, para la obtención del módulo de elasticidad se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005}$$

E_m = Módulo de elasticidad del panel [MPa].

σ_2 = Esfuerzo a axial a compresión al 40% de la carga máxima [MPa].

σ_1 = Esfuerzo a axial a compresión para una deformación unitaria de 0.00005 [MPa].

ε_2 = Deformación unitaria obtenida para σ_2 [MPa].

A continuación, en la tabla 62 se indica el módulo de elasticidad obtenido para los paneles ensayados a compresión, también se muestran los valores de los esfuerzos σ_1 , σ_2 y de deformación unitaria ε_2 .

Tabla 62

Módulo de elasticidad en paneles (Marco de madera + paja + recubrimiento).

Panel	σ_1	σ_2	ξ_{01}	ξ_{02}	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad Promedio
	MPa	MPa	mm/mm	mm/mm	MPa	MPa
MC1-1	0.00664	2.36688	0.00005	0.00590	403.46	424.08
MC1-2	0.01179	2.36688	0.00005	0.00577	411.73	
MC1-3	0.01310	2.36688	0.00005	0.00520	457.05	

En la figura 105 se presenta las imágenes de los paneles después del ensayo a compresión, en estos se puede verificar la presencia de fallas típicas, como por ejemplo fallas por flexión que se reconocen por el apareamiento de fisuras con una inclinación a 90° tanto en el extremo superior e inferior del panel. Además, se observa una falla por aplastamiento generada a un tercio de la altura del panel medida desde el extremo superior, en esta zona se produce la separación entre el recubrimiento y los fardos de paja, por lo tanto, la paja en los paneles garantiza que las fallas en los mismos dejen de ser explosivas, además se evidenció

un buen agarre entre estos dos elementos, ya que al momento del desprendimiento la paja se desgarró ocasionando que los tallos queden adheridos al mortero. En algunas zonas como en la parte inferior del panel se observan fisuras a 45° de inclinación que se conocen como fallas por corte.

Figura 105

Fallas a compresión en paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).



- **Resistencia a tensión diagonal.**

Los ensayos a tensión diagonal de los paneles, se ejecutaron en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, siguiendo los procedimientos que se describen en las normas NEC - SE - MP "Mampostería Estructural" y ASTM E519 "Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages".

Este ensayo consiste en aplicar una carga vertical continua y uniforme en las esquinas de los paneles, es decir a lo largo de su diagonal, por lo que estos deberán estar ubicados con un ángulo de inclinación de 45° durante el ensayo hasta alcanzar la carga máxima de rotura y provocar la falla por tensión diagonal. Los paneles deberán ensayarse a una edad mínima de 28 días, con la finalidad de que el mortero de recubrimiento adquiera la resistencia esperada.

Para determinar los esfuerzos por tensión diagonal de cada espécimen se deberá utilizar la siguiente ecuación, la misma se indica en la norma ASTM E519.

$$S_s = \frac{0.707P}{A_n}$$

S_s = Esfuerzo de corte para el área neta [MPa].

P = Carga aplicada sobre el panel [N].

A_n = Área neta del panel [mm²].

La ecuación que permite determinar el valor del área neta (A_n) del panel es la siguiente:

$$A_n = \left(\frac{w + h}{2} \right) tn$$

w = Ancho del panel [mm].

h = Altura del panel [mm].

t = Espesor del panel [mm].

n = Porcentaje del área bruta sólida del panel expresada en decimales [mm²].

En la figura 106 se puede observar el ensayo a compresión diagonal de los paneles compuestos por marcos de madera, fardos de paja y recubrimiento a base de cal.

Figura 106

Ensayo a compresión diagonal de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).



En la tabla 63 se muestra los esfuerzos máximos a corte de los tres paneles compuestos por marcos de madera, fardos de paja y recubrimiento a base de cal.

Tabla 63

Esfuerzos cortantes máximos en paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).

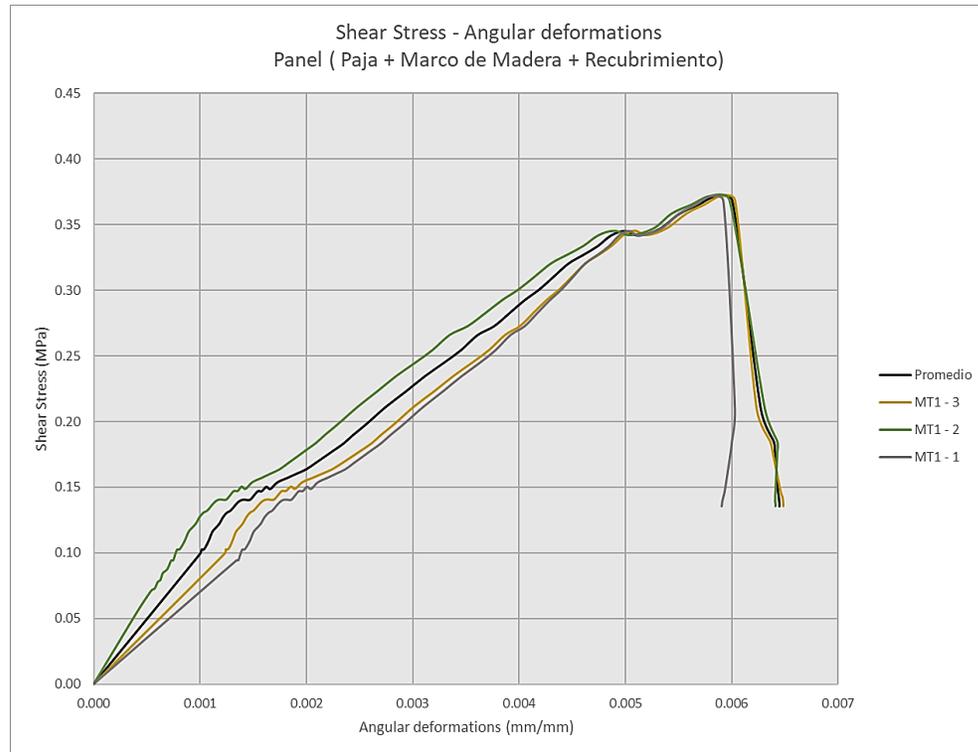
Panel	Edad del mortero	Ancho (w)	Altura (h)	Espesor (t)	Área neta (An)	Carga Máxima	Esfuerzo Cortante (Ss)	Promedio (Ss)
	días	mm	mm	mm	mm ²	kN	MPa	MPa
MT1-1	45	1200	1200	350.20	50428.80	26.66	0.37	0.38
MT1-2	45	1200	1200	350.20	50428.80	27.66	0.39	
MT1-3	45	1200	1200	350.20	50428.80	26.66	0.37	

- **Módulo de rigidez a corte.**

De los ensayos a tensión diagonal realizados, se obtienen los registros de cargas y desplazamientos tanto verticales y horizontales para diferentes instantes de tiempo. De estos registros y mediante el uso de las ecuaciones anteriormente indicadas se construyen los diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de cada panel, los mismos se indican en la figura 107, además se obtienen un diagrama adicional con los valores promedios de los tres paneles ensayados MT1 – 1, MT1 – 2, MT1 – 3.

Figura 107

Diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).



Una vez obtenidos los diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de los paneles con marcos de madera, fardos de paja y recubrimiento a base de cal, se determinó el módulo de rigidez a corte de cada espécimen, siguiendo la misma metodología utilizada en la determinación del módulo de elasticidad de los mismos, para lo cual se aplicó el método de la cuerda tangente. Por lo tanto, para la obtención del módulo de rigidez a corte se utilizó la siguiente ecuación:

$$Gm = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005}$$

Gm = Módulo de rigidez a corte [MPa].

τ_2 = Esfuerzo a corte al 40% de la carga máxima [MPa].

τ_1 = Esfuerzo a corte para una deformación unitaria de 0.00005 [MPa].

γ_2 = Deformación angular obtenida para τ_2 [MPa].

A continuación, en la tabla 64 se indica el módulo de rigidez a corte obtenido para los paneles ensayados a compresión diagonal, también se muestran los valores de los esfuerzos cortantes τ_1 , τ_2 y deformación angular γ_2 .

Tabla 64

Módulo de rigidez a corte en paneles (Marcos de madera + paja + recubrimiento).

Panel	τ_1	τ_2	γ_1	γ_2	Módulo de Rigidez a Corte	Módulo de Rigidez a Corte Promedio
	MPa	MPa	mm/mm	mm/mm	MPa	MPa
MT1-1	0.00351	0.14872	0.00005	0.00113	134.45	157.11
MT1-2	0.00673	0.14872	0.00005	0.00079	192.19	
MT1-3	0.00403	0.14872	0.00005	0.00105	144.69	

En la figura 108 se presenta las imágenes de los paneles después del ensayo a compresión diagonal, en estos se pueden observar fallas típicas por tensión diagonal o cortante que se caracterizan principalmente por la presencia de grietas a lo largo de la diagonal en compresión, ocurren en la mayoría de casos cuando los esfuerzos principales de tensión son superiores a la resistencia del panel o de la mampostería.

En un porcentaje menor y con poca recurrencia se presentan fallas por aplastamiento en las esquinas cargadas de los paneles, que ocurren por la presencia de grandes esfuerzos a compresión biaxial en estas zonas, además este tipo de fallas también puede deberse al tener marcos flexibles que confinan la mampostería de relleno y en algunos casos por contar con muros o paneles de mampostería esbeltos donde la relación (altura y largo) H/L es mayor que 1.

Figura 108

Fallas a compresión diagonal en paneles (Marco de madera + paja + recubrimiento).



Paneles (Marcos de madera + paja)

Para la determinación de las propiedades físico – mecánicas de estos paneles, se siguió la misma metodología utilizada en los paneles con marcos de madera, paja y recubrimiento a base de cal, que ya se indicó anteriormente, por este motivo, en el siguiente apartado únicamente se detallaran los resultados de las propiedades obtenidas para los mismos.

- **Dimensiones.**

Se construyeron un total de 6 paneles compuestos por marcos de madera y fardos de paja, tres se utilizaron para la realización del ensayo a compresión simple y los tres restantes para el ensayo de tensión diagonal. En la tabla 65 se indican las dimensiones de los mismos y la codificación asignada para cada uno.

Tabla 65

Dimensiones de paneles (Marcos de madera + paja).

Ensayo	Id.	Dimensiones		
		Altura	Largo	Ancho
		cm	cm	cm
Compresión axial	MC2 - 1	120.00	120.00	35.00
	MC2 - 2	120.00	120.00	35.00
	MC2 - 3	120.00	120.00	35.00
Tensión diagonal	MT2 - 1	120.00	120.00	35.10
	MT2 - 2	120.00	120.00	35.20
	MT2 - 3	120.00	120.00	35.30

- **Masa.**

Mediante el uso de una balanza tipo báscula que es atada a cada uno de los paneles, se determinó la masa de los mismos, en la tabla 66, se muestran los valores de las masas obtenidas para cada uno de los paneles compuestos por marcos de madera y fardos de paja.

Tabla 66

Masa de paneles (Marcos de madera + paja).

Ensayo	Id.	Masa
		kg
Compresión axial	MC2 - 1	67.20
	MC2 - 2	73.90
	MC2 - 3	71.30
Tensión diagonal	MT2 - 1	69.20
	MT2 - 2	70.90
	MT2 - 3	72.30

- **Resistencia a compresión axial.**

Los ensayos a compresión de los paneles, se ejecutaron en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, siguiendo los procedimientos que se describen en las normas NTE INEN 3153 “Ensayo de compresión de muretes” y ASTM C1314 “Compressive Strength of Masonry Prisms”.

En la figura 109 se puede observar el ensayo a compresión de los paneles compuestos por marcos de madera y fardos de paja.

Figura 109

Ensayo a compresión de paneles (Marcos de madera + paja).



En la tabla 67 se muestra los esfuerzos a compresión corregidos por esbeltez de los tres paneles compuestos por marcos de madera y fardos de paja.

Tabla 67

Esfuerzos a compresión máximos en paneles (Marcos de madera + paja).

Panel	Carga	fm	Promedio (fm)	hp/tp	Cm	fmt	Promedio (fmt)
	kN	MPa	MPa			MPa	MPa
MC2-1	87.76	3.67	3.65	3.43	1.102	4.04	4.03
MC2-2	86.35	3.61				3.98	
MC2-3	88.08	3.68				4.06	

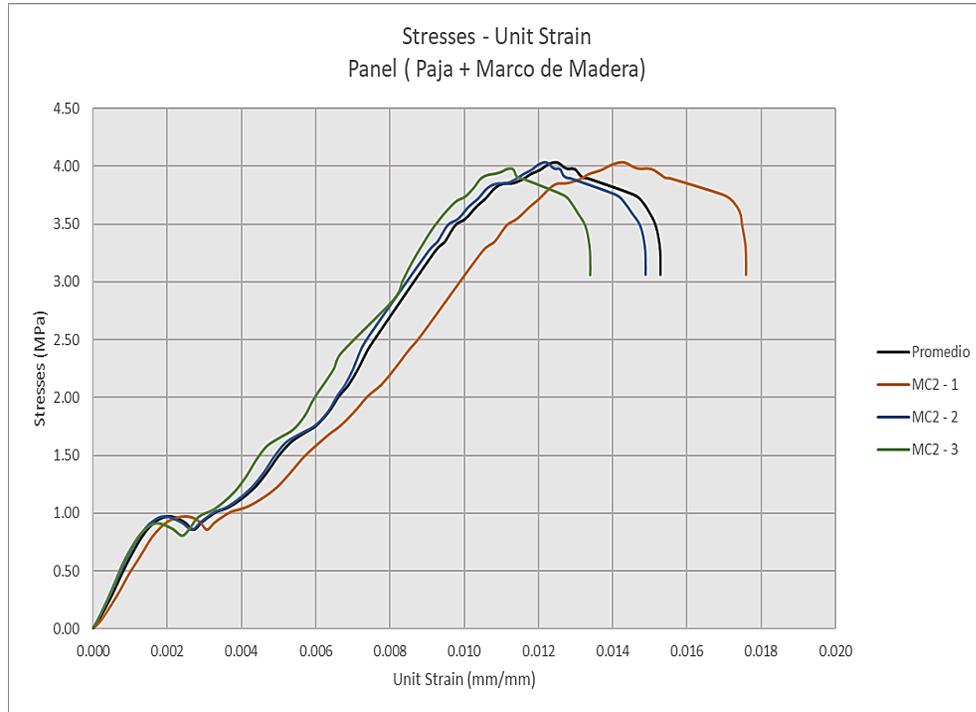
- **Módulo de elasticidad en paneles.**

De los ensayos a compresión realizados, se obtienen los registros de cargas y desplazamientos para diferentes instantes de tiempo. De estos registros se construyen los diagramas esfuerzos vs deformaciones unitarias de cada panel, los mismos se indican en la

figura 110, además se obtiene un diagrama adicional con los valores promedios de los tres paneles ensayados MC2 – 1, MC2 – 2, MC2 – 3.

Figura 110

Diagramas esfuerzos vs deformaciones de paneles (Marcos de madera + paja).



Una vez obtenidos los diagramas esfuerzo vs deformación para los paneles con marcos de madera y fardos de paja, se procedió a determinar el módulo de elasticidad experimental de cada uno de estos, para lo cual se aplicó el método de la cuerda tangente descrito en la norma ASTM C469 “Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”, al igual que lo describe la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE “Determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad en muros de mampostería”.

A continuación, en la tabla 68 se indica el módulo de elasticidad obtenido para los paneles ensayados a compresión, también se muestran los valores de los esfuerzos σ_1 , σ_2 y de deformación unitaria ϵ_2 .

Tabla 68

Módulo de elasticidad en paneles (Marcos de madera + paja).

Panel	σ_1	σ_2	ξ_{01}	ξ_{02}	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad Promedio
	MPa	MPa	mm/mm	mm/mm	MPa	MPa
MC2-1	0.01678	1.61191	0.00005	0.00611	263.22	303.33
MC2-2	0.02756	1.61191	0.00005	0.00521	307.05	
MC2-3	0.02878	1.61191	0.00005	0.00471	339.73	

- **Resistencia a tensión diagonal.**

Los ensayos a tensión diagonal de los paneles, se ejecutaron en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, siguiendo los procedimientos que se describen en las normas NEC - SE - MP “Mampostería Estructural” y ASTM E519 “Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages”.

En la figura 111 se puede observar el ensayo a compresión diagonal de los paneles compuestos por marcos de madera y fardos de paja.

Figura 111

Ensayo a compresión diagonal de paneles (Marcos de madera + paja).



En la tabla 69 se muestra los esfuerzos máximos a corte de los tres paneles compuestos por marcos de madera y fardos de paja.

Tabla 69

Esfuerzos cortantes máximos en paneles (Marcos de madera + paja).

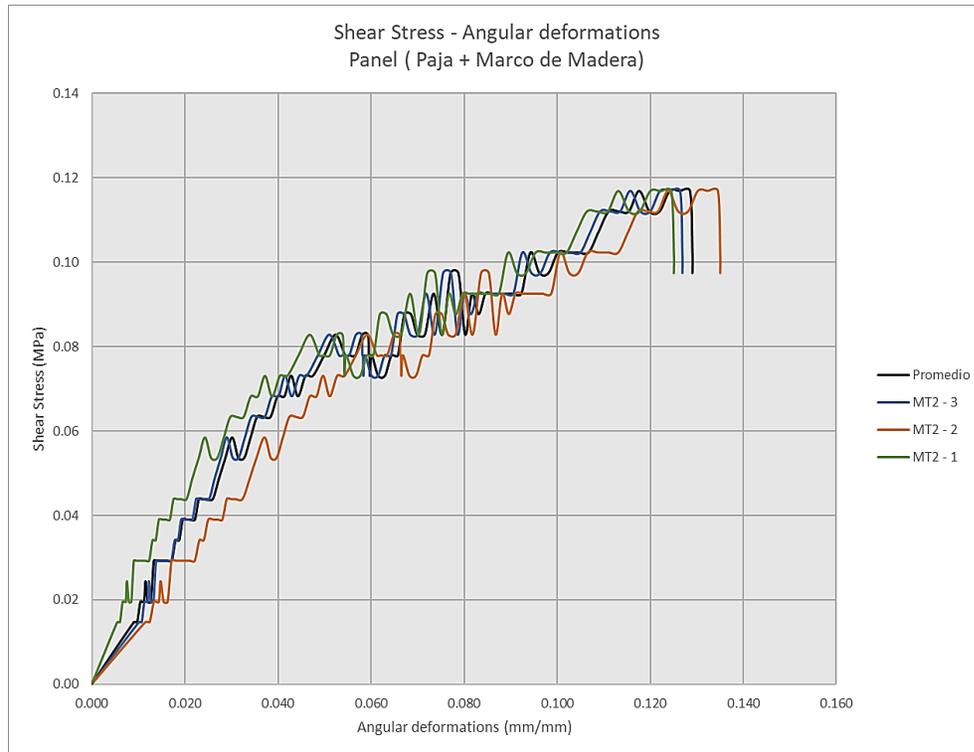
Panel	Ancho (w)	Altura (h)	Espesor (t)	Área neta (An)	Carga Máxima	Esfuerzo Cortante (Ss)	Promedio (Ss)
	mm	mm	mm	mm ²	kN	MPa	MPa
MT2-1	1200	1200	350.20	17109.77	2.75	0.11	0.12
MT2-2	1200	1200	350.20	17109.77	2.87	0.12	
MT2-3	1200	1200	350.20	17109.77	2.84	0.12	

- **Módulo de rigidez a corte.**

De los ensayos a tensión diagonal realizados, se obtienen los registros de cargas y desplazamientos tanto verticales y horizontales para diferentes instantes de tiempo. De estos registros y mediante el uso de las ecuaciones anteriormente indicadas se construyen los diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de cada panel, los mismos se indican en la figura 112, además se obtienen un diagrama adicional con los valores promedios de los tres paneles ensayados MT2 – 1, MT2 – 2, MT2 – 3.

Figura 112

Diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de paneles (Marcos de madera + paja).



Una vez obtenidos los diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de los paneles con marcos de madera y fardos de paja, se determinó el módulo de rigidez a corte de cada espécimen, siguiendo la misma metodología utilizada en la determinación del módulo de elasticidad de los mismos, para lo cual se aplicó el método de la cuerda tangente.

A continuación, en la tabla 70 se indica el módulo de rigidez a corte obtenido para los paneles ensayados a compresión diagonal, también se muestran los valores de los esfuerzos cortantes τ_1 , τ_2 y deformación angular γ_2 .

Tabla 70

Módulo de rigidez a corte en paneles (Marcos de madera + paja).

Panel	τ_1	τ_2	γ_1	γ_2	Módulo de Rigidez a Corte	Módulo de Rigidez a Corte Promedio
	MPa	MPa	mm/mm	mm/mm	MPa	MPa
MT2-1	0.000134	0.04670	0.00005	0.02110	2.21	1.81
MT2-2	0.000064	0.04670	0.00005	0.03333	1.40	
MT2-3	0.000072	0.04670	0.00005	0.02592	1.80	

Paneles (Marcos de madera)

Para la determinación de las propiedades físico – mecánicas de los marcos de madera, se siguió la misma metodología utilizada en los paneles con marcos de madera, paja y recubrimiento a base de cal, que ya se indicó anteriormente, por este motivo, en el siguiente apartado únicamente se detallaran los resultados de las propiedades obtenidas.

- **Dimensiones.**

Se construyeron un total de 6 marcos de madera, tres se utilizaron para la realización del ensayo a compresión simple y los tres restantes para el ensayo de tensión diagonal. En la tabla 71 se indican las dimensiones de los mismos y la codificación asignada para cada uno.

Tabla 71

Dimensiones de paneles (Marcos de madera).

Ensayo	Id.	Dimensiones		
		Altura	Largo	Ancho
		cm	cm	cm
Compresión axial	MC3 - 1	120.00	120.00	35.00
	MC3 - 2	120.00	120.00	35.00
	MC3 - 3	120.00	120.00	35.00
Tensión diagonal	MT3 - 1	120.00	120.00	35.30
	MT3 - 2	120.00	120.00	35.20
	MT3 - 3	120.00	120.00	35.10

- **Masa.**

Mediante el uso de una balanza tipo báscula que es atada a cada uno de los marcos, se determinó la masa de los mismos, en la tabla 72, se muestran los valores de las masas obtenidas para cada uno de los marcos de madera.

Tabla 72

Masa de paneles (Marcos de madera).

Ensayo	Id.	Masa
		kg
Compresión axial	MC3 - 1	29.80
	MC3 - 2	31.30
	MC3 - 3	28.90
Tensión diagonal	MT3 - 1	30.30
	MT3 - 2	29.70
	MT3 - 3	31.20

- **Resistencia a compresión axial.**

Los ensayos a compresión de los marcos, se ejecutaron en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, siguiendo los procedimientos que se describen en las normas NTE INEN 3153 “Ensayo de compresión de muretes” y ASTM C1314 “Compressive Strength of Masonry Prisms”. En la figura 113 se puede observar el ensayo a compresión de los marcos de madera.

Figura 113

Ensayo a compresión de paneles (Marcos de madera).



En la tabla 73 se muestra los esfuerzos a compresión de los tres marcos de madera.

Tabla 73

Esfuerzos a compresión máximos en paneles (Marcos de madera).

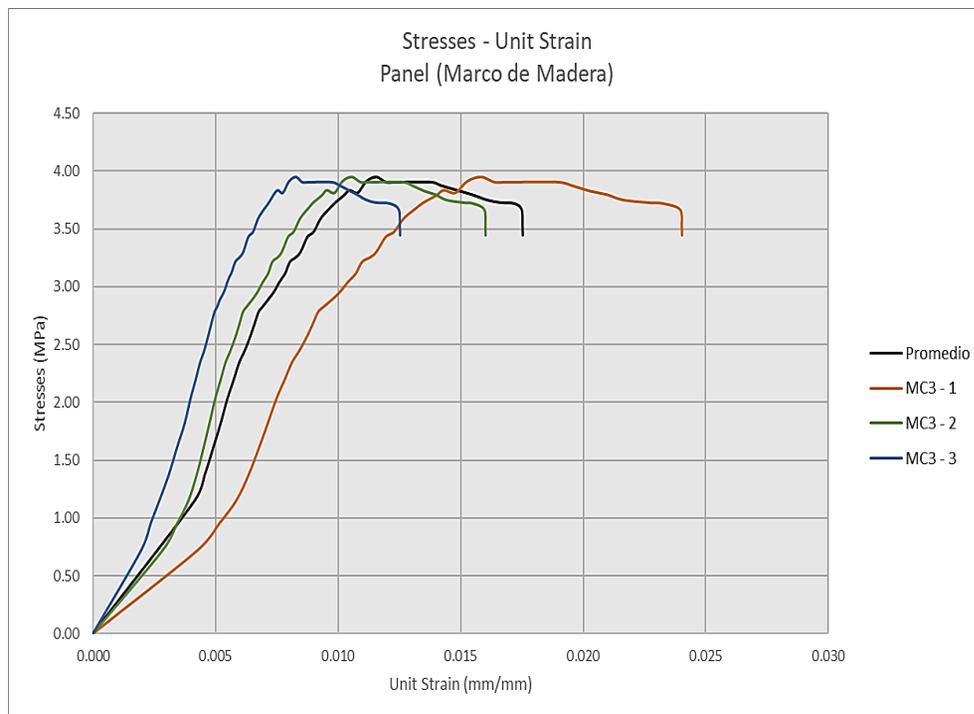
Panel	Carga	fm	Promedio (fm)	hp/tp	Cm	fmt	Promedio (fmt)
	kN	MPa	MPa			MPa	MPa
MC3-1	15.31	3.58	3.60	3.43	1.102	3.95	3.96
MC3-2	15.71	3.67				4.05	
MC3-3	15.12	3.54				3.90	

- **Módulo de elasticidad.**

De los ensayos a compresión realizados, se obtienen los registros de cargas y desplazamientos para diferentes instantes de tiempo. De estos registros se construyen los diagramas esfuerzos vs deformaciones unitarias de cada marco, los mismos se indican en la figura 114, además se obtiene un diagrama adicional con los valores promedios de los tres marcos ensayados MC3 – 1, MC3 – 2, MC3 – 3.

Figura 114

Diagramas esfuerzos vs deformaciones de paneles (Marcos de madera).



Una vez obtenidos los diagramas esfuerzo vs deformación para los marcos de madera, se procedió a determinar el módulo de elasticidad experimental de cada uno de estos, para lo cual se aplicó el método de la cuerda tangente descrito en la norma ASTM C469 “Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”, al igual que lo describe la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE “Determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad en muros de mampostería”.

A continuación, en la tabla 74 se indica el módulo de elasticidad obtenido para los marcos ensayados a compresión, también se muestran los valores de los esfuerzos σ_1 , σ_2 y de deformación unitaria ϵ_2 .

Tabla 74

Módulo de elasticidad en paneles (Marcos de madera).

Panel	σ_1	σ_2	ξ_{01}	ξ_{02}	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad Promedio
	MPa	MPa	mm/mm	mm/mm	MPa	MPa
MC3-1	0.01831	1.57870	0.00005	0.00339	467.18	351.65
MC3-2	0.01267	1.57870	0.00005	0.00449	352.71	
MC3-3	0.00845	1.57870	0.00005	0.00673	235.07	

- **Resistencia a tensión diagonal.**

Los ensayos a tensión diagonal de los marcos, se ejecutaron en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, siguiendo los procedimientos que se describen en las normas NEC - SE - MP “Mampostería Estructural” y ASTM E519 “Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages”. En la figura 115 se puede observar el ensayo a compresión diagonal de los marcos.

Figura 115

Ensayo a compresión diagonal de paneles (Marcos de madera).



En la tabla 75 se muestra los esfuerzos máximos a corte de los tres marcos de madera.

Tabla 75

Esfuerzos cortantes máximos en paneles (Marcos de madera).

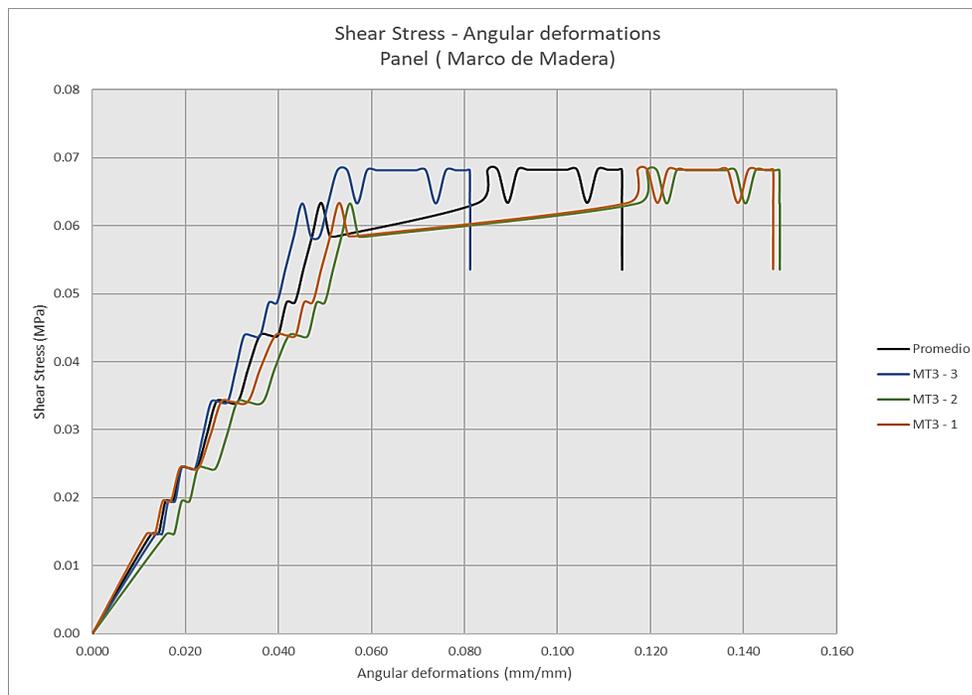
Panel	Ancho (w)	Altura (h)	Espesor (t)	Carga Máxima	Esfuerzo Cortante (Ss)	Promedio (Ss)
	mm	mm	mm	kN	MPa	MPa
MT3-1	1200	1200	350.20	1.80	0.07	0.07
MT3-2	1200	1200	350.20	1.69	0.07	
MT3-3	1200	1200	350.20	1.49	0.06	

- **Módulo de rigidez a corte.**

De los ensayos a tensión diagonal realizados, se obtienen los registros de cargas y desplazamientos tanto verticales y horizontales para diferentes instantes de tiempo. De estos registros y mediante el uso de las ecuaciones anteriormente indicadas se construyen los diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de cada marco, los mismos se indican en la figura 116, además se obtienen un diagrama adicional con los valores promedios de los tres marcos ensayados MT3 – 1, MT3 – 2, MT3 – 3.

Figura 116

Diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de paneles (Marcos de madera).



Una vez obtenidos los diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de los marcos de madera, se determinó el módulo de rigidez a corte de cada espécimen, siguiendo la misma metodología utilizada en la determinación del módulo de elasticidad de los mismos, para lo cual se aplicó el método de la cuerda tangente.

A continuación, en la tabla 76 se indica el módulo de rigidez a corte obtenido para los marcos de madera ensayados a compresión diagonal, también se muestran los valores de los esfuerzos cortantes τ_1 , τ_2 y deformación angular γ_2 .

Tabla 76

Módulo de rigidez a corte en paneles (Marcos de madera).

Panel	τ_1	τ_2	γ_1	γ_2	Módulo de Rigidez a Corte	Módulo de Rigidez a Corte Promedio
	MPa	MPa	mm/mm	mm/mm	MPa	MPa
MT3-1	0.000063	0.02728	0.00005	0.02434	1.12	1.09
MT3-2	0.000046	0.02728	0.00005	0.02795	0.98	
MT3-3	0.000054	0.02728	0.00005	0.02311	1.18	

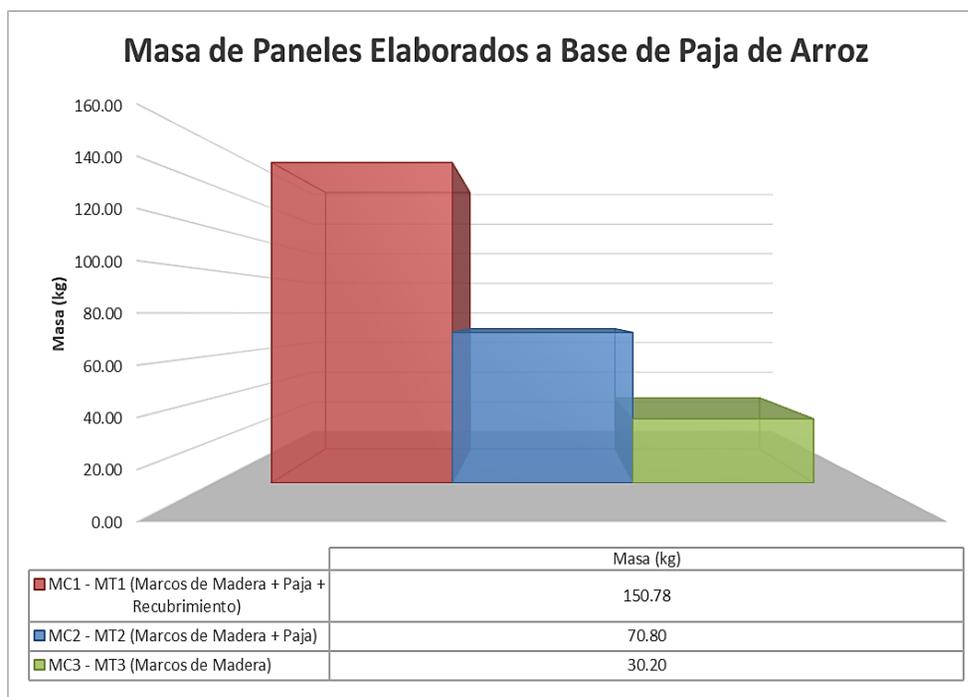
Análisis de los resultados.

Masas de paneles.

En la figura 117, se indican las masas de los paneles elaborados en la presente investigación, aquellos compuestos por marcos de madera, paja y recubrimiento a base de cal (MC1 – MT1) cuenta con una masa promedio de 150.78 kg, mientras que los paneles a los que no se les colocó recubrimiento (MC2 – MT2) tienen una masa promedio de 70.80 kg, es decir, el mortero de baja densidad a base de cal, cemento y perlita aumenta la masa del panel hasta un 53 %. La masa promedio de los marcos de madera (MC3 – MT3) es igual a 30.20 kg, esto nos indica que la paja al colocarse dentro del marco aumenta la masa del mismo hasta un 57 %. Finalmente, el mortero, la paja y el marco de madera representa el 53 %, 27 % y 20 % respectivamente, de la masa total del panel.

Figura 117

Masa de paneles elaborados a base de paja de arroz.

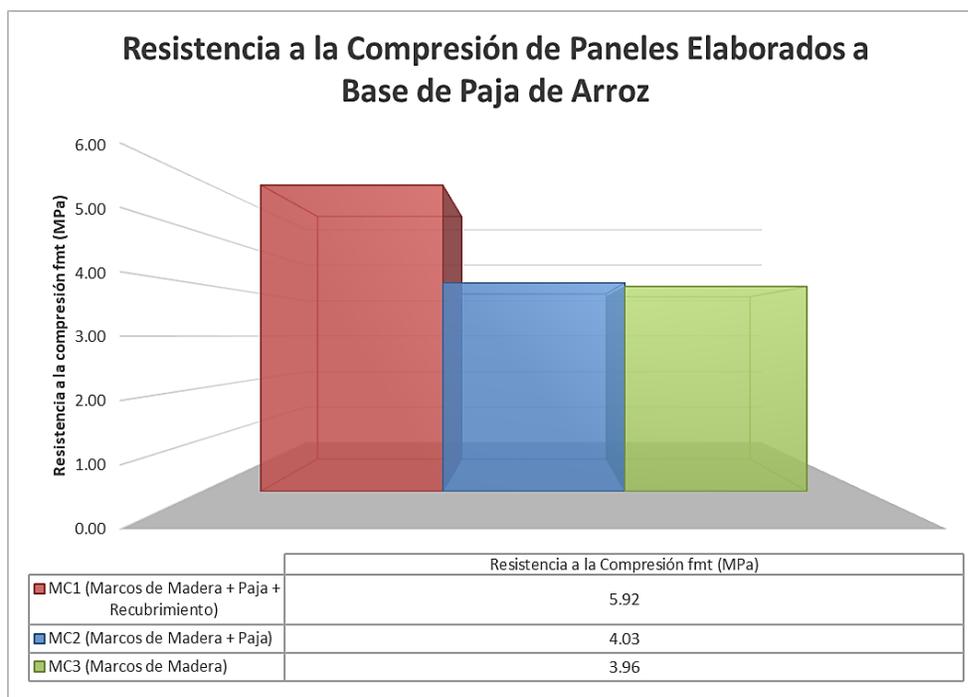


Resistencia a compresión de paneles.

En la figura 118, se muestran los valores promedios de la resistencia compresión obtenidos para los paneles con marcos de madera, paja y recubrimiento (MC1), sin recubrimiento (MC2), marcos de madera (MC3). Para los paneles (MC1) se obtienen un valor promedio de resistencia a compresión igual a 5.92 MPa, mientras que para aquellos paneles que no tienen recubrimiento (MC2) este valor es igual a 4.03 MPa, en consecuencia, el mortero de recubrimiento a base de cal, cemento y perlita aumenta la resistencia a compresión del panel hasta un 31.92 %, es decir 1.89 MPa. Mientras tanto el valor promedio de la resistencia a compresión de los marcos de madera es igual 3.96 MPa, cuyo valor es similar al obtenido para los paneles (MC2), por lo tanto, la paja no es un material que aporte resistencia al panel, esta se la utiliza como material de relleno, contribuyendo en la aislación y confort térmico de las edificaciones.

Figura 118

Resistencia a la compresión de paneles elaborados a base de paja de arroz.

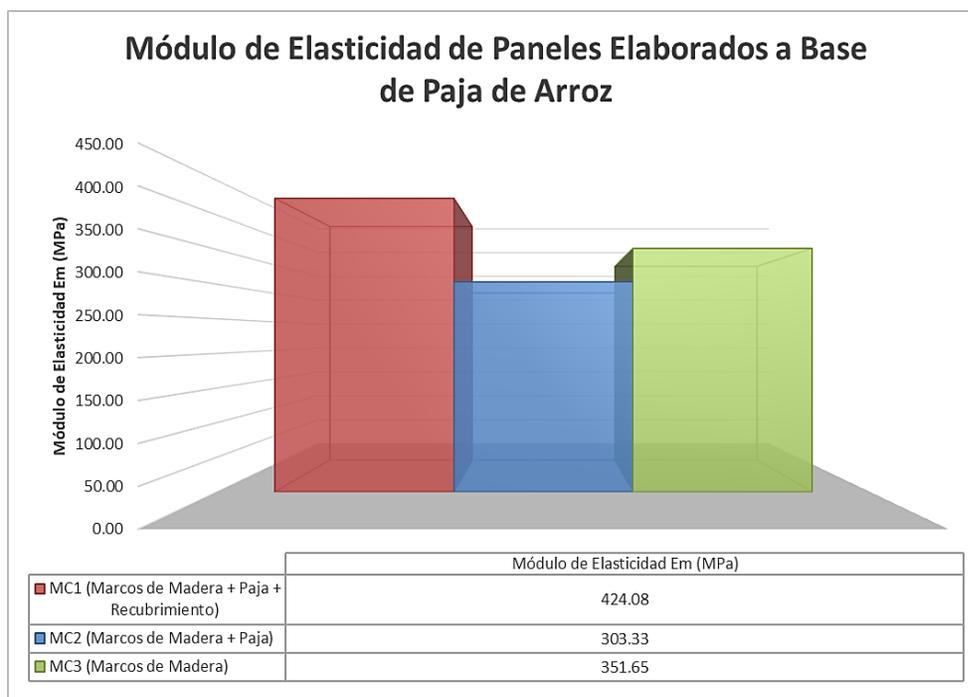


Módulo de elasticidad de paneles.

En la figura 119, se muestran los valores promedios del módulo de elasticidad obtenidos para los paneles con marcos de madera, paja y recubrimiento (MC1), sin recubrimiento (MC2) y marco de madera (MC3). Para los paneles (MC1) se obtiene un valor promedio de módulo de elasticidad igual a 424.08 MPa, mientras que para aquellos paneles que no tienen recubrimiento (MC2) este valor es igual a 303.33 MPa, en consecuencia, el mortero de recubrimiento a base de cal, cemento y perlita aumenta el módulo de elasticidad del panel hasta un 28.5 % y lo hace más rígido. Mientras tanto el valor promedio del módulo de elasticidad de los marcos de madera es igual a 351.65 MPa, superior al valor obtenido para los paneles sin recubrimiento (MC2), por lo tanto, la paja disminuye el valor del módulo de elasticidad del marco de madera y aumenta la flexibilidad del mismo hasta un 13.74 %.

Figura 119

Módulo de elasticidad de paneles elaborados a base de paja de arroz.

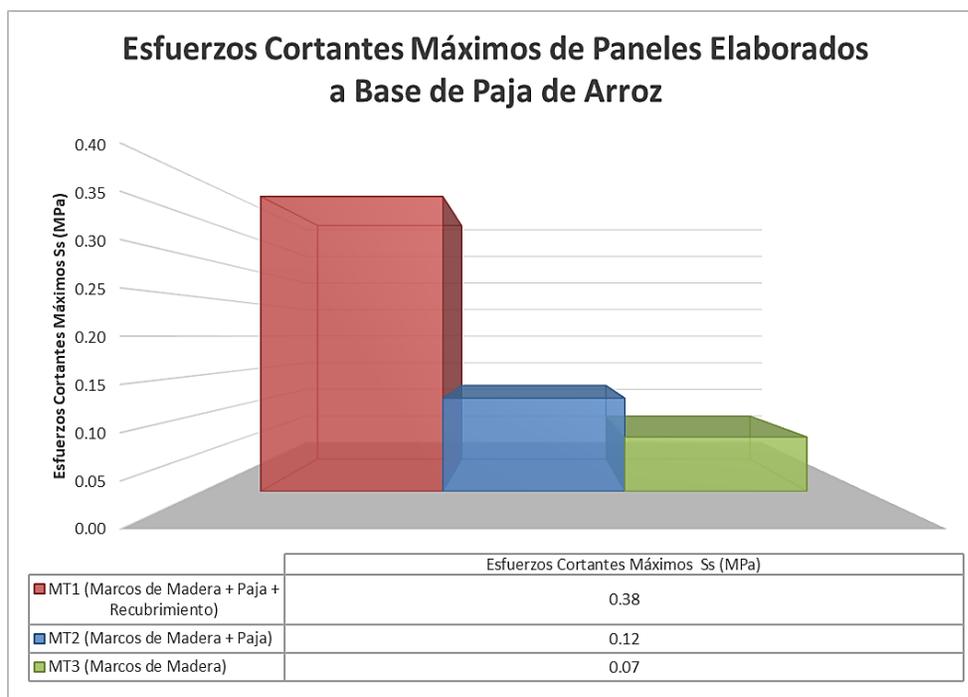


Resistencia a compresión diagonal de paneles.

En la figura 120, se muestran los valores promedios de la resistencia a compresión diagonal para los paneles con marcos de madera, paja y recubrimiento (MT1), sin recubrimiento (MT2) y marco de madera (MT3). Para los paneles (MT1) se obtienen un valor promedio de resistencia a compresión diagonal igual a 0.38 MPa, mientras que para aquellos paneles que no tienen recubrimiento (MT2) este valor es igual a 0.12 MPa, en consecuencia, el mortero de recubrimiento a base de cal, cemento y perlita aumenta la resistencia a compresión diagonal del panel hasta un 68%, es decir 26 MPa. Mientras tanto, el valor promedio de la resistencia a compresión diagonal de los marcos de madera es igual a 0.07 MPa, inferior al valor obtenido para los paneles (MC2), por lo tanto, la paja aporta al marco de madera 42 % más resistencia a compresión diagonal, sin embargo, el mortero a base de cal y perlita aumenta este valor aún más.

Figura 120

Esfuerzos cortantes máximos de paneles elaborados a base de paja de arroz.

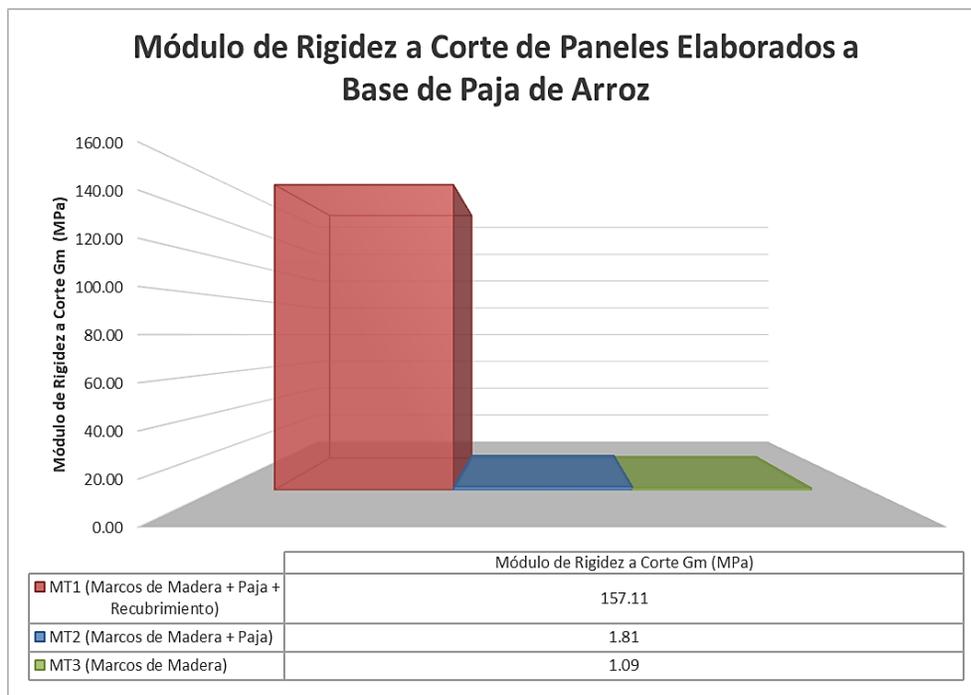


Módulo de rigidez a corte de paneles.

En la figura 121, se muestran los valores promedios del módulo de rigidez a corte obtenidos para los paneles con marcos de madera, paja y recubrimiento (MT1), sin recubrimiento (MT2) y marco de madera (MT3). Para los paneles (MT1) se obtienen un valor promedio de módulo de rigidez a corte igual a 157.11 MPa, mientras que para aquellos paneles que no tienen recubrimiento (MT2) este valor es igual a 1.81 MPa, en consecuencia, el mortero de recubrimiento a base de cal y perlita aumenta el módulo de rigidez a corte del panel hasta un 99%, es decir 155.3 MPa. Mientras tanto el valor promedio del módulo de rigidez a corte de los marcos de madera es igual a 1.09 MPa, inferior al valor obtenido para los paneles (MC2), por lo tanto, la paja brinda 40 % más rigidez al marco de madera, aumentando el módulo de rigidez a corte 0.72 MPa, sin embargo, el mortero a base de cal y perlita aumenta este valor aún más.

Figura 121

Módulo de rigidez a corte de paneles elaborados a base de paja de arroz.



Capítulo VI

Evaluación estructural de paneles elaborados a base de paja de arroz en edificaciones de hasta 3 pisos de altura.

La evaluación estructural de los paneles elaborados a base de paja de arroz en edificaciones de hasta 3 pisos de altura, se ejecutó mediante la creación de un modelo computacional desarrollado con un software de uso comercial, que posee una amplia gama de materiales utilizados en la construcción y permite la creación de nuevos mediante el ingreso de los valores de sus propiedades físico-mecánicas obtenidas de forma experimental, como es el caso de los paneles prefabricados de paja. El mismo efectúa diferentes tipos de análisis estructurales como por ejemplo estático, dinámico entre otro más, de esta manera se obtienen las respuestas estructurales de las edificaciones estudiadas en la presente investigación.

Ubicación de la edificación.

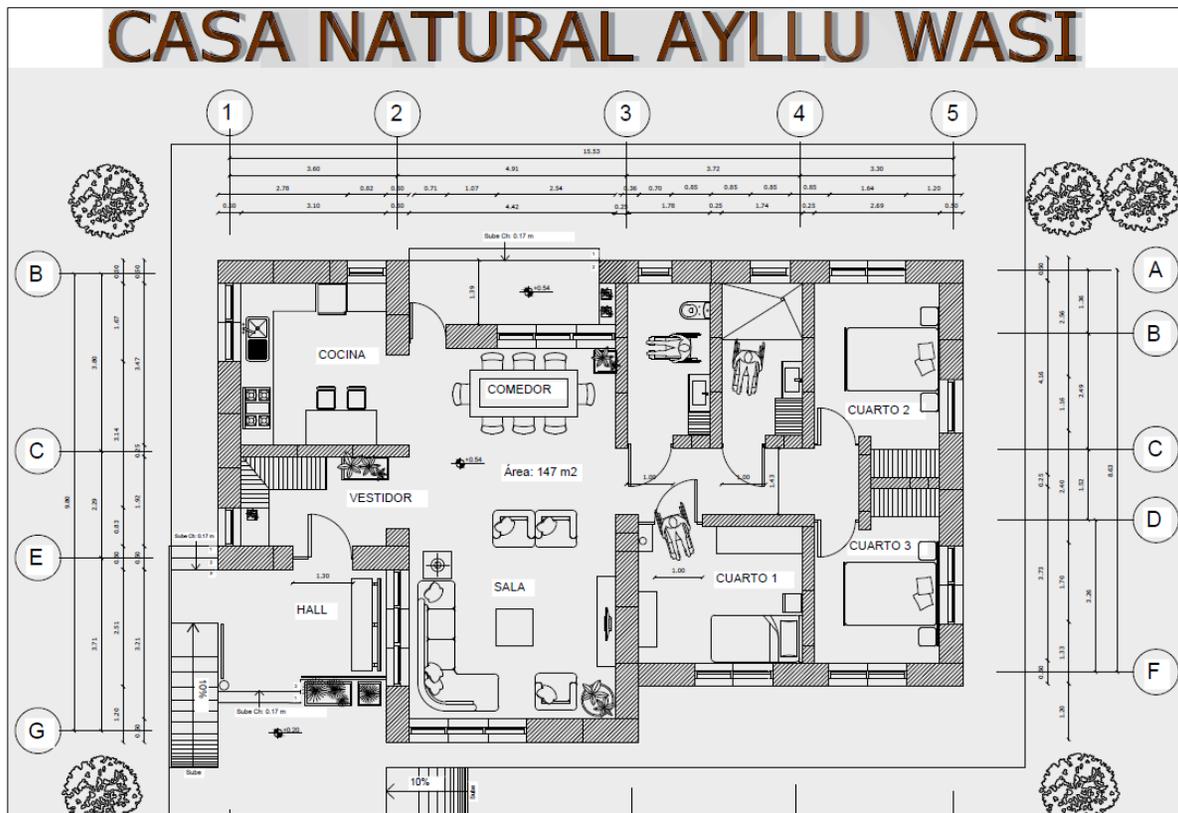
Debido a que la mayor producción de arroz se da en la región costera del Ecuador y con la finalidad de reducir los costos de transporte de la paja de arroz de una región a otra, se establece que la edificación de 3 pisos de altura este implantada en la provincia del Guayas.

Propiedades geométricas de la edificación.

Para la evaluación estructural de este tipo de edificaciones se tomó como referencia la estructura presentada para el proyecto “CASA NATURAL AYLLU WASI” que corresponde a una vivienda familiar de 132.60 m² con paneles prefabricados de paja, diseñada por la ingeniera Paulina Viera y los arquitectos Carlos Cárdenas, Diego Querido. La vivienda es de un piso de altura y cuenta con sala, comedor, cocina, 3 dormitorios, vestidor y baño, para dar cumplimiento con el objetivo de la presente investigación a esta edificación se le aumentó dos pisos adicionales manteniendo la distribución de espacios. La estructura tiene forma rectangular con 8.50 m de ancho y 15.60 m de largo, en la figura 122 se indica la planta arquitectónica de la misma.

Figura 122

Planta arquitectónica vivienda familiar con paneles prefabricados de paja.



A continuación, en la figura 123 se muestra la vista exterior de la edificación de un piso de altura.

Figura 123

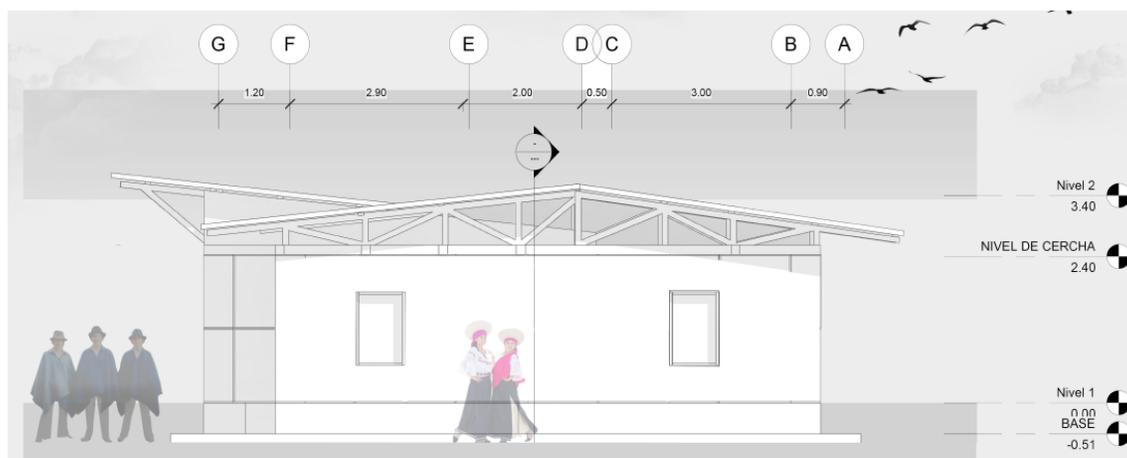
Vista exterior vivienda familiar con paneles prefabricados de paja.



La edificación tiene una altura de 2.40 m medida desde el nivel ± 0.00 hasta nivel inferior de la cercha, cuenta con una cubierta de dos aguas y una altura de cercha de 1.00 m, es decir la altura total de la edificación es de 3.40 m tal como se indica en la figura 124, sin embargo se aumentó dos pisos más para tener una edificación de tres niveles, cuya altura de entre piso es igual a 2.40 m para los dos primeros niveles y para el último es de 3.40 m debido a la cercha que se tiene en el nivel superior.

Figura 124

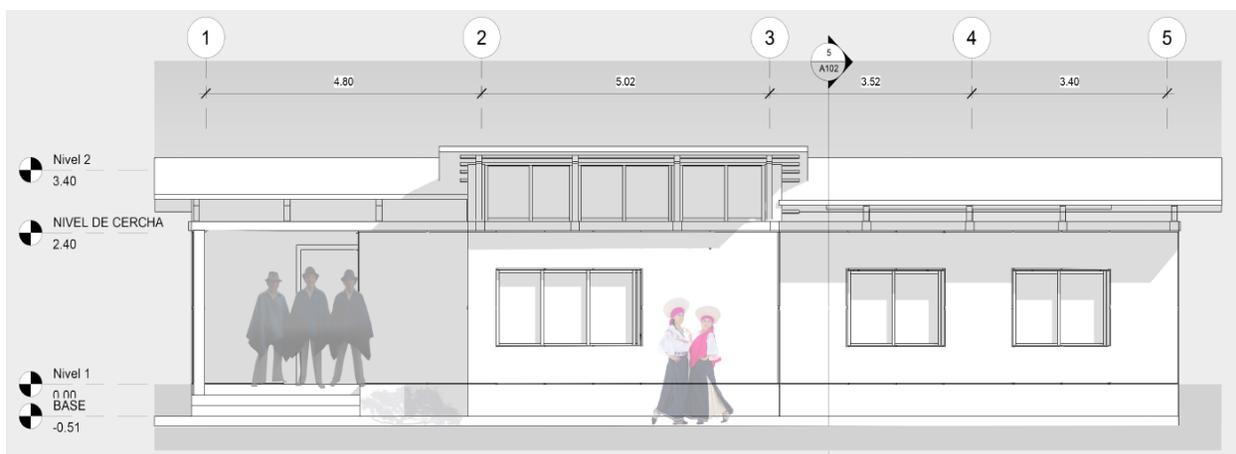
Fachada lateral derecha vivienda familiar con paneles prefabricados de paja.



A continuación, en la figura 125 se muestra la fachada frontal de la edificación de un piso de altura.

Figura 125

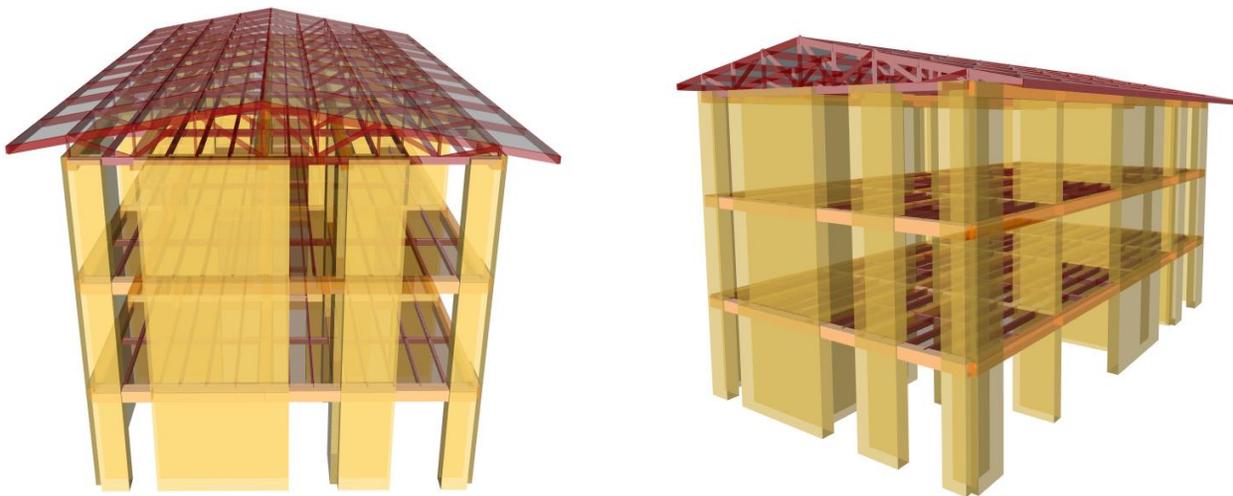
Fachada frontal vivienda familiar con paneles prefabricados de paja.



Para el modelamiento de la edificación de 3 pisos se replicó el primer nivel y la distribución de espacios de la edificación original para el segundo y tercer piso, además se varió la geometría de la cubierta a fin de mantener las dos aguas a lo largo de toda la edificación como se indica en la figura 126.

Figura 126

Fachada frontal y lateral vivienda familiar de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.



Propiedades físico – mecánicas de los materiales.

Paneles prefabricados con paja de arroz.

Las propiedades físico - mecánicas de los paneles prefabricados (marcos de madera, fardos de paja, recubrimiento a base de cal y cemento) ingresadas en el modelo computacional, se establecieron conforme a los resultados obtenidos a partir de los ensayos experimentales descritos en los apartados anteriores, para la obtención del coeficiente de Poisson del panel se utilizó la siguiente ecuación, la misma que está en función del módulo de elasticidad y de rigidez del mismo.

$$Gm = \frac{Em}{2(1 + \nu)}$$

Despejando el coeficiente de Poisson se tiene:

$$\nu = \frac{Em}{2Gm} - 1$$

G_m = Módulo de rigidez a corte del panel [MPa].

E_m = Módulo de elasticidad del panel [MPa].

ν = Coeficiente de Poisson del panel [MPa].

En la tabla 77 se resumen las propiedades físico – mecánicas de los paneles prefabricados con paja de arroz que se han ingresado en el modelo computacional.

Tabla 77

Propiedades físico – mecánicas de paneles prefabricados con paja de arroz.

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m^3)	298.16
Resistencia a Compresión (MPa)	5.92
Módulo de Elasticidad (MPa)	424.08
Módulo de Rigidez a Corte (MPa)	157.11
Coeficiente de Poisson	0.35

Elementos de madera (madera tipo B).

Las propiedades físico – mecánicas de los elementos de madera ingresadas en el modelo computacional para entablados de piso, cerchas, vigas principales y secundarias se establecieron conforme a las propiedades de la madera tipo B según la norma (MD - SE - MD, 2015) “Estructuras de Madera”, esta madera cumple con las especificaciones mecánicas y técnicas para emplearse como parte de elementos estructurales, no presenta deficiencias en su secado y es resistente a los ataques microbiológicos de insectos (OoCities, 2020). En la tabla 78 se resumen las propiedades físico – mecánicas que se han ingresado en el modelo computacional para los elementos de madera.

Tabla 78

Propiedades físico – mecánicas de elementos de madera.

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m^3)	700.00
Módulo de Elasticidad (MPa)	7499.15
Módulo de Rigidez a Corte (MPa)	2884.29
Coeficiente de Poisson	0.30

Cubierta (fibrocemento).

Las propiedades físico – mecánicas de la cubierta ingresadas en el modelo computacional, se establecieron conforme a las propiedades del fibrocemento tradicional, cabe indicar que para este material los valores del módulo de elasticidad, módulo de rigidez y coeficiente de Poisson fueron asignados tomando como referencia las propiedades de un mortero de baja densidad a base de cemento, por presentar similares características con este material, ya que en la actualidad no existen investigaciones donde se haya determinado estos valores con exactitud. En la tabla 79 se resumen las propiedades físico – mecánicas que se han ingresado en el modelo computacional para la cubierta de fibrocemento.

Tabla 79

Propiedades físico – mecánicas de cubierta nivel superior (fibrocemento).

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m ³)	1614.58
Módulo de Elasticidad (MPa)	24855.58
Módulo de Rigidez a Corte (MPa)	10356.49
Coefficiente de Poisson	0.20

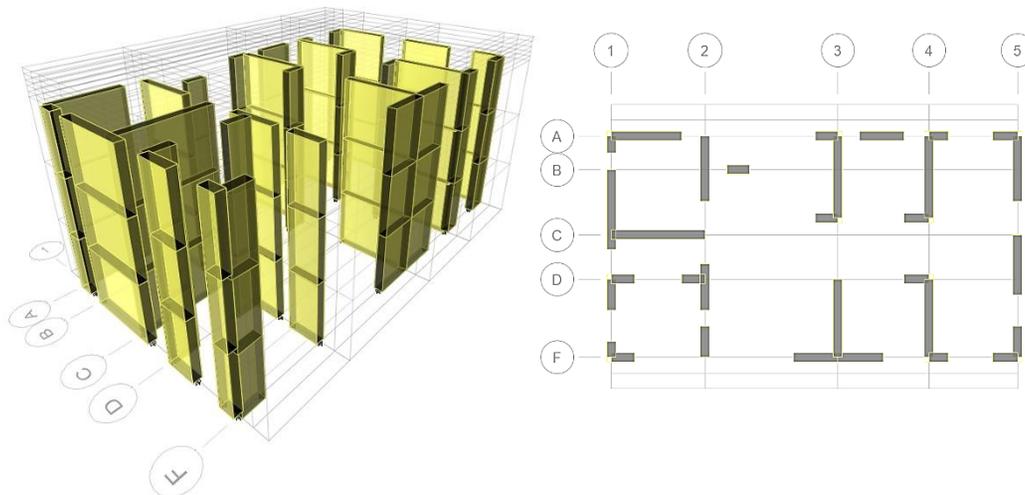
Propiedades geométricas de los elementos estructurales de la edificación.

Paneles prefabricados con paja de arroz.

Los paneles prefabricados a base de paja de arroz tienen dimensiones de 120 x 120 x 35 cm, estos se ubican conforme a la distribución de espacios del plano original y de forma estratégica como se indica en la figura 127. Para el modelamiento de los prefabricados de paja considerados portantes dentro de la edificación, se utilizaron elementos tipo Walls con espesor de 35 cm y empotramiento en su base para impedir el movimiento en cualquier dirección.

Figura 127

Vista 3d modelo computacional, paneles prefabricados con paja de arroz.

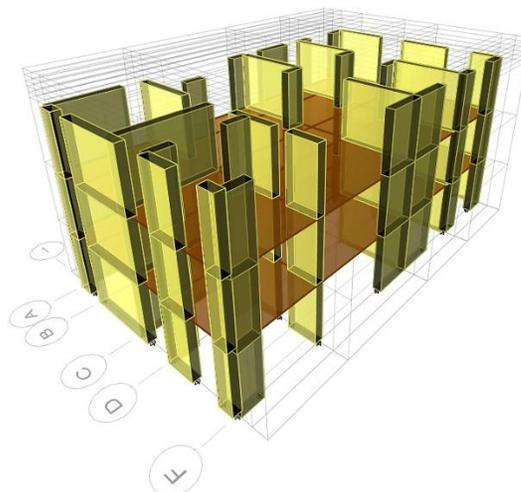


Entablados de piso.

Como se había indicado anteriormente a la edificación original se le aumentó dos pisos adicionales para obtener una de tres y así cumplir con el objetivo de la presente investigación, en el nivel $N \pm 2.40$ y $N \pm 4.80$ m se tienen entablados de madera, tal como se indica en la figura 128. Para el modelamiento de los mismos, se utilizaron elementos tipo Slab/Shell con espesor de 3.5 cm.

Figura 128

Vista 3d modelo computacional, paneles prefabricados con paja de arroz y entablados.

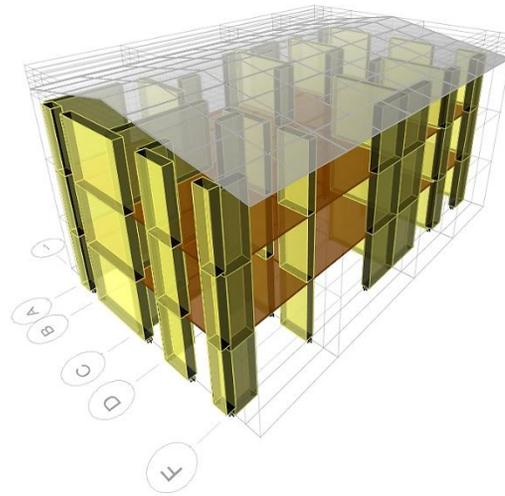


Cubierta.

En el último nivel de esta edificación se tiene una cubierta ondulada de fibrocemento con dos aguas, como se indica en la figura 129, para el modelamiento de la misma se utilizaron elementos tipo Slab/Shell con un espesor de 1.2 cm.

Figura 129

Vista 3d modelo computacional, paneles prefabricados con paja de arroz, entablados y cubierta.

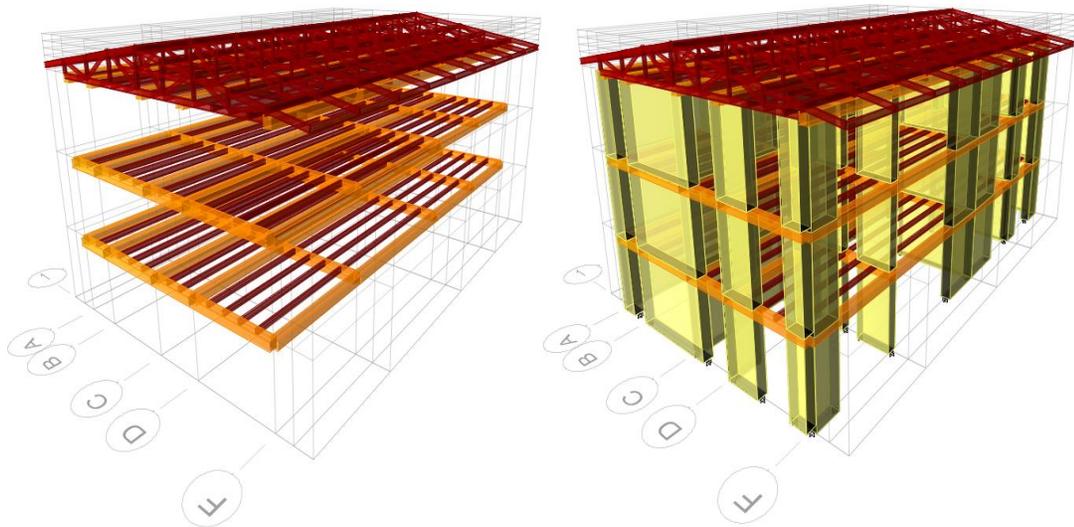


Cerchas, vigas principales y secundarias.

Para el modelamiento de las cerchas, vigas principales y secundarias se crearon elementos de madera sólida, las vigas principales tienen secciones de 250 x 250 mm, mientras que las secundarias son de 65 x 140 mm. Las vigas superiores e inferiores de las cerchas como también los puntales tienen las mismas secciones que las vigas secundarias, al igual que las correas longitudinales. En la figura 130 se muestra la distribución y ubicación de estos elementos dentro de la edificación analizada.

Figura 130

Vista 3d modelo computacional cerchas, puntales, correas, vigas principales y secundarias.



Cargas consideradas.

En el diseño y análisis de toda estructura de madera, se deberá considerar las cargas verticales conocidas también como gravitacionales o estáticas, las cuales se dividen en muertas y vivas. También rigen las cargas laterales conocidas como horizontales o dinámicas, que son el producto de la acción sísmica. Para la asignación de estas cargas se tomó como referencia la normas NEC – SE – CG “Cargas Sísmicas” y NEC – SE – DS “Peligro Sísmico”.

Cargas vivas.

Debido a que la edificación analizada es de uso residencial, en los dos primeros niveles se consideró una carga distribuida de 0.20 Ton/m², mientras que en el último nivel donde se encuentra la cubierta inclinada la carga distribuida es igual 0.07 Ton/m², estos valores se asignaron según la ocupación, uso de cada nivel de la edificación y los establece la norma NEC – SE – CG “Cargas Sísmicas” en su apartado cargas vivas, tanto para residencias unifamiliares y cubiertas panas, inclinadas o curvas respectivamente.

Carga muerta.

La carga muerta corresponde al peso propio de los elementos estructurales de la edificación, además de una carga permanente que se la determina en función de los acabados, enlucidos e instalaciones de la misma. Para la modelación se asignó una carga uniforme de 0.165 Ton/m², tanto para el piso 1 y 2. En la tabla 80, se indica el detalle la carga permanente considerada para el análisis.

Tabla 80

Detalle de carga permanente piso 1 y 2.

Descripción	Valor	Unidad
Paredes divisorias (Paneles prefabricados de paja)	0.104	Ton/m ²
Cielo falso	0.016	Ton/m ²
Instalaciones	0.020	Ton/m ²
Entablado de madera	0.025	Ton/m ²
Carga Permanente Total	0.165	Ton/m²

Para la carga permanente de la cubierta ubicada en el último nivel de la edificación, se asignó una carga uniforme de 0.10 Ton/m², en esta se considera el peso de las instalaciones, planchas onduladas de fibrocemento y teja de barro cocido sin mortero.

Carga sísmica.

- **Espectro de Respuesta.**

Para determinar el espectro de respuesta elástico de aceleraciones S_a que se indica en la figura 131, es necesario definir cuatro factores importantes:

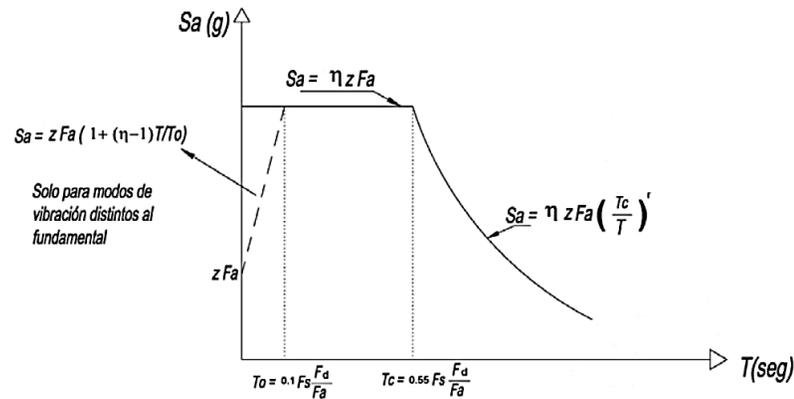
- Factor de zona sísmica Z .
- Tipo de suelo, coeficientes de amplificación F_a , F_d , F_s .
- Relación de la amplificación espectral η .

Los mismos están directamente relacionados con la ubicación de implantación del proyecto, recordemos que con la finalidad de reducir los costos de transporte de la paja de arroz de una región a otra y debido a que la provincia del Guayas es una con mayor producción

de arroz en Ecuador, se estableció que esta edificación estará ubicada en la provincia del Guayas, en la ciudad de Guayaquil y sobre un suelo tipo C.

Figura 131

Espectro de respuesta elástico de aceleraciones S_a .



Nota. Recuperado de (NEC - SE - DS, 2015)

Una vez establecida la ubicación del proyecto se pueden obtener los valores de los factores que aún no han sido mencionados y que son necesarios para la construcción del espectro de respuesta elástica, los mismos están en función de la configuración estructural de la edificación. A continuación, en la tabla 81 se indican los valores de estos factores.

Tabla 81

Valores de factores necesarios para la construcción del espectro de respuesta elástico.

Factores	Id.	Valor
Coefficiente de Importancia	I	1
Factor de Reducción de Resistencia Sísmica	R	3
Relación Amplificación Espectral	η	1.80
Tipo de Suelo	-	C
Zona Sísmica	-	VI
Factor de Zona	Z	0.50
Coefficiente de Amplificación de Suelo	F_a	1.18
Desplazamiento para Diseño de Roca	F_d	1.06
Comportamiento no Lineal de Suelos	F_s	1.23
Factor para el Diseño del Espectro Elástico	r	1
Coefficiente de Regularidad en Planta	ϕ_P	0.90
Coefficiente de Configuración en Elevación	ϕ_E	1

El espectro de respuesta se obtiene mediante el uso de las siguientes ecuaciones que se indican en la norma NEC – SE – DS “Peligro Sísmico”.

- Periodo fundamental de vibración aproximado de la estructura

$$T = Ct * hn^{\alpha}$$

Ct, α = Coeficiente depende del tipo de estructura.

hn = Altura total de la estructura [m].

- Periodo límite de vibración To.

$$To = 0.1 * Fs * \frac{Fd}{Fa}$$

- Periodo límite de vibración Tc.

$$Tc = 0.55 * Fs * \frac{Fd}{Fa}$$

- Periodo máximo de vibración de la estructura TL.

$$TL = 2.4Fd$$

Fa = Coeficiente de amplificación del suelo.

Fd = Coeficiente de desplazamiento para el diseño de roca.

Fs = Coeficiente de comportamiento no lineal de suelos.

- Aceleración espectral.

$$Sa = \eta * Z * Fa$$

η = Relación amplificación espectral.

Z = Aceleración máxima en roca [g].

En la tabla 82, se muestran los valores de T, Tc, To, TL y Sa calculados con las ecuaciones ya indicadas, necesarios para construir el espectro de respuesta elástico.

Tabla 82

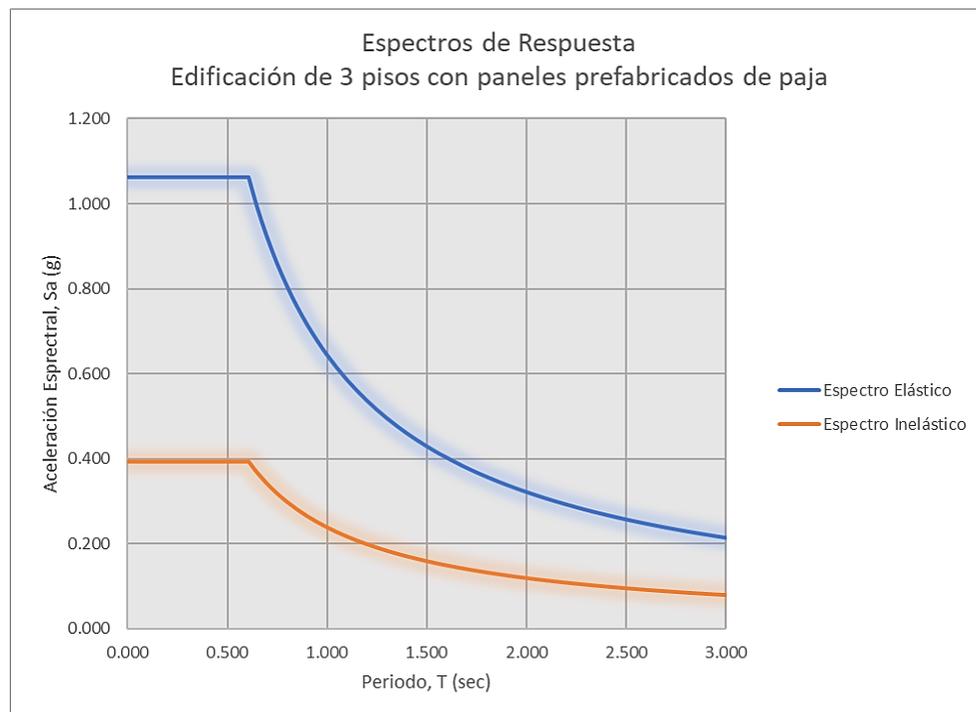
Valores de límites para el espectro de respuesta elástico.

Límites Espectro de Respuesta	Valor
T (s)	0.267
To (s)	0.110
Tc (s)	0.608
T _L (s)	2.544
Sa (g)	1.062

En la figura 132, se tiene el espectro de respuesta elástico e inelástico que ha sido construido en función de los factores y límites ya establecidos para esta edificación.

Figura 132

Espectros de respuesta elástico e inelástico.



- **Cortante Basal.**

El valor del cortante basal (V) que se aplica a la estructura de análisis en una dirección especificada, se calcula con la siguiente ecuación, siguiendo las recomendaciones que establece la norma NEC – SE – DS “Peligro Sísmico”.

$$V = \frac{I * Sa(Ta)}{R\Phi_P\Phi_E} W$$

V = Cortante basal de diseño.

I = Coeficiente de importancia.

Sa (Ta) = Aceleración espectral.

R = Factor de reducción de resistencia sísmica.

ϕ_P = Coeficiente de regularidad en planta.

ϕ_E = Coeficiente de configuración en elevación.

W = Carga sísmica reactiva.

Reemplazando los valores asignados para cada factor de la ecuación anterior conforme la tabla 80 y 81, se tiene el coeficiente sísmico es igual a 0.3933, es decir el cortante basal de la edificación representa el 39.33 % de su carga sísmica reactiva, cuya ecuación queda expresada de la siguiente manera:

$$V = \frac{I * Sa(Ta)}{R\Phi_P\Phi_E} W$$

$$V = \frac{1 * 1.062}{3 * 0.90 * 1} W$$

$$V = 0.3933W$$

Evaluación Estructural

Como paso previo a la evaluación estructural de la edificación analizada, es importante efectuar un ajuste de su cortante basal, de tal manera de cumplir con lo que se especifica en la norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico”, donde se indica que el cortante basal obtenido mediante un análisis dinámico no deberá ser menor al 80 % del cortante basal obtenido mediante un análisis estático para estructuras regulares, mientras que para estructuras irregulares no deberá ser menor al 85 %.

Participación modal.

La norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico”, señala que la participación de la masa modal acumulada que involucren todos los modos de vibración deberá ser al menos el 90 % de la masa total de la estructura en cada dirección principal considerada. A continuación, en la tabla 83, figura 133 y 134 se indica la participación modal de masas obtenida para la edificación de 3 pisos con paneles prefabricados de paja en las direcciones de análisis.

Tabla 83

Participación modal de masas, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.

Modo	UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRZ
1	78.33%	0.08%	0.24%	78.33%	0.08%	0.24%
2	0.06%	78.11%	1.24%	78.40%	78.19%	1.49%
3	0.15%	1.23%	79.23%	78.55%	79.43%	80.71%
4	13.51%	0.00%	0.20%	92.06%	79.43%	80.91%
5	0.05%	13.71%	2.28%	92.10%	93.14%	83.19%
6	0.43%	2.67%	11.57%	92.53%	95.81%	94.76%
7	4.86%	0.02%	0.59%	97.40%	95.83%	95.35%
8	0.18%	0.02%	0.08%	97.57%	95.86%	95.43%
9	0.00%	0.40%	0.00%	97.57%	96.26%	95.43%

Figura 133

Participación modal de masas sentido “X”, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.

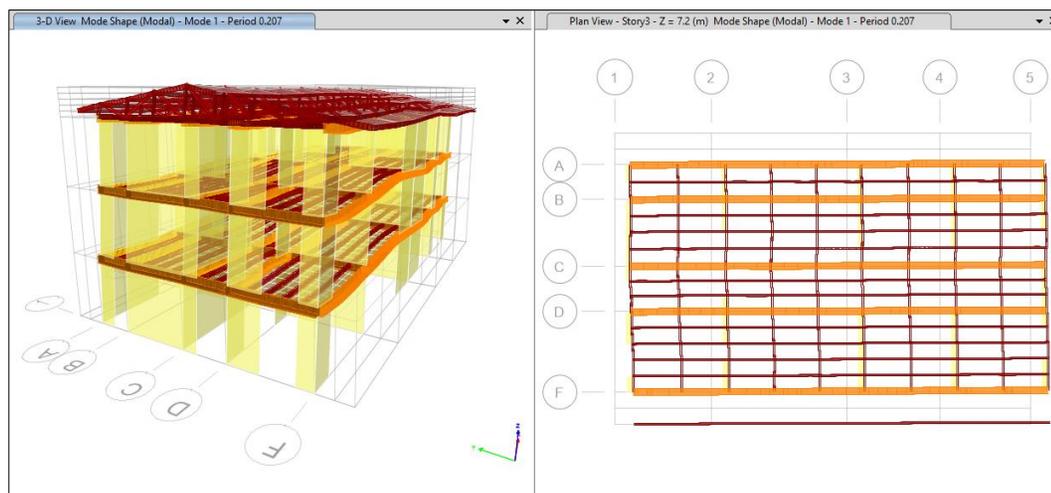
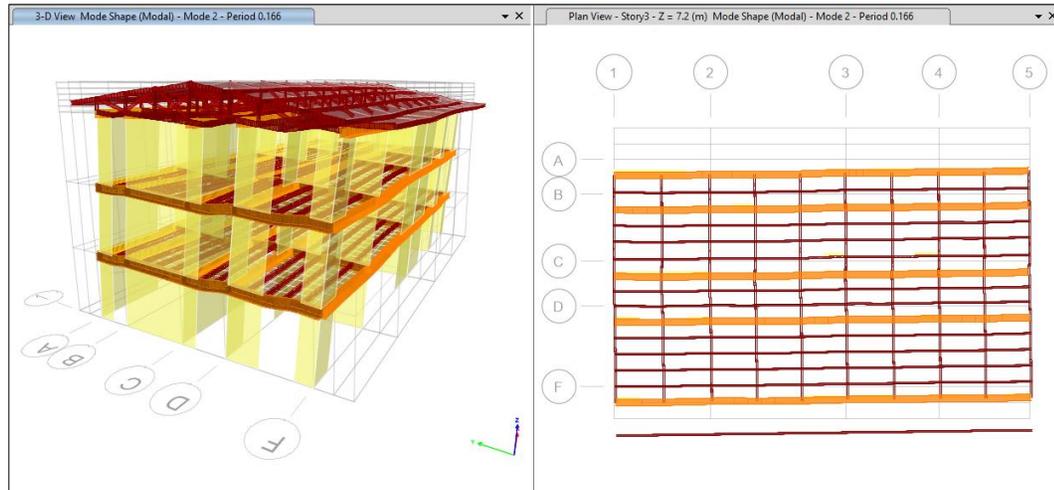


Figura 134

Participación modal de masas sentido “Y”, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.



Periodo de vibración.

La norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico”, señala que el valor real del periodo de vibración de la estructura no deberá superar en un 30 % al valor de su periodo aproximado que fue previamente calculado en el apartado anterior. A continuación, en la tabla 84, se indica el valor real del periodo fundamental de la estructura obtenido con el modelo computacional.

Tabla 84

Periodo fundamental de vibración, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.

Modo	Periodo
1	0.21
2	0.17
3	0.14
4	0.08
5	0.06
6	0.05
7	0.04
8	0.04
9	0.04

Desplazamientos máximos.

En la tabla 85, se muestra los valores de los desplazamientos máximos obtenidos, tanto en el sentido "X" y "Y".

Tabla 85

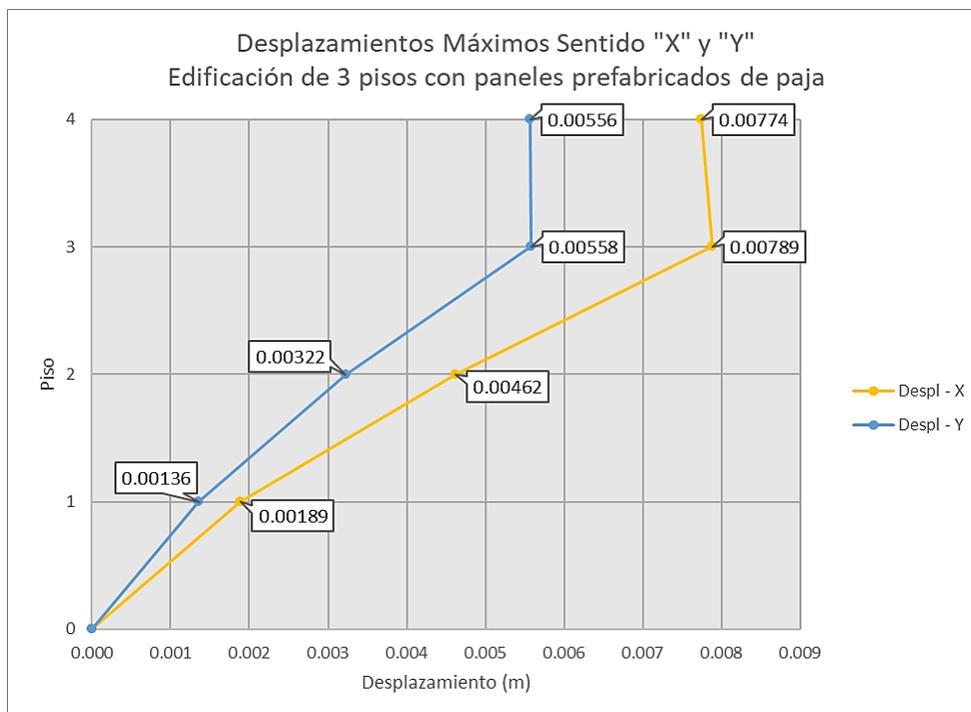
Desplazamientos sentido "X" y "Y", estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.

Piso	Altura	Despl-X	Depl -Y
	m	m	m
Piso 4	8.20	0.00774	0.00556
Piso 3	7.20	0.00789	0.00558
Piso 2	4.80	0.00462	0.00322
Piso 1	2.40	0.00189	0.00136

En la figura 135, se muestra la gráfica de los desplazamientos máximos obtenidos de acuerdo al número de piso de la edificación.

Figura 135

Desplazamientos máximos vs número de piso, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.



Derivas de piso.

La norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico” señala que para el cálculo de la deriva máxima inelástica (ΔM) de piso se deberá utilizar la siguiente ecuación:

$$\Delta M = 0.75R\Delta E$$

ΔM = Deriva máxima inelástica.

R = Factor de reducción de resistencia

ΔE = Desplazamiento obtenido en la aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas.

Los valores de derivas inelásticas obtenidas para la edificación con paneles prefabricados de paja, se indican en la tabla 86. De acuerdo a la norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico” los valores de las derivas inelásticas no deberán ser mayor al 2% para estructuras de hormigón armado, estructuras metálicas y de madera, mientras que para estructuras de mampostería no deberán superar el 1 %.

Tabla 86

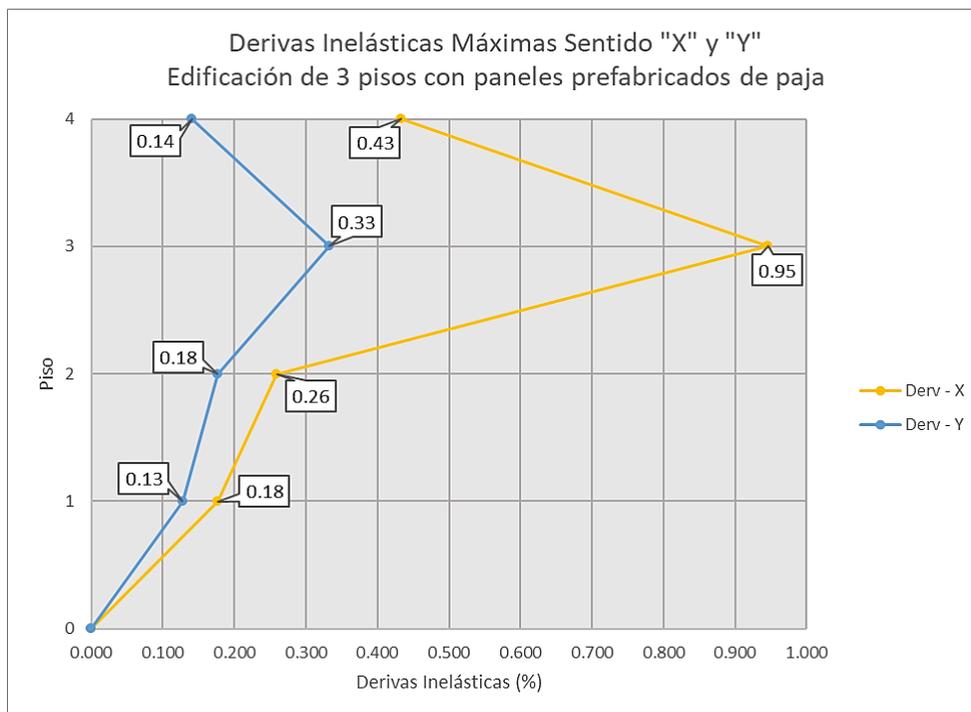
Derivas inelásticas sentido “X” y “Y”, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.

Piso	Altura	ΔE -X	ΔE -Y	ΔM -X	ΔM -Y
	m	m	m	%	%
Piso 4	8.20	0.00193	0.00063	0.43335	0.14085
Piso 3	7.20	0.00420	0.00148	0.94590	0.33233
Piso 2	4.80	0.00115	0.00078	0.25943	0.17618
Piso 1	2.40	0.00079	0.00057	0.17730	0.12758

En la figura 136, se muestra la gráfica de los de las derivas inelásticas obtenidas de acuerdo al número de piso de la edificación.

Figura 136

Derivas inelásticas vs número de piso, estructura de 3 pisos con paneles prefabricados de paja.



Análisis de los resultados.

Participación modal.

Para la edificación de 3 pisos con paneles prefabricados de paja, se obtiene un porcentaje de participación de masa modal igual a 92.06 %, 93.14 % y 94.76 % para el sentido "X" (modo 4), "Y" (modo 5), "Z" (modo 6) respectivamente. Estos porcentajes superan el 90 % en cada dirección considerada, por lo tanto, cumple porcentaje mínimos de participación modal de masa, según los requerimientos de la norma NEC – SE – DS "Riesgo Sísmico". En el modo uno y dos la edificación presenta un 78.33 % y 78.11 % de traslación en la dirección "X" y "Y" respectivamente, sin generar rotación significativa en la dirección "Z", mientras que en el tercer modo la edificación presenta rotación del 79.23 % en la dirección "Z".

Periodo de vibración.

El valor del periodo de vibración aproximado de la estructura con paneles de paja arroz, calculado con la ecuación presentada en la norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico” es igual a 0.27 s, mientras que el periodo de vibración fundamental de la estructura obtenido en el primer modo mediante el modelamiento computacional es igual a 0.21 s, este valor es inferior al periodo calculado, por tanto, se encuentra dentro de los parámetros permitidos por la norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico”. Cabe indicar que la ecuación que permite calcular el periodo aproximado de la estructura es referencial y sirve como parámetro de control, ya que la estructura analizada no es convencional.

Desplazamientos máximos.

El desplazamiento máximo en el sentido “X” y “Y” para la estructura con paneles de paja de arroz es de 0.79 cm y 0.56 cm respectivamente, los mismos se dan a una altura de 7.20 m en ambos casos, a esta altura se encuentra las vigas base de la cercha.

Derivas de piso.

La deriva máxima de piso en el sentido “X” y “Y” para la estructura con paneles de paja de arroz, se calculó con la ecuación presentada en la norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico”, esta igual 0.95 % y 0.33 % respectivamente, las mismas se da a una altura de 7.20 m en ambos casos, a esta altura se encuentra las vigas base de la cercha. Por tanto, los valores de derivas son inferiores al límite establecido del 2 % por la norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico”. Cabe indicar que al igual que la ecuación del periodo, la ecuación de la deriva de piso es referencial y sirve como parámetro de control, ya que la estructura analizada no es convencional.

Capítulo VII

Evaluación económica comparativa de edificaciones de 3 pisos de altura construidas con paneles prefabricados de paja de arroz vs sistema tradicional aporticado de hormigón armado con mampostería.

En el presente capítulo se realiza la evaluación económica de la edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con paneles prefabricados de paja de arroz que se han estudiado en la presente investigación, además se realiza otra tomando como referencia la misma pero construida mediante el sistema tradicional aporticado de hormigón armado con mampostería, manteniendo la distribución de áreas y número de pisos. La evaluación económica consiste en detallar los costos en función de cada rubro necesario para la construcción completa de las edificaciones, posteriormente se realiza un análisis comparativo de los costos obtenidos entre estas. Se presenta también el análisis de precios unitarios (APU) para el rubro “Panel prefabricado con paja de arroz de $E = 0.35$ m, incluye montaje y mortero a base de cal $E = 2.5$ cm” el cual se ha elaborado en función de las cantidades y costos de los materiales utilizados durante la construcción de los paneles.

Evaluación económica edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con paneles prefabricados de paja de arroz.

En la tabla 87, se detallan cantidades, precios unitarios y costo total de cada rubro necesario para la construcción de la edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con paneles prefabricados de paja de arroz.

Tabla 87

Evaluación económica edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con paneles prefabricados de paja de arroz.

PRESUPUESTO REFERENCIAL "CASA NATURAL AYLLU WASI" con paneles prefabricado de paja de arroz					
N°	DESCRIPCIÓN DEL RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
OBRAS PRELIMINARES					\$ 481.61
01	LIMPIEZA MANUAL DEL TERRENO	m2	150.00	1.54	231.00
02	REPLANTEO Y NIVELACIÓN CON EQUIPO TOPOGRÁFICO	m2	132.60	1.89	250.61
MOVIMIENTO DE TIERRAS					\$ 272.75
03	EXCAVACIÓN MANUAL DE CIMIENTOS	m3	11.79	11.30	133.25
04	DESALOJO DE MATERIAL CON VOLQUETA CARGA MANUAL	m3	11.79	11.83	139.50
ESTRUCTURA					\$ 43,026.61
05	HORMIGÓN CICLOPEO F´C=210KG/CM2	m3	11.79	96.72	1140.52
06	CONTRAPISO H.S F´C=180KG/CM2 E=8CM INCLUYE MALLA ELECTROSOLDADA	m2	132.60	23.53	3120.08
07	ENTABLADO DE MADERA E=3.5CM	m2	265.20	27.50	7293.00
08	VIGAS ESTRUCTURAL DE MADERA TECA PARA ENTREPISO, INCLUYE MONTAJE	m	361.50	12.77	4616.36
09	VIGUETAS DE MADERA PARA ENTREPISO, INCLUYE MONTAJE	m	468.00	4.51	2110.68
10	VIGUETAS PARA CONFORMACIÓN DE CERCHAS Y CUBIERTA, INCLUYE MONTAJE	m	350.00	4.51	1578.50
11	CORREAS PARA CONFORMACIÓN DE CUBIERTA	m	156.00	4.51	703.56
12	CUBIERTA DE FIBROCEMENTO E=1.2CM, INCLUYE MONTAJE	m2	179.40	7.66	1374.20
13	PANEL PREFABRICADO CON PAJA DE ARROZ DE E=0.35, INCLUYE MONTAJE Y MORTERO A BASE DE CAL E=2.5 cm	m2	58.06	363.24	21089.71
ALBAÑILERIA					\$ 6,762.60
14	CUBIERTA DE FIBROCEMENTO E=1.2CM, INCLUYE MONTAJE	m2	179.40	14.51	2603.09
15	COLOCACIÓN DE TEJA TRADICIONAL, COLOR ROJO MATE NATURAL	m2	179.40	17.96	3222.02
16	MASILLADO ALISADO DE PISOS	m2	132.60	7.07	937.48
INSTALACIONES HIDROSANITARIAS					\$ 1,816.38
17	BAJANTE DE AGUAS LLUVIAS 110MM UNION CODO	m	32.80	9.35	306.68
18	CAJA DE REVISIÓN 80X80	u	2.00	79.16	158.32
19	INODORO LÍNEA ECONÓMICA	u	6.00	16.22	97.32
20	LAVAMANOS EMPOTRADO LÍNEA ECONÓMICA (NO INC. GRIFERÍA)	u	6.00	68.79	412.74
21	LLAVE DE PASO 1/2"	u	3.00	25.80	77.40

22	MEZCLADORA PARA LAVAMANOS TIPO FV	u	3.00	97.58	292.74
23	PUNTO DE AGUA FRÍA 1/2"	u	9.00	23.58	212.22
24	PUNTO DE DESAGUE DE PVC 75MM INCL. ACCESORIOS	u	6.00	43.16	258.96
25	PUNTO DE DESAGÜE DE PVC 110 MM, INC. ACCESORIOS	u	6.00	48.95	293.70
ACABADOS					\$ 14,122.55
26	ACCESORIOS DE BAÑO (TOALLERO, PAPELERA, GANCHO)	jgo	6.00	31.69	190.14
27	BALDOSA DE GRES 30X30CM	m2	132.60	27.64	3665.06
28	CERRADURA BAÑO (TIPO CESA NOVA CROMADA)	u	6.00	16.24	97.44
29	PINTURA CAUCHO PAREDES EXTERIORES, LÁTEX VINYL ACRÍLICO, INCLUYE ANDAMIOS	m2	555.48	2.78	1544.23
30	PUERTA DE ALUMINIO Y VIDRIO 6MM (INCL. CERRADURA)	m2	21.60	122.59	2647.94
31	PUERTA PRINCIPAL LACADA INCL. MARCO Y TAPAMARCO	u	1.00	220.95	220.95
32	VENTANA DE ALUMINIO FIJA Y VIDRIO 4MM	m2	69.30	28.27	1959.11
33	CIELO RASO GYPSUM, 1/2" , INC. EMPASTE Y PINTURA	m2	265.20	14.32	3797.66
INSTALACIONES ELECTRICAS					\$ 3,673.33
34	TUBERÍA TIPO CONDUIT EMT 1/2"	m	124.80	1.82	227.14
35	CABLEADO ELECTRICO CALIBRE 12, INCLUYE ACCESORIOS	m	124.80	3.32	414.34
36	PUNTO DE ILUMINACION	pto	45.00	22.94	1032.30
37	RESANE DE CANAL PARA INSTALACIONES ELECTRICAS	m	45.00	2.45	110.25
38	BREAKERS DE 1 POLO DE 40 A 6A AMP	u	3.00	16.42	49.26
39	PUNTO DE TOMA CORRIENTE DOBLE 2#10 T.CONDUIT EMT 1/2"	u	45.00	28.14	1266.30
40	PUNTO DE INTERRUPTOR DOBLE	pto	45.00	12.75	573.75
SUB TOTAL					\$ 70,155.84
IVA 12%					\$ 8,418.70
TOTAL					\$ 78,574.54

Evaluación económica edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con el sistema tradicional aporticado de hormigón armado.

En la tabla 88, se detallan cantidades, precios unitarios y costo total de cada rubro necesario para la construcción de la edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con el sistema tradicional aporticado de hormigón armado y mampostería.

Tabla 88

Evaluación económica edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con sistema tradicional aporticado de hormigón armado y mampostería.

PRESUPUESTO REFERENCIAL "CASA NATURAL AYLLU WASI" con sistema tradicional aporticado de hormigón armado y mampostería.

N°	DESCRIPCIÓN DEL RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
OBRAS PRELIMINARES					\$ 481.61
01	LIMPIEZA MANUAL DEL TERRENO	m2	150.00	1.54	231.00
02	REPLANTEO Y NIVELACIÓN CON EQUIPO TOPOGRÁFICO	m2	132.60	1.89	250.61
MOVIMIENTO DE TIERRAS					\$ 1,278.63
03	EXCAVACIÓN MANUAL EN CIMIENTOS Y PLINTOS	m3	55.28	11.30	624.66
04	DESALOJO DE MATERIAL CON VOLQUETA CARGA MANUAL	m3	55.28	11.83	653.96
ESTRUCTURA					\$ 50,641.16
05	REPLANTILLO H.S. 180KG/CM2. EQUIPO: CONCRETERA 1 SACO	m3	3.60	114.97	413.89
06	HORMIGÓN CICLOPEO F´C=210KG/CM2	m3	19.28	96.72	1864.76
07	HORMIGÓN SIMPLE PLINTOS F´C=210KG/CM2, NO INC. ENCOFRADO	m3	14.40	133.02	1915.49
08	HORMIGÓN SIMPLE CADENAS F´C=210 KG/CM2, NO INC. ENCOFRADO	m3	10.85	126.71	1374.17
09	HORMIGÓN SIMPLE COLUMNAS F'C= 240 KG/CM2, NO INC. ENCOFRADO	m3	22.05	135.25	2982.26
10	HORMIGÓN SIMPLE LOSA DE 20 CM, F'C= 210 KG/CM2 CON BLOQUE DE POLIESTIRENO (2 USOS), NO INC. ENCOFRADO	m3	99.45	213.09	21191.80
11	HORMIGÓN SIMPLE VIGAS, F'C= 210 KG/CM2, NO INC. ENCOFRADO	m3	12.65	130.70	1653.68
12	ENCOFRADO TABLA DE MONTE - VIGAS	m2	84.35	25.09	2116.34
13	ENCOFRADO TABLA DE MONTE - CADENA	m2	72.30	10.35	748.31
14	ENCOFRADO/ DEENCOFRADO METÁLICO TIPO RENTECO ALQUILADO PARA COLUMNA 25X25 CM O 30X30 CM	m2	252.00	4.41	1111.32
15	CONTRAPISO H.S F´C=180KG/CM2 E=8CM INCLUYE MALLA ELECTROSOLDADA	m2	132.60	23.53	3120.08
16	ACERO DE REFUERZO FY=4200 KG/CM2	kg	6942.32	1.75	12149.06
ALBAÑILERIA					\$ 14,738.90
17	ENLUCIDO DE FAJAS	m	288	3.06	881.28
18	ENLUCIDO LISO EXTERIOR MORTERO 1:4 CON IMPERMEABILIZANTE	m2	555.48	7.99	4438.29
19	ENLUCIDO VERTICAL INTERIOR, PALETEADO FINO, MORTERO 1:4, E= 1,50 CM	m2	391.68	5.43	2126.82
20	MAMPOSTERÍA DE BLOQUE PENSADO ALIVIANADO 40X20X15CM MORTERO 1:6, E=2.5CM	m2	473.58	9.46	4480.07

21	MASILLADO ALISADO DE PISOS	m2	397.80	7.07	2812.45
INSTALACIONES HIDROSANITARIAS					\$ 1,956.32
22	BAJANTE DE AGUAS LLUVIAS 110MM UNION CODO	m	14.4	9.35	134.64
23	CAJA DE REVISIÓN 80X80	u	2.00	79.16	158.32
24	INODORO LÍNEA ECONÓMICA	u	6.00	16.22	97.32
25	LAVAMANOS EMPOTRADO LÍNEA ECONÓMICA (NO INC. GRIFERÍA)	u	6.00	68.79	412.74
26	LLAVE DE PASO 1/2"	u	3.00	25.80	77.40
27	MEZCLADORA PARA LAVAMANOS TIPO FV	u	3.00	97.58	292.74
28	PUNTO DE AGUA FRÍA 1/2"	u	9.00	23.58	212.22
29	PUNTO DE DESAGUE DE PVC 75MM INCL. ACCESORIOS	u	6.00	43.16	258.96
30	REJILLA DE PISO 110MM TIPO HONGO	u	2.00	9.14	18.28
31	PUNTO DE DESAGÜE DE PVC 110 MM, INC. ACCESORIOS	u	6.00	48.95	293.70
ACABADOS					\$ 28,287.66
32	ACCESORIOS DE BAÑO (TOALLERO, PAPELERA, GANCHO)	jgo	6.00	31.69	190.14
33	BALDOSA DE GRES 30X30CM	m2	397.80	27.64	10995.19
34	CERRADURA BAÑO (TIPO CESA NOVA CROMADA)	u	6.00	16.24	97.44
35	EMPASTE EXTERIOR EN PAREDES	m2	555.48	3.91	2171.93
36	EMPASTE INTERIOR EN PAREDES	m2	391.68	2.32	908.70
37	PINTURA CAUCHO PAREDES EXTERIORES, LÁTEX VINYL ACRÍLICO, INCLUYE ANDAMIOS	m2	555.48	2.78	1544.23
38	PINTURA CAUCHO PAREDES INTERIORES, LÁTEX VINYL ACRÍLICO, INCLUYE ANDAMIOS	m2	391.68	2.35	920.45
39	PUERTA DE ALUMINIO Y VIDRIO 6MM (INCL. CERRADURA)	m2	21.60	122.59	2647.94
40	PUERTA PRINCIPAL LACADA INCL. MARCO Y TAPAMARCO	u	1.00	220.95	220.95
41	VENTANA DE ALUMINIO FIJA Y VIDRIO 4MM	m2	69.30	28.27	1959.11
42	CIELO RASO GYPSUM, 1/2" , INC. EMPASTE Y PINTURA	m2	397.80	14.32	5696.50
43	BARREDERA DE PISO FLOTANTE H= 8CM	m	120.5	7.76	935.08
INSTALACIONES ELÉCTRICAS					\$ 3,673.33
44	TUBERÍA TIPO CONDUIT EMT 1/2"	m	124.80	1.82	227.14
45	CABLEADO ELÉCTRICO CALIBRE 12, INCLUYE ACCESORIOS	m	124.80	3.32	414.336
46	PUNTO DE ILUMINACION	pto	45.00	22.94	1032.3
47	RESANE DE CANAL PARA INSTALACIONES ELÉCTRICAS	m	45.00	2.45	110.25
48	BREAKERS DE 1 POLO DE 40 A 6A AMP	u	3.00	16.42	49.26
49	PUNTO DE TOMA CORRIENTE DOBLE 2#10 T.CONDUIT EMT 1/2"	u	45.00	28.14	1266.3
50	PUNTO DE INTERRUPTOR DOBLE	pto	45.00	12.75	573.75
SUB TOTAL					\$ 101,057.61
IVA 12%					\$ 12,126.91
TOTAL					\$ 113,184.53

Análisis de precio unitario (APU) “Panel prefabricado con paja de arroz de E = 0.35 m, incluye montaje y mortero a base de cal E = 2.5 cm”

En la tabla 89, se indica el APU de “Panel prefabricado con paja de arroz de E = 0.35 m, incluye montaje y mortero a base de cal E = 2.5 cm”.

Tabla 89

APU, “Panel prefabricado con paja de arroz de E = 0.35 m, incluye montaje y mortero a base de cal E = 2.5 cm.

DESCRIPCIÓN:	PANELES ESTRUCTURALES DE PAJA DE ARROZ DE E = 0.35 m, INCLUYE MONTAJE Y MORTERO DE E=2.5 cm			UNIDAD	m2
EQUIPO Y HERRAMIENTAS					
	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
HERRAMIENTA MENOR 5% M.O.					0.41
TECLE MECÁNICO	1.00	0.55	0.55	0.50	0.28
SUBTOTAL M					0.68
MANO DE OBRA					
	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
PEON	2.00	4.05	8.10	0.50	4.05
ALBAÑIL	1.00	4.10	4.10	0.50	2.05
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	1.00	4.10	4.10	0.50	2.05
SUBTOTAL N					8.15
MATERIALES					
		UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO
FARDO		u	4.00	0.90	3.60
PIOLA DE POLIPROPILENO A-9		m	49.60	0.02	0.99
TABLERO CONTRACHAPADO DE MADERA E=1.2CM		m2	0.70	11.75	8.23
TABLONES DE MADERA		u	2.00	6.00	12.00
TIRAFONDO HEXAGONAL PARA UNIONES ENTRE PANELES		u	34.00	0.20	6.80
CEMENTO		kg	10.45	0.16	1.67
CAL		kg	10.45	0.25	2.61
AGUA		lt	14.87	0.00072	0.011
PERLITA		kg	22.10	0.10	2.21
ADITIVO		kg	0.53	2.70	1.43
SUBTOTAL O					39.55
TOTAL, COSTO DIRECTO USD (M+N+O)					48.39
INDIRECTOS 20%					9.68

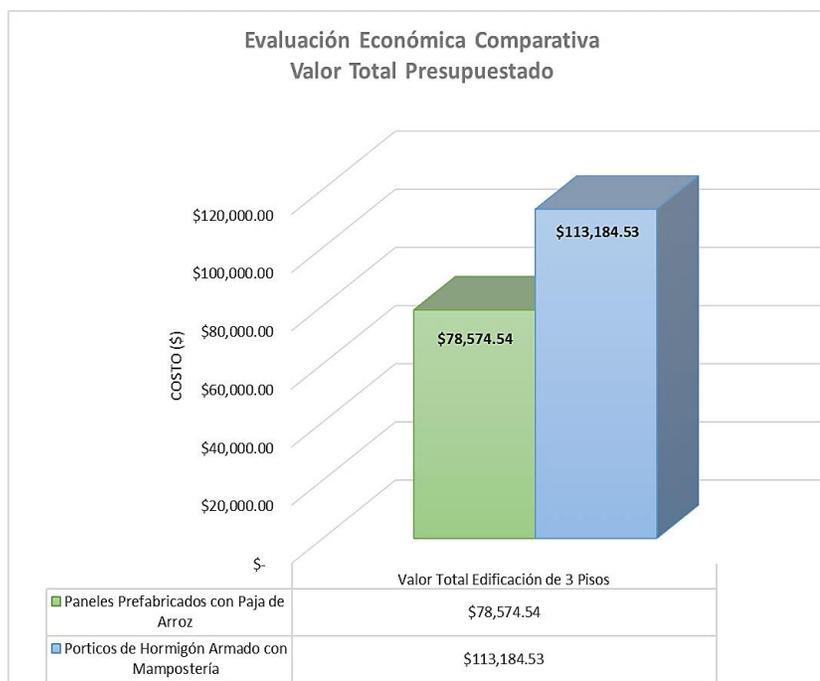
COSTO TOTAL DEL RUBRO	58.06
VALOR OFERTADO	58.06

Análisis de resultados

En la figura 137, se muestra el valor total presupuestado para la construcción de la edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con los dos sistemas estructurales, aquella que cuenta con paneles prefabricados portantes de paja de arroz presenta un valor total de \$ 78 574. 54, mientras que el valor para la edificación construida con el sistema tradicional aporticado de hormigón armado y mampostería es de \$ 113 184.53. Por lo tanto, el costo de la edificación construida con paneles prefabricados de paja es menor y presenta una reducción en su presupuesto de \$ 34 609.99 comparado con el valor obtenido para sistema tradicional.

Figura 137

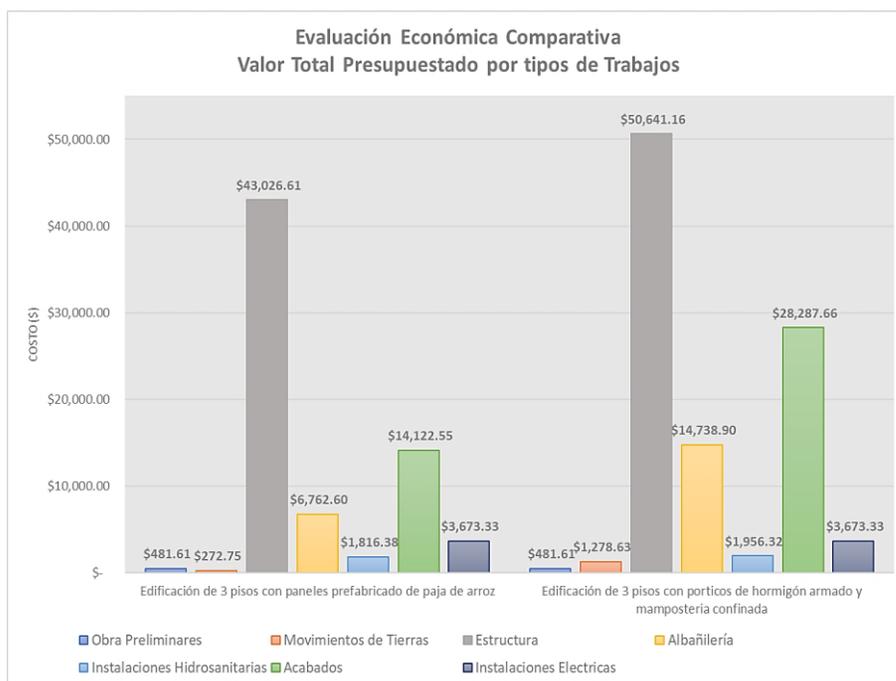
Evaluación económica comparativa valor total presupuestado, edificación de 3 pisos con paneles prefabricados de paja vs sistema tradicional aporticado de hormigón armado.



En la figura 138, se indican los costos por tipos de trabajos realizados para la construcción de la edificación de 3 pisos “CASA NATURAL AYLLU WASI” con los dos sistemas estructurales.

Figura 138

Evaluación económica comparativa por etapa constructiva, edificación de 3 pisos con paneles prefabricados de paja vs sistema tradicional aporticado de hormigón armado.



Se tiene que el costo para trabajos de construcción en cuanto a la estructura de la edificación con paneles prefabricados de paja es de \$ 43 026.61, mientras que para los mismos con el sistema aporticado de hormigón armado su valor es igual a \$ 50 641. 16, es decir, al optar por construir esta edificación con paneles prefabricados portantes de paja y elementos estructurales de madera se obtiene una reducción en su presupuesto de \$ 7 614.55, siendo más económica en un 15 % en la adquisición y montaje de estos elementos, comparada con el sistema tradicional de columnas, vigas y losas.

El costo en cuanto acabados para la edificación con paneles prefabricados de paja es de \$ 14 122.75, mientras que para los mismos con el sistema aporticado de hormigón armado

es igual a \$ 28 285.66, como podemos verificar este valor se duplica en el sistema tradicional, esto se debe a que en las edificaciones con paneles prefabricados de paja no es necesario la colocación empastes exteriores e interiores, ni la aplicación pintura, debido a que los mismos cuentan con una estética natural única. Además, las construcciones con fardos y paneles de paja a diferencia del sistema tradicional de hormigón, permiten colocar entablados de piso como sustitución de las losas, produciendo un ahorro significativo en rubros de embaldosado y colocación de barrederas que con el sistema tradicional es indispensable.

El costo en cuanto a trabajos de albañilería para la edificación con paneles prefabricados de paja es de \$ 6 762.60, mientras que para los mismos con el sistema aporticado de hormigón armado es igual a \$ 14 738. 90, como podemos darnos cuenta al igual que los costos por acabados este valor llega casi a duplicarse para el sistema tradicional, esto se debe a que en la edificación con paneles prefabricados no se incluyen rubros de enlucidos ni mampostería, los cuales elevan el costo del sistema tradicional significativamente. Cabe indicar que los paneles de paja de arroz cuentan con un recubrimiento de mortero a base de cal de 2.5 cm de espesor, este contribuye notablemente en la resistencia a compresión y a tensión diagonal del panel, formando un solo elemento estructural con los fardos y los marcos, el valor de este recubriendo se lo considerando dentro del rubro "Panel prefabricado con paja de arroz de E = 0.35 m, incluye montaje y mortero a base de cal E = 2.5 cm".

El costo en cuanto a trabajos de movimientos de tierras para la edificación con paneles prefabricados de paja es de \$ 272.75, mientras que para los mismos con el sistema aporticado de hormigón armado es de \$ 1 278. 63, como podemos verificar este valor es mayor en casi 5 veces que al obtenido con el sistema tradicional, esto se debe a que en la edificación con el sistema tradicional de hormigón la cantidad de excavación y desalojo de tierras es mayor por la construcción de plintos, por ende, aumenta significativamente los costos de los rubros mencionados. Para los trabajos preliminares, instalaciones eléctricas y sanitarias los costos son relativamente iguales tanto para los dos sistemas constructivos.

Capítulo VIII

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Las dimensiones y geometría de los elementos de maderas, placas metálicas adoptadas para el diseño y construcción de la máquina enfardadora son adecuadas, pues durante el proceso de enfardado las palancas trabajaron correctamente sin generarse fallas en las mismas, mientras que los tableros contrachapados de 18 mm de espesor que conforman el cajón de compresión de la máquina, resistieron grandes presiones sin presentar cuarteaduras o fisuramiento.
- La máquina enfardadora diseñada en la presente investigación, permite obtener fardos de paja de arroz con dimensiones de 90.00 cm de largo, 45.00 cm de ancho y 35 cm de altura, con un peso y densidad promedio de 12.90 kg y 84.00 kg/m³ respectivamente, por lo tanto, los mismos cumplen con las dimensiones establecidas por el Código Residencial Internacional, 2018 “Apéndice Construcción con Paja” para fardos pequeños y son considerados aptos para ser utilizados en la construcción ya que su densidad supera los 80 kg/m³.
- La paja de arroz es un material idóneo para ser utilizado en la construcción de edificaciones, puesto que al medir el contenido de humedad de los fardos, el 96 % de los mismos presentan humedades inferiores al 20 %, este valor es el máximo permitido por Código Residencial Internacional, 2018 “Apéndice Construcción con Paja” para considerarlos aptos en las construcciones, el valor de esta propiedad debe cumplirse estrictamente debido a que la humedad contribuye al pudrimiento de la paja y por ende al deterioro de este tipo de edificaciones.
- De las 8 mezclas obtenidas a partir del diseño de mezcla patrón MP1 que contiene como árido fino arena tradicional, la única que permite obtener morteros con una resistencia mínima a compresión de 6.89 MPa establecida por el Código

Residencial Internacional, 2018 “Apéndice Construcción con Paja” para utilizarse como recubrimiento en paredes construidas con paja, es la mezcla 3070AM1 (30% Cal + 70% Cemento + Aditivo + Arena), cuya resistencia a compresión a los 28 días de edad es de 7.19 MPa.

- De las 8 mezclas obtenidas a partir del diseño de mezcla patrón MP2 que contiene como árido fino perlita, las mezclas 3070AM2 (30% Cal + 70% Cemento + Aditivo + Perlita), 3070SM2 (30% Cal + 70% Cemento + Sin aditivo + Perlita) y 5050AM2 (50% Cal + 50% Cemento + Aditivo + Perlita) permiten obtener morteros con una resistencia mínima a compresión de 6.89 MPa establecida por el Código Residencial Internacional, 2018 “Apéndice Construcción con Paja” para utilizarse como recubrimiento en paredes construidas con paja, cuya resistencia a compresión a los 28 días de edad es de 13.09, 9.89 y 7.22 MPa respectivamente.
- La dosificación y mezcla óptima seleccionada para la elaboración del mortero de recubrimiento de los paneles elaborados con paja de arroz es la 5050AM2 (50% Cal + 50% Cemento + Aditivo + Perlita), que a diferencia de las otras que cumplen con la resistencia mínima requerida de 6.89 MPa, esta contiene mayor cantidad de cal y por ende menor cantidad de cemento, lo cual es beneficioso, ya que el mortero elaborado con esta mezcla presentará mayor permeabilidad y contribuirá de forma adecuada al control de la humedad dentro y fuera del panel debido a la presencia de la paja.
- El mortero de recubrimiento a base de cal y cemento elaborado con la mezcla óptima 5050AM2 (50% Cal + 50% Cemento + Aditivo + Perlita) aumenta la resistencia a compresión del panel (marco de madera + paja) en un 32 % y su resistencia a compresión diagonal en un 68 %, por lo tanto, este no solo protege a la paja ante factores externos, sino que también mejora las propiedades mecánicas del panel y por ende el comportamiento estructural de las edificaciones. Mientras

que la paja de arroz no contribuye significativamente en la resistencia a compresión del marco de madera y únicamente sirve como material de relleno, pero puede aumentar la resistencia a compresión diagonal del marco en un 41.66 %.

- El mortero de recubrimiento a base de cal y cemento elaborado con la mezcla óptima 5050AM2 (50% Cal + 50% Cemento + Aditivo + Perlita) aumenta el módulo de elasticidad del panel (marco de madera + paja) hasta un 29% y el módulo de rigidez a corte hasta un 99% haciéndolo más rígido, mientras que la paja de arroz disminuye el módulo de elasticidad del marco de madera en un 13.74% contribuyendo en su flexibilidad, pero aumenta el módulo de rigidez a corte del mismo hasta un 40.00%.
- La sustitución de la arena tradicional por la perlita en las mezclas permite la obtención de morteros aligerados a base de cal y cemento con una densidad igual a 1.45 g/cm^3 , la cual es inferior en un 25 % a la obtenida en los morteros con arena tradicional, esto es posible a la baja densidad de la perlita que es igual a 0.68 g/cm^3 y que al compararla con la densidad de la arena tradicional es 2.35 veces menor.
- El uso de la perlita como sustitución total del árido fino tradicional en las mezclas de morteros para emplearse como recubrimiento en paneles elaborados con paja de arroz, reduce el peso propio del panel hasta un 25 %, lo cual es beneficioso en este tipo de edificaciones, ya que también contribuye en la reducción de las cargas laterales que actúan en las mismas y que intervienen de forma directa en las respuestas estructurales de la edificación como periodos, desplazamientos, derivas de piso y participación de masa modal.
- Al realizar la evaluación estructural de la edificación de 3 pisos "CASA NATURAL AYLLU WASI" con paneles de paja de arroz, se obtiene una participación de masa modal superior al 90% para el sentido "X", "Y" y "Z" en el modo 4, 5 y 6 respectivamente, derivas de piso máximas de 0.95% en el sentido "X" y 0.33% en el

sentido “Y” las cuales son inferiores al 2%, además un periodo fundamental de vibración de 0.21 s que está por debajo del máximo de 0.27 s, por lo tanto, se concluye que los paneles elaborados a base de paja de arroz son aptos para utilizarlos en la construcción de edificaciones sismoresistentes de hasta 3 pisos de altura, ya que estas presentan un adecuado comportamiento estructural al cumplir con los requisitos mínimo establecidos por la norma NEC – SE – DS “Riesgo Sísmico”.

- Los paneles elaborados con paja de arroz, marcos de madera y morteros de recubrimiento a base de cal, cemento y perlita, que cuentan con una densidad de 298.16 kg/m³, módulo de elasticidad de 424.08 MPa, módulo rigidez a corte de 157.11 MPa y coeficiente de Poisson de 0.35, son una opción confiable para ser utilizados en edificaciones de hasta 3 pisos, que además de tener un apropiado comportamiento estructural también brinda un ahorro económico de hasta el 34% en el presupuesto total de la edificación, 15 % en cuanto a la construcción de su estructura, 50% en trabajos de acabados, 55 % en trabajos de albañilería y 78 % en trabajos de movimiento de tierra, comparado con el sistema tradicional aperticado de hormigón armado.
- El reemplazo del cemento por la cal en las mezclas de morteros y el uso de la paja de arroz en la construcción de edificaciones, garantiza una reducción considerable en el impacto ambiental, debido a la disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera que genera la industria cementera y la quema de la paja, de esta manera se fomenta el uso de materiales alternativos y sustentables para ser utilizados en el campo de la construcción.

Recomendaciones

- Previamente a la construcción de los paneles con paja de arroz se recomienda verificar cuidadosamente si la madera que conforma el marco no se encuentra rajada o fisurada, pues los resultados obtenidos de resistencia a compresión y tensión diagonal de los mismos, pueden verse seriamente afectados obteniéndose de tal manera valores completamente erróneos.
- Se recomienda el uso de aditivos acelerantes de resistencias en los morteros que contienen cal de producción nacional como la extraída de la calera la Paz, ya que la incorporación de este material a las mezclas retarda los tiempos de fraguado, obteniéndose morteros con resistencias bajas a edades tempranas, que con la adición del aditivo esta puede aumentar hasta un 76%.
- Antes de la aplicación del mortero de recubrimiento en las caras laterales del panel es recomendable la instalación de una malla metálica hexagonal, ya que está a más de evitar el fisuramiento del mortero también permite una distribución uniforme del mismo, manteniendo un espesor constante en toda su superficie, que sin su colocación no es fácil lograr.
- Se recomienda en futuras investigaciones la ejecución de ensayos a grande escala con este tipo de paneles, para complementar los resultados obtenidos en el presente estudio y evaluar la posibilidad de crear una normativa en Ecuador enfocada a la construcción de estas edificaciones, que en nuestro medio son totalmente desconocidas.
- Para la construcción de la máquina enfardadora es recomendable que la altura del elemento a compresión mida de 1 a 2 cm menos que la altura establecida para el fardo, puesto que la paja de arroz al tener una longitud mayor a 20 cm genera un atascamiento en la parte superior del elemento a compresión cuando su altura es

igual a la del fardo, ocasionando que este no se deslice con facilidad durante el proceso de enfardo.

Referencias

- Acevedo, R., & Carrillo, O. (28 de Octubre de 2016). Validación ante norma Chilena de sistema constructivo en madera, fardos de paja y tierra. Paraguay: 16° SIACOT Paraguay.
- Alava, M., Poaquiza, J., & Castillo, G. (2018). La producción arrocerá del Ecuador: Caso Samboondón, 2011 - 2015. Revista ESPACIOS.
- Albuja, D., & Pantoja, j. (2017). Estudio del reforzamiento de la mampostería de bloque de hormigón con malla electrosoldada mediante ensayos destructivos. Quito, Ecuador.
- Anchundia, C. (2022). Producción del sector maderero y su influencia en la economía ecuatoriana. Universidad Agraria del Ecuador.
- Andrade, A., & Palacios, K. (2019). Elaboración de bloque prefabricado con cáscara de cacao, viruta de madera y mortero mixto para viviendas de interés social. Guayaquil, Ecuador.
- Aparicio, J., & Acosta, A. (Mayo de 2022). Contribuciones de paneles compuestos a las edificaciones construidas con cerramientos de madera contralaminada. Revista Científica IMHOPEP.
- Arias, J. (2017). Ordenanza para la rehabilitación de construcciones informales afectadas por. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Artigas, V., Quintana, M., Positieri, M., & Oshiro, A. (2022). Efectos de la utilización de desecho de polvo de perlita natural en hormigones autocompactantes coloreados. CONICET.
- Asdrubali, F., Alessandro, D., & Schiavoni, S. (2016). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*.
- Banco Central del Ecuador. (Abril de 2022). Boletín de análisis agropecuario.

- Barbero, C. (2021). *Industrialización aplicada a la construcción con paja*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Bernal, M. (06 de Junio de 2018). *Uso de la paja en la construcción de paneles aislantes o estructurales, aprovechamiento de residuos de cereales de la agricultura*. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- Bonifacio, B. (2021). *Evaluación Técnica y económica de tres enfaradoras manuales de forrajes, en la estación experimental de patacamaya*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
- Briones, T., & Estrada, W. (2018). *Compresión axial del adobe compactado con fibras de paja Ichu, paja de arroz y paja de trigo*. Cajamarca, Perú.
- Caicedo, O., Diaz, O., & Cadena, D. (2019). *Diseño de un sistema de producción de arroz sostenible en Babahoyo*. Babahoyo, Los Rios, Ecuador.
- Camaniero, R. (2007). *Dosificación de mezclas*. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Cañizares, F. (2017). *Terremoto en Pedernales – Ecuador, abril 2016*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Cascone, S., Catania, F., Gagliano, A., & Sciuto, G. (2018). *Energy performance and environmental and economic assessment of the platform frame system with compressed straw*. *Energy Build*.
- Cascone, S., Rapisarda, R., & Cascone, D. (2019). *Physical Properties of Straw Bales as a Construction Material: A Review*. Catania, Italia.
- Código Residencial Internacional . (2018). *Apéndice S - Construcción de Paja*. Estados Unidos.

- Consejo de la Judicatura. (Octubre de 2017). Mapa de Justicia de Paz.
- Costes, P., Evrard, A., Biot, B., Keutgen, G., Daras, A., & Dubois, S. (2017). Full size measurements considering the direction of the heat flow, buildings.
- Cruz, C., & Portilla, F. (Septiembre de 2022). Análisis de las propiedades físico - mecánicas de la madera estructural ecuatoriana y su aplicación en el diseño de vivienda social. Universidad Técnica de Ambato.
- D'Alessandro, F., Bianchi, F., Baldinelli, G., Rotili, A., & Schiavoni, S. (2017). Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance. *J. Build. Eng.*
- DEISA. (2022). Obtenido de <https://desarrollosindustriales.com/equipos-y-plantas/prensas-verticales/>
- Duque, J., Casanova, G., & García, J. (2021). Desarrollo y evaluación energética de un sistema para compactación de residuos de cosecha de caña de azúcar. *Desarrollo y evaluación energética de un sistema para compactación de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC)*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- EcoCocon. (2022). *EcoCocon*. Obtenido de EcoCocon - Straw Wall System: <https://ecococon.eu/>
- Espinosa, P., Proaño, D., & Barrera, L. (2019). Catálogo de madera Estructural de Ecuador . Cuenca, Azuay: Universidad del Azuay.
- Flores, V., Rodríguez, M., Romero, I., & Esquivas, L. (2019). Caracterización de morteros mixtos de cla obtenida del reciclado de fosfoyeso. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

G.I.S Ibérica. (2023). *Instrucciones para el servicio y utilización del medidor de humedad digital de forrajes*. Obtenido de

<http://www.gisiberica.com/MANUALES/HM013%20Instrucciones%20Delmhorst%20F-2000%20GIS.pdf>

Gómez, I. (2020). Desarrollo sostenible. *Elearning S.L.* Barcelona, España.

González, J. (2016). Estudio del mortero de pega usado en el cantón Cuenca, propuesta de mejora, utilizando adiciones de cal. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.

González, A., Rodríguez, R., Ponce, M., & Morales, E. (2016). Revocos de tierra curda: Especificaciones técnicas para el empleo de morteros preparados de arcillas en construcción. Universidad de Sevilla.

Hassanli, R. (2017). Behavior of Unbounded Post-tensioned Mansory Walls. Australia: Springer.

Hernández, G., & Elgueta, P. (2020). La madera es un material de construcción sustentable. *Tecnología y Productos de Madera*. Instituto Forestal 2020.

Hernandez, M., Jiménez, S., & Sanchez, J. (19 de Marzo de 2020). Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector de la construcción. *Tecnología en Marcha*.

Hidalgo, S. (2018). Evaluación de la reactividad puzolánica de la ceniza de paja de arroz. Valencia, España.

Jacome, E. (2017). *El 70% de edificaciones son informales en el Distrito metropolitano de Quito*. Obtenido de El comercio: <https://www.elcomercio.com/actualidad/municipio-quito-regulación-viviendas-informales.html>

Jama, A. (2020). Vulnerabilidad sísmica de viviendas de construcción informal en el cantón Santa Lucía. Barcelona, España.

- Lecompte, T., & Le Duigou, A. (2017). Mechanics of straw bales for building applications. *Journal of Building Engineering* .
- Lee, C., & Grove, J. (2015). Straw yields from six small grain varieties.
- Maraldi, M., Molari, L., & Molari, G. (2015). Mechanical characterization of straw bales for use in construction. *Materials Science*.
- Mardones, J., Jofré, I., & Hernandez, S. (2018). Construcción con fardos de paja: una solución sustentable para la "Finca ecológica prema mandal". Universidad Técnica Federico Santa María.
- Marin, M., & Almazan, A. (2019). Explotación de recursos naturales y conflicto en Colombia. Bogota, Colombia.
- Markovic, V., & Milic, M. (2018). Thermal insulation properties and fire resistance of walls with straw bale filling. In *Contemporary Achievements in Civil Engineering*. Subotica, Serbia: University of Novi Sad.
- Marques, B., Tadeu, A., Almeida, J., & Brito, J. (2019). Characterization of sustainable building walls made from rice straw bales. *Journal of Building*.
- Martínez, C., & Jové, S. (Septiembre de 2019). Estudio y aplicaciones de las construcciones con fardos de paja. Universidad de Valladolid.
- MD - SE - MD, . (2015). Estructura de Madera. Quito, Ecuador.
- Mejia, J. (2018). Estudio Estructural de mampostería confinada en ladrillo para viviendas emergentes en la zona de pedernales. Quito, Ecuador.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2017). Sistema de Información del Sector Agropecuario. Quito, Ecuador.

Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador. (2019). *Hectárea de cebada variedad Metcalfe y Cañicapa serán sembradas en la Zona 3*. Obtenido de

<https://www.agricultura.gob.ec/1-464-hectareas-de-cebada-variedad-metcalfe-y-canicapa-seran-sembradas-en-la-zona-3/>

Ministerio del Ambiente y Agua. (2020). Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales. Quito, Ecuador.

Ministerio del Ambiente y Agua. (2020). Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales. Quito, Ecuador.

Minke, G., & Manlke, F. (2006). Manual de construcción con fardos de paja. Montevideo, Uruguay.

Mir, A., Nehme, S., & Assaad, J. (2020). Durability of self-consolidating concrete containing natural waste. Heliyon.

Montañez, E. (2018). Uso de la paja en la construcción de paneles aislantes o estructurales, aprovechamiento de residuos de cereales de la agricultura. Bogotá, Colombia.

Muñoz, J., & Chipuendo, J. (2021). Diseño de una ruta gastronómica para el desarrollo turístico del cantón Buena Fe año 2020. Universidad Técnica de Babahoyo.

NEC - SE - DS, . (2015). *Peligro Sísmico*. Quito.

NEC - SE - HC, . (2015). Estructuras de Hormigón Armado. Quito, Ecuador.

Nitzkin, R. (2021). Construcción con Paja: ¿De donde viene? ¿A donde va? Vilanova de Cerveira.

Nitzkin, R., & Termens, N. (2010). Casas de paja, Una guía para auto. EcoHabitar Visiones Sostenibles S.L.

- NTE INEN 151, . (2010). Cemento hidráulico. Definición de términos. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 156, . (2009). Cemento Hidráulico. Determinación de la densidad. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 2380, . (2011). Cemento hidraulico. Requisistos de desempeño para cementos hidráulicos. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 247, . (2015). Cal hidratada para uso de mampostería. Requisitos. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 2502, . (2009). Cemento hidraulico. Determinación del flujo en morteros. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 2518. (2010). Morteros para unidades de mampostería. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 488, . (2009). Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 696, . (2011). Áridos. Ánalisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 855, . (2010). áridos. Determinación de las imperezas orgánicas en el árido fino para hormigón. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 856, . (2010). Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorbción del árido fino. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 858, . (2010). Áridos. Determinación de la masa unitaria (Peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 862, . (2011). Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 872, . (2011). Áridos para hormigón. Requisitos. Quito, Ecuador.

- OoCities, . (2020). *Clasificación de la Madera. Especificaciones comunes en función de sus características técnicas, secado y nudos*. Obtenido de https://www.oocities.org/hispano_austral/clasmad.htm
- Ortega, M., & Benedetti , R. (2021). *La madera como material para la construcción: mitos, realidades y oportunidades*. Chile: Instituto Forestal.
- Pachala, J., & Viera, P. (Agosto de 2016). *Sistema constructivo de casas unifamiliares con muros de paja portantes*. Quito, Ecuador: UniversidaA Central del Ecuador.
- Pahlavan, P., Manzi, S., Sansonetti, A., & Chiara, M. (2018). Valorization of organic additions in restorative lime mortars: Spent cooking oil and albumen. *Construction and Building Materials*.
- Pahlavan, P., Manzi, S., Sansonetti, A., & Chiara, M. (2018). Valorization of organic additions in restorative lime mortars: Spent cooking oil and albumen. *Construction and Building Materials*.
- Pavia, S., & Brennan, O. (2018). *Historic Mortars. Portland Cement - Lime mortars for conservation*. Dublin, Ireland: Springer International Publishing.
- Pérez, A., Gonzáles , J., Guerrero, J., Guerrero, L., Sánchez, M., & Chiken, A. (2022). The optimization of hydrated lime putties and lime mortars using nopal pectin. Ciudad de México, México: Universidad Autonoma de México.
- Ponce, V., Sarabia, G., & García, J. (Enero de 2017). *Análisis de eficiencia energetica de muro de paja y revoques de tierra cruda*. Vaparaiso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.

- Quirós, L. (2018). Estudio del comportamiento mecánico del mortero reforzado con fibra de coco y modificado con óxido de hierro. Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Rivero, I. (2021). Construcción prefabricada en paja en España. Porto, Portugal: Universidade Portucalense.
- Rodriguez, J., & Solis, M. (2020). Hacia una metodología para la caracterización experimental del comportamiento a compresión de la mampostería de adobe. Sevilla, España.
- Rojas, M., Otávaro, I., Caicedo, J., Mauricio, H., & Fregoso, C. (2020). Uso de las escorias de arco eléctrico (EHAE) en la construcción – Estado del Arte. Cali, Colombia.
- Romans, I., Iborra, M., & López, A. (14 de Julio de 2014). Estudio y análisis de la construcción con balas de paja, comparación del sistema estructural CUT con la construcción convencional de H.A. Universitat Politècnica de València.
- Romero, J., & Iborra, C. (2015). Parametros y paneles modulares prefabricados con paja para la construcción de viviendas y rehabilitación energética de edificaciones. *Energy Efficiency*.
- Sánchez, M. (Enero de 2020). La paja como mecanismo bioclimático en la construcción . Universidad de Valladolid.
- Sadzevicius, R., Gurskis, V., & Ramukevicius, D. (November de 2015). Sustainable construction of agro - industrial buildings from. Proceedings of the 7th International Scientific Conference Rural Development 2015.
- Salas, K., Seclen, W., & Alvarado, C. (2020). Diseño de una máquina enfardadora de alfalfa con capacidad de 50kg para pequeños productores en el sector agro-ganadero de la zona norte del Perú. Perú: Universidad del Señor de Sipán.

- Sánchez, A., Vayas, M., Mayorga, F., & Freire, C. (2020). *El Arroz en Ecuador*. Obtenido de <https://blogs.cedia.org.ec/obest/wp-content/uploads/sites/7/2020/12/Analisis-arroz-Ecuador.pdf>
- Sánchez, A., Vayas, T., Mayorga, F., & Freire, C. (2022). Sector maderero Ecuador. Universidad Técnica de Ambato, observatorio económico y social de Tungurahua.
- Sanchez, F., & Hernández, Y. (Noviembre de 2017). Nuevas tendencias en la construcción con balas de paja. *Sistemas de prefabricados*. Valencia, España.
- Sánchez, M., & Hernández, N. (Noviembre de 2017). Nuevas tendencias en la construcción con balas de paja.
- Schueftan, A., Aguilera, F., Aravena, C., Benedetti, S., & Gallardo, C. (2021). Incentivos para impulsar la construcción en madera en Chile. Chile.
- Sebapathy, K., & Gedupudi, S. (2019). Straw bale based constructions: Measurement of effective thermal transport properties. *Constr. Build. Mater.*
- Sotomayor, J. (Agosto de 2016). Investigación e Ingeniería de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.
- Teslik, J. (2021). Analysis of the fire properties of blown insulation from crushed straw in the buildings. MPDI.
- Valepucha, J. (2014). Propuesta sustentable aplicada a una vivienda saludable. Cuenca, Ecuador.
- Viera, P., & Acero, M. (2022). Estudio de las cales producidas en Ecuador para la realización de morteros para la construcción. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

- Viera, P., & Caiza, P. (2016). *Diseño de mampostería de relleno en base a la experiencia del sismo de 16 de abril de 2016*. Quito, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Universidad Central del Ecuador.
- Viera, P., Aguirre, D., & Monzó, J. (2020). Determinación de las características del fardo de paja de trigo, como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción,. Quito, Ecuador.
- Viera, P., Pachala, J., Rosero, H., & Caiza, P. (2016). Sistemas constructivos de casas unifamiliares con muros de paja portante. Quito, Ecuador.
- Walker, P., Thomson, A., & Maskell, D. (2020). *Straw bale construction*. Bath, Inglaterra: University of Bath, United Kingdom.
- Wang, H., Chiang, P., Cai, Y., Li, C., Wang, X., Chen, T., . . . Huang, Q. (2018). Application of wall and insulation materials on Green building. *Sustainable buildings*.
- Zhang, D., Zhao, J., Wang, D., Xu, C., Zhai, M., & Ma, X. (2018). Comparative study on the properties of three hydraulic lime mortar systems: Natural hydraulic lime mortar, cement-aerial lime-based mortar. *Construction and Building Materials*.

Apéndices