



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**IMPLEMENTACIÓN DE MATERIAL SINTÉTICO POLIPROPILENO Y RESIDUO
AGROINDUSTRIAL CACHAZA DE CAÑA EN PROTOTIPO DE MATERIAL DE
CONSTRUCCIÓN PARA USO EN TECHOS INCLINADOS**

Sedwin Aroldo Ramos Lemus

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE MATERIAL SINTÉTICO POLIPROPILENO Y RESIDUO
AGROINDUSTRIAL CACHAZA DE CAÑA EN PROTOTIPO DE MATERIAL DE
CONSTRUCCIÓN PARA USO EN TECHOS INCLINADOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SEDWIN AROLDI RAMOS LEMUS

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Avila
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

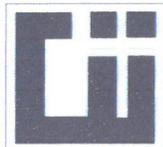
En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**IMPLEMENTACIÓN DE MATERIAL SINTÉTICO POLIPROPILENO Y RESIDUO
AGROINDUSTRIAL CACHAZA DE CAÑA EN PROTOTIPO DE MATERIAL DE
CONSTRUCCIÓN PARA USO EN TECHOS INCLINADOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha 6 de noviembre de 2017.



Sedwin Aroldo Ramos Lemus



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Guatemala, 06 de agosto de 2018

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador del Área de Materiales de Construcción
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Ordoñez:

Cumpliendo con lo resuelto con la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación: **IMPLEMENTACIÓN DE MATERIAL SINTÉTICO POLIPROPILENO Y RESIDUO AGROINDUSTRIAL CACHAZA DE CAÑA EN PROTOTIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN PARA USO EN TECHOS INCLINADOS**, presentado por el estudiante: Sedwin Aroldo Ramos Lemus.

Considero que el trabajo de graduación se ha desarrollado satisfactoriamente y cumple con los objetivos que motivaron la selección de dicho tema, por lo que hago de su conocimiento que apruebo el trabajo realizado. Sin otro particular,

Atentamente,



Mario Rodolfo Corzo Ávila
Mario Rodolfo Corzo A.
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 2089

Ingeniero Civil Mario Rodolfo Corzo Ávila
Colegiado No. 2,089
Asesor



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
 10 de septiembre de 2018

Ingeniero
 Hugo Leonel Montenegro Franco
 Director Escuela Ingeniería Civil
 Facultad de Ingeniería
 Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **IMPLEMENTACIÓN DE MATERIAL SINTÉTICO POLIPROPILENO Y RESIDUO AGROINDUSTRIAL CACHAZA DE CAÑA EN PROTOTIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN PARA USO EN TECHOS INCLINADOS** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Sedwin Aroldo Ramos Lemus quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
 Coordinador del Área de Materiales y
 Construcciones Civiles

/mrrm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Sedwin Aroldo Ramos Lemus IMPLEMENTACIÓN DE MATERIAL SINTÉTICO POLIPROPILENO Y RESIDUO AGROINDUSTRIAL CACHAZA DE CAÑA EN PROTOTIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN PARA USO EN TECHOS INCLINADOS da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre 2018

/mmm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
De Guatemala

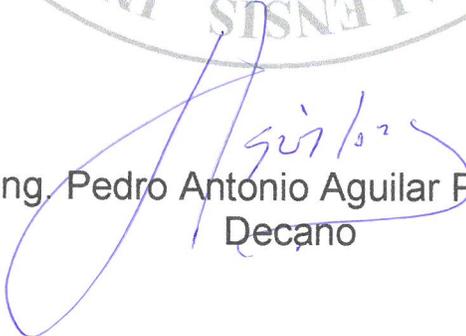


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.414.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil del trabajo de graduación titulado: **“IMPLEMENTACIÓN DE MATERIAL SINTÉTICO POLIPROPILENO Y RESIDUO AGROINDUSTRIAL CACHAZA DE CAÑA EN PROTOTIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN PARA USO EN TECHOS INCLINADOS”**, presentado por el estudiante universitario: **Sedwin Aroldo Ramos Lemus** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, Octubre de 2018

/cchm

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por estar presente en cada momento de mi vida y permitir grandes bendiciones.
- Mi madre** Adelina Florián (q.e.p.d.). Por ser mí inspiración y brindarme tanto amor incondicional, en cada momento de la vida. Fue gracias a su lucha diaria que aprendí el significado de la perseverancia.
- Mi padre** Isabel Ramos por todas las enseñanzas brindadas en cada etapa de mi vida, por cada consejo y el amor brindado. Por ser el ejemplo de un padre luchador que se supera constantemente.
- Mi hermana** Claudia Ramos por convertirse en padre y madre apoyándome en cada momento de la vida, enseñándome la importancia de analizar cada situación desde distintos puntos de vista.
- Mi sobrina** Dulce Ramos por apoyarme y cuidarme en todo momento, brindándome sus sabios consejos.

Aron Alvarado

Por estar presente en cada etapa de la vida y brindarme su apoyo desinteresado.

Licda. Astrea Chavarría

Por brindarme su amor y su apoyo incondicional. Por creer en mí y darme las herramientas necesarias para culminar mi carrera profesional.

Licda. Anselma Jáuregui

Por brindarme su apoyo y cariño. Por sus sabios consejos para darme una guía de vida.

Ing. Mario Corzo

Por su amistad incondicional, por ser el guía en mi formación como persona y como profesional, siendo un gran ejemplo en todos los aspectos de la vida.

Ing. Gabriel Ordoñez

Por brindarme su apoyo en el momento que regresé a la universidad y motivarme a seguir superándome.

AGRADECIMIENTOS A:

- Asociación de Estudiantes Becados** de Por apoyarme y brindarme la oportunidad de continuar con mis estudios universitarios, junto a un excelente grupo de estudiantes.
- Ing. Arturo Samayoa** Por brindarme la oportunidad de laborar en el departamento de matemáticas y así poder culminar mis estudios.
- Berny Juárez** Por su apoyo incondicional en cada momento de la carrera y por decir presente en la resolución de las dificultades de la vida.
- Mis amigos de la sección de prefabricados** de la Bertha Solís, Diana Morales, Ester Barrios, Nataly Guzmán, Mario Monzón, Mario Álvarez, por su amistad invaluable y apoyarme en todo momento al brindarme sus sabios consejos, frases de apoyo y las muestras de cariño incondicional.
- Mis amigos de la facultad** de la Betzabé Sitán, Gabriela Hernández, Lesly Canox, Alfredo Quiñónez, Antonio Méndez, por su amistad, apoyo incondicional y sus conocimientos en cada semestre, logrando superar cada obstáculo de la carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Otros estudios relacionados con el tema.....	1
1.1.1. Formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de cáscara de coco y polímero reciclado	1
1.1.1.1. Persona que realizó el estudio.....	2
1.1.1.2. Época que lo realizaron	2
1.1.1.3. Resultados obtenidos	2
1.1.1.4. Conclusiones de Ana, Coyoy.....	3
1.1.1.5. Recomendaciones de Ana, Coyoy.....	4
1.2. Calificación del desempeño de un filtro banda para maximizar la recuperación de sacarosa en la cachaza proveniente de la clarificación del jugo de caña	5
1.2.1.1. Persona que realizó el estudio.....	5
1.2.1.2. Época que lo realizaron	5
1.2.1.3. Resultados obtenidos	5
1.2.1.4. Conclusiones de Amílcar, Ayala	8
1.2.1.5. Recomendación de Amílcar, Ayala.....	8

2.	MATERIALES ORGÁNICOS Y VEGETALES: LA CACHAZA	9
2.1.	Importancia de la agroindustria azucarera	9
2.1.1.	Subproductos de la caña.....	11
2.1.2.	Cachaza	13
2.1.3.	Bagazo	15
2.1.3.1.	Bagazo en Guatemala.....	17
2.1.3.2.	Tableros de bagazo.....	18
2.2.	Composición de la cachaza	21
2.3.	Formación de la cachaza	22
2.3.1.	Preparación de caña	22
2.3.1.1.	Patio de caña	22
2.3.1.2.	Picadoras de caña.....	22
2.3.2.	Extracción de jugo.....	23
2.3.3.	Preparación de jugo	23
2.3.3.1.	Sulfitación y alcalización.....	23
2.3.3.2.	Calentamiento y clarificación.....	24
2.3.4.	Filtración de cachaza	27
2.3.4.1.	Manejo de lodos	27
2.3.4.2.	Mezclador de cachaza	29
2.3.5.	Factores agroindustriales que afectan la composición	31
3.	ELEMENTOS RECICLABLES COMO CATALIZADORES Y OTROS DISPONIBLES EN EL MERCADO	33
3.1.	Estearato de zinc	33
3.1.1.	Riesgos toxicológicos.....	35
3.2.	Yeso	38
3.2.1.	Materias primas.....	38
3.2.2.	Tipos de cristales en el yeso	43

3.2.3.	Transformación del yeso en un material aglomerante.....	44
4.	RESINAS POLIÉSTER.....	49
4.1.	Termoplásticos	49
4.2.	Plásticos reforzados	50
4.3.	Materiales reforzantes	52
4.4.	Proceso de fabricación	53
4.4.1.	Ácidos saturados	54
4.4.2.	Ácidos no saturados	54
4.4.3.	Alcoholes	54
4.5.	Formulación para propiedades especiales	55
4.5.1.	Resistencia al fuego (retardantes)	55
4.5.2.	Resistencia al intemperismo	58
4.5.3.	Resistencia a temperatura.....	59
4.5.4.	Resistencia química.....	59
4.6.	Fibras de polímeros termoplásticos.....	60
4.7.	Polipropileno.....	61
4.7.1.	Estructura molecular.....	61
4.7.2.	Macro estructura.....	61
4.7.3.	Estructura paracristalina	63
4.7.4.	Estructura química.....	64
4.8.	Propiedades del polipropileno	66
4.8.1.	Propiedades físicas	66
4.8.2.	Propiedades mecánicas	67
4.8.3.	Propiedades térmicas	71
4.8.4.	Propiedades ópticas	72
4.8.5.	Propiedades eléctricas	72
4.8.6.	Propiedades químicas	74

5.	HABITABILIDAD EN LAS VIVIENDAS	79
5.1.	Temperatura.....	80
5.2.	Calor.....	81
5.3.	Aislante térmico.....	82
5.4.	Conducción térmica.....	82
5.5.	Termodinámica ambiental	83
5.6.	Humedad.....	85
6.	TECHOS INCLINADOS	89
6.1.	Cubiertas.....	90
6.2.	Formas de techos.....	90
6.2.1.	Techos planos	91
6.2.2.	Techos inclinados.....	92
6.3.	Tipos de techos (materiales)	92
7.	ENSAYOS A EFECTUAR	95
7.1.	Ensayo de desgaste.....	95
7.1.1.	Equipo utilizado	95
7.1.2.	Procedimiento	97
7.2.	Ensayo de flexión.....	97
7.2.1.	Equipo utilizado	98
7.2.2.	Procedimiento	99
7.3.	Ensayo de impacto.....	100
7.3.1.	Equipo utilizado	100
7.3.2.	Procedimiento	102
7.4.	Ensayo de pesos volumétricos.....	102
7.4.1.	Equipo utilizado	103
7.4.2.	Procedimiento	104
7.5.	Ensayo de erosión acelerada.....	105

	7.5.1.	Equipo utilizado	105
	7.5.2.	Procedimiento.....	106
7.6.		Ensayo de penetración	107
	7.6.1.	Equipo utilizado	107
	7.6.2.	Procedimiento.....	108
7.7.		Ensayo de desgarro al tornillo	108
	7.7.1.	Equipo utilizado	108
	7.7.2.	Procedimiento.....	110
7.8.		Ensayo de temperatura	110
	7.8.1.	Equipo utilizado	110
	7.8.2.	Procedimiento.....	112
7.9.		Ensayo de ruido.....	113
	7.9.1.	Equipo utilizado	113
	7.9.2.	Procedimiento.....	115
8.		NORMAS APLICADAS.....	117
	8.1.	Construcción.....	117
9.		DESARROLLO EXPERIMENTAL	119
	9.1.	Materiales y equipo	119
		9.1.1. Materiales	119
		9.1.2. Equipo	122
	9.2.	Metodología.....	124
		9.2.1. Algunas variaciones del prototipo	130
	9.3.	Datos obtenidos.....	137
		9.3.1. Ensayo de desgaste	137
		9.3.2. Ensayo de flexión	137
		9.3.3. Ensayo de impacto	138
		9.3.4. Ensayo de pesos volumétricos	139

9.3.5.	Ensayo de erosión acelerada	141
9.3.6.	Ensayo de penetración.....	143
9.3.7.	Ensayo de desgarró al tornillo	144
9.3.8.	Ensayo de temperatura	144
9.3.9.	Ensayo de ruido	145
9.4.	Cálculos efectuados	146
9.4.1.	Ensayo de flexión	146
9.4.2.	Ensayo de impacto	147
9.4.3.	Ensayo de pesos volumétricos	148
9.4.4.	Ensayo de erosión acelerada	150
9.4.5.	Ensayo de temperatura	152
9.4.6.	Ensayo de ruido	152
9.5.	Resultados	153
9.5.1.	Ensayo de desgaste	153
9.5.2.	Ensayo de flexión	154
9.5.3.	Ensayo de impacto	155
9.5.4.	Ensayo de pesos volumétricos	156
9.5.5.	Ensayo de erosión acelerada	161
9.5.6.	Ensayo de penetración.....	163
9.5.7.	Ensayo de desgarró al tornillo	163
9.5.8.	Ensayo de temperatura	164
9.5.9.	Ensayo de ruido	165
9.6.	Análisis de resultados	166
9.6.1.	Ensayo de desgaste	166
9.6.2.	Ensayo de flexión	166
9.6.3.	Ensayo de impacto	167
9.6.4.	Ensayo de pesos volumétricos	167
9.6.5.	Ensayo de erosión acelerada	167
9.6.6.	Ensayo de penetración.....	168

9.6.7.	Ensayo de desgarro al tornillo	168
9.6.8.	Ensayo de temperatura	168
9.6.9.	Ensayo de ruido.....	168
CONCLUSIONES		169
RECOMENDACIONES.....		173
BIBLIOGRAFÍA.....		177
APÉNDICES		181
ANEXOS		183

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Pol de cachaza variando el flujo de agua de imbibición	6
2.	Pol de cachaza variando la velocidad de la tela filtrante	6
3.	Curvas de sedimentación de diferentes floculantes	7
4.	Velocidad de sedimentación de la cachaza	7
5.	Zona cañera de la costa sur de Guatemala	10
6.	Guatemala, zafra 2014/2015.....	11
7.	Productos del ingenio azucarero.....	12
8.	Subproductos de la industria de la caña	13
9.	Cachaza (base seca) en Guatemala.....	21
10.	Diagrama de un clarificador tipo <i>Dorr - Oliver</i>	25
11.	Esquema típico para procesamiento del jugo	28
12.	Mezclador de cachaza	29
13.	Proceso de fabricación del azúcar	30
14.	Presentaciones del estearato de zinc.....	34
15.	Fase anhidrita natural.....	41
16.	Tipos de cristales en el yeso	43
17.	Estructura del propileno	61
18.	Configuraciones del polipropileno	62
19.	Estructura isotáctica.....	65
20.	Estructura sindiotáctica	65
21.	Estructura atáctica.....	66
22.	Comparación PP modificado vs plásticos de ingeniería.....	68
23.	Isotacticidad en las propiedades de tensión.....	69

24.	Elongación de PP vs commodities.....	70
25.	Propiedades de PE vs PP.....	73
26.	Cambios del PP con productos químicos	74
27.	Antioxidantes para polipropileno	76
28.	Confort térmico	80
29.	Termodinámica en una vivienda	85
30.	Techo plano	91
31.	Formas básicas de techos inclinadas	92
32.	Ensayo de desgaste	96
33.	Partes del equipo para el ensayo de desgaste	96
34.	Equipo del ensayo de flexión pura.....	98
35.	Bomba hidráulica P- 462.....	99
36.	Bala de impacto	100
37.	Equipo ensayo de impacto.....	101
38.	Equipo para el ensayo de peso volumétrico	103
39.	Vernier con lector digital	104
40.	Equipo del ensayo de erosión acelerada	105
41.	Balanza.....	106
42.	Equipo para el ensayo de dureza	107
43.	Mica.....	109
44.	Equipo para el ensayo de desgarro al tornillo	109
45.	Equipo de aislamiento térmico	111
46.	Partes del equipo de ensayo	111
47.	Termómetro tipo pistola	112
48.	Equipo de aislamiento térmico.....	113
49.	Partes del equipo de ensayo	114
50.	Decibelímetro.....	114
51.	Anhidrita tipo II.....	119
52.	Bagazo de caña.....	120

53.	Cachaza de caña	120
54.	Estearato de zinc en polvo	121
55.	Polipropileno de baja densidad	121
56.	Balanza electrónica	122
57.	Horno de convección forzada.....	123
58.	Molde para las muestras del prototipo	123
59.	Prensa neumática	124
60.	Secado de bagazo y la cachaza de caña.....	125
61.	Mezcla de materiales	125
62.	Polipropileno con estearato de zinc	126
63.	Mezcla en sus proporciones.....	127
64.	Distribución de materiales en el molde.....	128
65.	Prensa neumática y molde.....	129
66.	Muestras finales	130
67.	Muestra con exceso de finos.....	131
68.	Temperatura inadecuada	132
69.	Exceso de anhídrita.....	133
70.	Polipropileno insuficiente.....	134
71.	Muestra con exceso de finos.....	135
72.	Muestra final.....	136
73.	Ensayo de desgaste.....	153
74.	Módulo de elasticidad vs deformación	155
75.	Secado muestra 2.1.1	158
76.	Secado muestra 2.2.1	159
77.	Secado muestra 2.3.1	160
78.	Densidad seca vs espesor	160
79.	Densidad proceso de secado vs espesor.....	161
80.	Resultados de dureza	163
81.	Temperatura vs tiempo	165

82.	Niveles de ruido	166
-----	------------------------	-----

TABLAS

I.	Fibra de coco y aglutinante polipropileno reciclado	2
II.	Comparación de materiales reforzantes	52
III.	Deformación de las muestras	137
IV.	Alturas de caída de la bala	138
V.	Medidas muestra 2.1.1	139
VI.	Medidas muestra 2.2.1	139
VII.	Medidas muestra 2.3.1	140
VIII.	Medidas de secado 2.1.1	140
IX.	Medidas de secado 2.2.1	140
X.	Medidas de secado 2.3.1	141
XI.	Medidas muestra 2.1	141
XII.	Medidas muestra 2.2	142
XIII.	Medidas muestra 2.3	142
XIV.	Lecturas de penetración Janka	143
XV.	Carga a desgarre	144
XVI.	Datos temperatura	144
XVII.	Medidas de ruido 2.1 S	145
XVIII.	Medidas de ruido 2.2 S	145
XIX.	Esfuerzos y deformaciones.....	154
XX.	Capacidad de energía.....	155
XXI.	Resultados húmedo 2.1.1	156
XXII.	Resultados húmedo 2.2.1	156
XXIII.	Resultados húmedo 2.3.1	157
XXIV.	Resultados secado 2.1.1	157
XXV.	Resultados secado 2.2.1	158

XXVI.	Resultados secado 2.3.1	159
XXVII.	Erosión muestra 2.1	161
XXVIII.	Erosión muestra 2.2	162
XXIX.	Erosión muestra 2.3	162
XXX.	Desgarro al tornillo	163
XXXI.	Temperaturas promedio	164
XXXII.	Medidas promedio de ruido	165

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<i>a</i>	Ancho de la muestra
<i>b</i>	Base de la muestra
<i>cm</i>	Centímetro
<i>e</i>	Espesor de la muestra
<i>E_c</i>	Energía de choque
<i>h</i>	Altura
<i>ha</i>	Hectárea
<i>i</i>	Dato i-ésimo
<i>kg</i>	Kilogramo
<i>l</i>	Luz libre entre apoyos
<i>m</i>	Metro
<i>ml</i>	Mililitro
<i>mm</i>	Milímetro
<i>P</i>	Carga puntual
<i>v</i>	Velocidad
<i>V</i>	Volumen
<i>w_h</i>	Peso saturado
<i>w_s</i>	Peso seco
<i>ρ</i>	Densidad
<i>σ</i>	Esfuerzo
°C	Grado centígrado
% <i>A</i>	Porcentaje de absorción
% <i>H</i>	Porcentaje de humedad

GLOSARIO

ABS	Acrilo Nitrilo Butadieno Estireno.
Alcalización	Etapa del proceso de purificación del jugo en forma de lechada de cal o sacarato de calcio.
ASAZGUA	Asociación de Azucareros de Guatemala.
ASTM	American Society of Civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles).
ATAGUA	Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala.
Bagacillo	Fracción fina del bagazo obtenida mediante tamizado o separación neumática, generalmente usado como ayuda filtrante.
Bagazo	Residuo de la caña que sale del molino después de la extracción del jugo.
Cachaza	Material retenido y descargado por los filtros que se encargan de filtrar los lodos del clarificador, conocida como torta de filtro.

CENGICAÑA	Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar.
Centrifugación	Las masas cocidas resultantes de la cristalización se depositan en tanques o vasos de retención para pasar seguidamente al área de centrifugas en donde se consigue la separación de las masas en cristales y miel.
Centrífugas	Máquina dotada de una canasta cilíndrica giratoria forrada internamente por una delgada tela de cobre o acero inoxidable perforada con infinidad de agujeros de pequeño diámetro que permiten el paso de la miel a la vez que retienen los cristales de azúcar.
Clarificación	El propósito es separar las impurezas presentes en el jugo. El jugo contiene una considerable cantidad de materia fina y coloidal en suspensión que debe eliminarse para conseguir azúcares de alta pureza al final del proceso.
Clarificador	Equipo para separación por sedimentación de los sólidos suspendidos en soluciones de azúcar turbias.
Conglomerado	Dos o más cristales que crecen unidos durante la cristalización al vacío en tachos.

Cristalización	La cristalización consiste básicamente en la formación de los cristales de azúcar a partir de diferentes mieles.
Fibra	Estructura fibrosa insoluble seca de la caña.
Filtrado	Líquido que ha pasado a través de la malla.
Floculante	Polieléctrolito en solución añadido al jugo para promover la clarificación.
FUNDAZUCAR	Fundación del Azúcar.
ICC	Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.
Imbibición	Proceso de añadir agua en la planta de extracción para aumentar la extracción.
Melaza	Licor madre que se separa de los cristales mediante centrifugación.
PET	Tereftalato de Polietileno.
Pol	Contenido de sacarosa aparente expresado como porcentaje de masa, medido a partir de la rotación óptica de luz polarizada al pasar por una solución azucarada.

Prototipo	Primer ejemplar que se fabrica de una figura, un invento u otra cosa y que sirve de modelo para fabricar otras iguales, o molde original con el que se fabrica.
RAC	Residuo Agrícola de Cosecha.
RPM	Revoluciones Por Minuto
Secado	La función de secado busca entonces reducir el contenido de humedad del azúcar hasta un valor lo bastante bajo para impedir el desarrollo de microorganismos que puedan ocasionar el deterioro del producto o en el peor de los casos, su pérdida.
Tachos	Son evaporadores al vacío de efecto sencillo diseñados para la manipulación de materiales viscosos.
TAH	Toneladas métricas de Azúcar por Hectárea.
TCH	Toneladas métricas de Caña por Hectárea.
UV	Ultra Violeta.
Zafra	Es el tiempo que dura el proceso a través del cual se cosecha la caña y fabrica el azúcar.

RESUMEN

En Guatemala se registra que entre las actividades económicas de mayor importancia se encuentran la exportación de azúcar, dejando como resultado del proceso de producción una gran cantidad de desechos de caña de azúcar (con lo que se obtiene la cachaza de caña). Adicional a esto, se tiene la disponibilidad de materiales sintéticos que tienen la característica de ser reciclables, también existen materiales que pueden utilizarse como catalizadores en el proceso de horneado.

Al combinar estos materiales puede darse origen a un elemento de uso estructural que forme parte de un sistema constructivo en techos inclinados. El resultado de dicha combinación tiene la finalidad de brindar las características básicas, para ser considerado como un material de uso en techos inclinados.

Este tipo de material de construcción permitiría reemplazar los techos improvisados que suelen realizarse, para las viviendas de bajo nivel económico en el interior del país. Estos requieren un mantenimiento constante y el reemplazo total a corto plazo.

OBJETIVOS

General

Implementar material sintético polipropileno y residuo agroindustrial cachaza de caña en un prototipo de material de construcción, para uso en techos inclinados.

Específicos

1. Analizar el material constructivo para uso de techo y establecer sus características físicas y propiedades mecánicas.
2. Evaluar la resistencia a impacto, desgaste, flexión e impermeabilidad del material constructivo para techo.
3. Proponer la dosificación de polipropileno y cachaza de caña que permita desarrollar un prototipo de material de construcción, que cumpla con los requerimientos de un techo.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala como muchas partes del mundo se sigue con ideas tradicionales en la construcción, se innova en diseños atractivos y cómodos, o vivienda simple donde no se hace ningún aprovechamiento de los recursos naturales y crea un impacto negativo al ambiente. También es de mencionar que la problemática del calentamiento global obliga al ser humano a encontrar alternativas viables y/o adaptables en la búsqueda del aprovechamiento de los recursos naturales y de esta forma crear ambientes confortables de manera simple pero eficiente para los habitantes.

En febrero de 2015, se presentó la formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de cáscara de coco y polímero reciclado, como trabajo de graduación hecho por Ana Gabriela Coyoy Paz en la Universidad de San Carlos de Guatemala, para obtener el título de Licenciada en Ingeniería Química. Trabajo en el que se indica la existencia diversos estudios dedicados al aprovechamiento de desechos o reutilización de materiales, con los que se pretenden generar nuevos productos o bien productos que tengan las características necesarias, para convertirse en alternativas a productos que ya existen en el mercado.

La ciencia ha tratado de avanzar, tomando en cuenta métodos y materiales que sean amigables con el ambiente. Y para ello se realiza un resumen de las propiedades de los elementos que participan en el desarrollo del prototipo de material de construcción, para aprovechar sus peculiaridades y obtener un material apto para su uso en la construcción de obra civil.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala como muchas partes del mundo se sigue con ideas tradicionales en la construcción, se innova en diseños atractivos y cómodos, o vivienda simple donde no se hace ningún aprovechamiento de los recursos naturales y crea un impacto negativo al ambiente. También es de mencionar que la problemática del calentamiento global obliga al ser humano a encontrar alternativas viables y/o adaptables en la búsqueda del aprovechamiento de los recursos naturales y de esta forma crear ambientes confortables de manera simple pero eficiente para los habitantes.

La ciencia ha tratado de avanzar, tomando en cuenta métodos y materiales que sean amigables con el medio ambiente, por ejemplo los residuos agroindustriales desde años atrás se ha considerado para implementar proyectos de investigación, sobre su capacidad para ser utilizada como combustible y otra como abono.

1.1. Otros estudios relacionados con el tema

Existen diversos estudios sobre la incorporación de fibras en elementos sintéticos, siendo las fibras naturales las que requieren mayor estudio.

1.1.1. Formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de cáscara de coco y polímero reciclado

En este trabajo se busca la incorporación de la fibra de coco con el polipropileno y determinar su comportamiento.

1.1.1.1. Persona que realizó el estudio

Ana Gabriela Coyoy Paz

1.1.1.2. Época que lo realizaron

El estudio se realizó en el año 2015

1.1.1.3. Resultados obtenidos

Materia prima utilizada, siendo esta la fibra de coco y los pellets de polipropileno reciclado como aglutinante, manipulados adecuadamente para formular probetas de madera plástica.

Tabla I. **Fibra de coco y aglutinante polipropileno reciclado**

Detalle	Polipropileno reciclado	Coco
Tamaño de partícula (mm)	4,00	2,36 – 0,54, < 0,54
Tamaño de fibra (mm)	NAP	44,31 a 8,69
Temperatura degradación/inflamación (°C)	272	281
Temperatura de fusión (°C)	172	NAP
% Humedad	NAP	64,4655
Densidad (g/ml)	0,0897	0,0948
Capacidad de absorción (%)	NAP	205

Fuente: COYOY, Ana. *Formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de cáscara de coco y polímero reciclado*, p. 42.

1.1.1.4. Conclusiones de Ana, Coyoy

- En una semana es desechada 268,74 kg de fibra de coco, únicamente por 17 puestos de venta dedicados a esta fruta tropical, siendo su mayor cantidad de desecho sábado y domingo.
- Se identificó el tamaño de partícula y fibra de coco adecuado para lograr una buena formulación, el tamaño del pellet fue constante. Además se identificó la temperatura de fusión y degradación del polipropileno y la temperatura de inflamación del coco, para no afectar a la formulación con la temperatura establecida para el proceso. El coco tiene un porcentaje de humedad alto y aumenta el tiempo de secado.
- Se determinó un procedimiento adecuado para la correcta preparación de la materia prima tomando en cuenta su clasificación, el porcentaje de humedad al llegar al proceso de molienda y la separación por tamaño de partículas, para crear una mezcla controlada en las formulaciones.
- Se determinó que la mejor formulación de material fibroreforzado es la de 80 por ciento de polipropileno y 20 por ciento de fibra de coco, teniendo variaciones insignificantes en su densidad al aumentar el tiempo dentro del horno; mayor resistencia a la flexión, resistencia a la deformación por presión y temperatura de inflamación porque interfiere en el comportamiento natural de la fibra de coco; presenta menor capacidad de absorción y porcentaje de humedad por la cantidad de fibra.

- El Durpanel tiene menor densidad, mayor resistencia a la flexión, significativamente menor dureza, menor temperatura de inflamación, capacidad de absorción significativamente mayor al igual que el porcentaje de humedad, en comparación con el material fibroreforzado formulado con 80 por ciento de polipropileno.

1.1.1.5. Recomendaciones de Ana, Coyoy

- Realizar campañas sobre la utilización de desechos sólidos y los beneficios que estos traen al medio ambiente.
- Realizar un análisis microbiológico al mesocarpio del coco a utilizar, para determinar el efecto que tiene en las características físicas y mecánicas del material a utilizar.
- No establecer tiempos menores a 30 minutos ni mayores a 50 minutos para la estadía de la muestra dentro del horno, porque al ser menor, el polipropileno reciclado no llega a su punto de fusión y si es mayor provoca daños físicos a la fibra de coco a una temperatura de 275 °C.
- No introducir al molino de martillo materia prima con un porcentaje de humedad mayor al 6 por ciento, ocasionará problemas mecánicos y no se obtendrá un proceso de molienda satisfactorio.
- Comparar el material fibroreforzado con mayor cantidad de aglomerados que se encuentren actualmente en el mercado, para establecer su uso.

1.2. Calificación del desempeño de un filtro banda para maximizar la recuperación de sacarosa en la cachaza proveniente de la clarificación del jugo de caña

La recuperación de sacarosa en la cachaza proveniente de la clarificación del jugo de caña, puede optimizarse al utilizar un filtro banda.

1.2.1.1. Persona que realizó el estudio

Amílcar Eduardo Ayala González

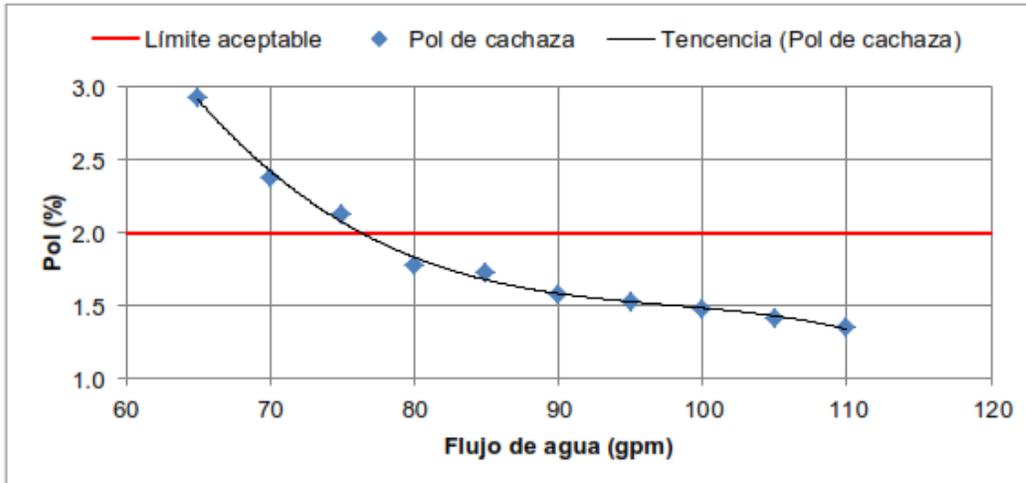
1.2.1.2. Época que lo realizaron

El estudio se realizó en el año 2012

1.2.1.3. Resultados obtenidos

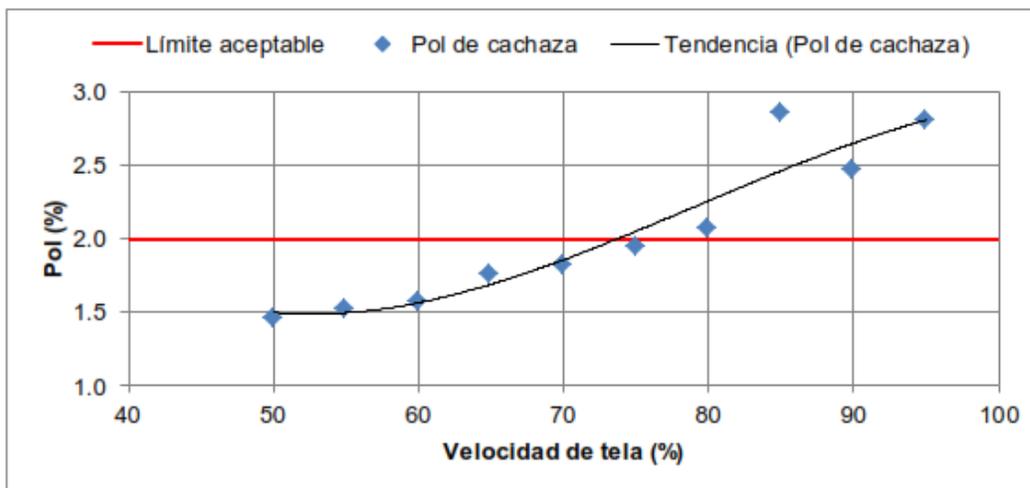
Se realizaron una serie de ensayos utilizando máximos y mínimos de las variables y analizando el pol de cachaza obtenido a estas condiciones, con el método ICUMSA. Conociendo las tendencias presentadas se realizó otra serie de ensayos para cada una de las cuatro variables a manipular manteniendo el flujo de cachaza constante. Además, se analizó el pol de cachaza monitoreando el pH y la cantidad de agua de dilución. A continuación se presentan los resultados:

Figura 1. Pol de cachaza variando el flujo de agua de imbibición



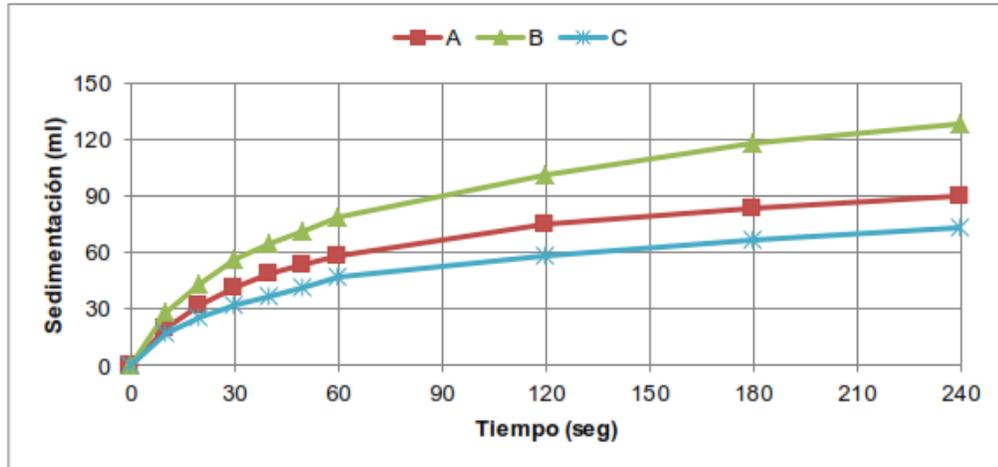
Fuente: AYALA, Amílcar. *Formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de cáscara de coco y polímero reciclado*. p. 43.

Figura 2. Pol de cachaza variando la velocidad de la tela filtrante



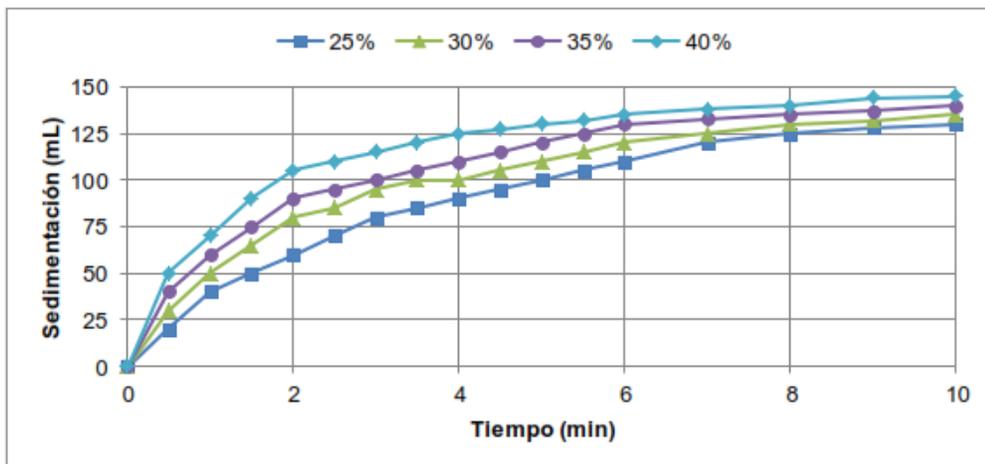
Fuente: AYALA, Amílcar. *Formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de cáscara de coco y polímero reciclado*. p. 44.

Figura 3. **Curvas de sedimentación de diferentes flocculantes**



Fuente: AYALA, Amílcar. *Formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de cáscara de coco y polímero reciclado*. p. 46.

Figura 4. **Velocidad de sedimentación de la cachaza**



Fuente: AYALA, Amílcar. *Formulación de un material fibroreforzado a base de la mezcla de cáscara de coco y polímero reciclado*. p. 47.

1.2.1.4. Conclusiones de Amílcar, Ayala

- La preparación de cachaza, que está formada por la adición de floculante, lechada de cal, agua de lavado y predilución en el caso de los filtros banda, es importante para garantizar la formación correcta de flóculos en la entrada del filtro de cachaza y permitir que el jugo rico en sacarosa sea filtrado.
- Las condiciones de operación del filtro con que se obtiene un pol menor a 2% son una relación de agua-cachaza de 60-75%, 30-35% volumen/volumen de dilución, de 15-20 partes por millón de floculante adicionado, 65-75% velocidad de la tela filtrante, 100% el ventilador de vacío y un pH de cachaza entre 7 y 8.

1.2.1.5. Recomendación de Amílcar, Ayala

- La cachaza se ve afectada por varios factores agroindustriales como; la variedad de caña, el tipo de corte de caña, la forma de limpieza de caña, químicos utilizados en la clarificación, etcétera; evaluando las variables de operación de los filtros de cachaza tomando como base el presente trabajo. Se debe realizar un balance energético del agua que se adiciona al proceso de tratamiento de jugo, teniendo en cuenta que el agua que se adiciona a los filtros de cachaza retorna a la fábrica y tiene un consumo energético al ser evaporada.

2. MATERIALES ORGÁNICOS Y VEGETALES: LA CACHAZA

2.1. Importancia de la agroindustria azucarera

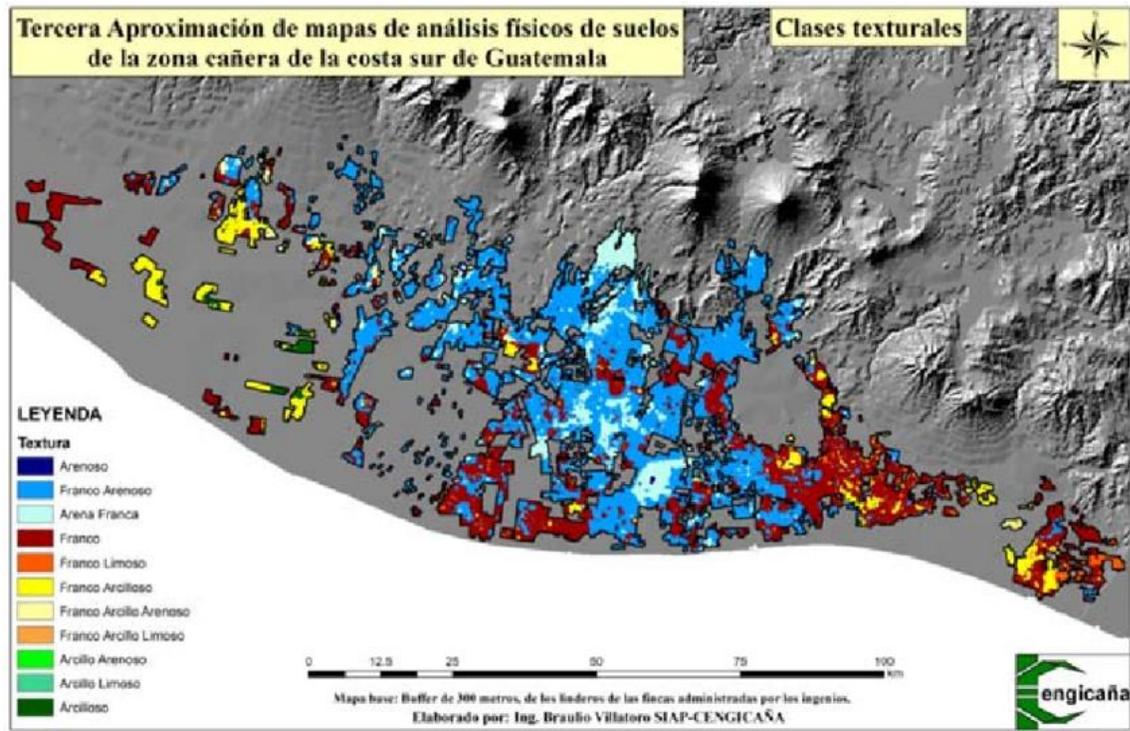
La Agroindustria Azucarera de Guatemala está conformada por 12 ingenios azucareros y diversas organizaciones gremiales: Asociación de Azucareros de Guatemala, ASAZGUA; Fundación del Azúcar, FUNDAZUCAR; Unión de Cañeros; Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala, ATAGUA; Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, CENGICAÑA; EXPOGRANEL e Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, ICC.¹

Guatemala produce 2.98 millones de toneladas métricas de azúcar de las cuales exporta el 72%; 0.78 millones de toneladas métricas son destinadas al consumo interno. El azúcar para consumo doméstico es fortificado con vitamina “A” y enriquecido con hierro.

La Agroindustria Azucarera genera 65 000 empleos directos y 350 000 empleos directos e indirectos en 271,000 hectáreas cosechadas de caña que equivalen al 2,5% del territorio nacional.

¹ CENGICAÑA. *Eventos históricos y logros 1992-2017*. p. 9.

Figura 5. Zona cañera de la costa sur de Guatemala



Fuente: VILLATORO, Braulio. *Tercera aproximación de mapa de clases texturales de la zona cañera*. https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Tercera-Aproximacion-de-mapa-de-clases-texturales-de-la-zona-canera_fig2_303692461/. Consulta: 24 de abril de 2018.

“Actualmente el área cosechada de caña de azúcar representa el 2,5% de la superficie total del país. Para la zafra 2014/2015, los valores alcanzaron 271 000 a 2 975 801 toneladas métricas y 10,97 para área, producción de azúcar y rendimiento respectivamente”.²

El aumento de la productividad ha sido más notable en los últimos 20 años; en el quinquenio 1985/90, el rendimiento fue de 7,10 TAH, mientras que para el último quinquenio 2010/15 llegó hasta 10.35 TAH.

² CENGICAÑA. *Eventos históricos y logros 1992-2017*. p. 11.

Figura 6. **Guatemala, zafra 2014/2015**

Ingenios	12: Concepción, Pantaleón, Palo Gordo, Madre Tierra, Tuluá, San Diego-Trinidad, Santa Teresa, La Sonrisa, La Unión, Santa Ana, Magdalena, El Pilar
Superficie cosechada	271,000 hectáreas (2.5% del territorio nacional)
Caña molida	28.67 millones de toneladas métricas
Producción de azúcar	2.98 millones de toneladas métricas
Rendimiento de caña	104 toneladas métricas de caña por hectárea (TCH)
Rendimiento de azúcar	11 toneladas métricas de azúcar por hectárea (TAH)
Exportación de azúcar	2.14 millones de toneladas métricas (72%), 4º. Lugar en exportación a nivel mundial
Consumo interno	0.78 millones de toneladas métricas, azúcar fortificada con vitamina "A" (1,986) y enriquecida con hierro (2,008)
Cogeneración	2,600 GWh/año aporta el 29% de la demanda de energía eléctrica del mercado nacional (en período de zafra noviembre – mayo)
Etanol	5 destilerías, 269 millones de litros, generan US\$ 152 millones en divisas (2,014)
Generación de divisas por exportación de azúcar	US\$851 millones (2,015)
Generación de empleo	65,000 empleos directos y 350,000 empleos directos e indirectos
Organizaciones gremiales	Asociación de Azucareros de Guatemala, ASAZGUA; Fundación del Azúcar, FUNDAZUCAR; Unión de Cañeros; Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala, ATAGUA; Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, CENGICAÑA; EXPOGRANEL e Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, ICC.

Fuente: CENGICAÑA. *Eventos históricos y logros 1992-2017*. p. 11.

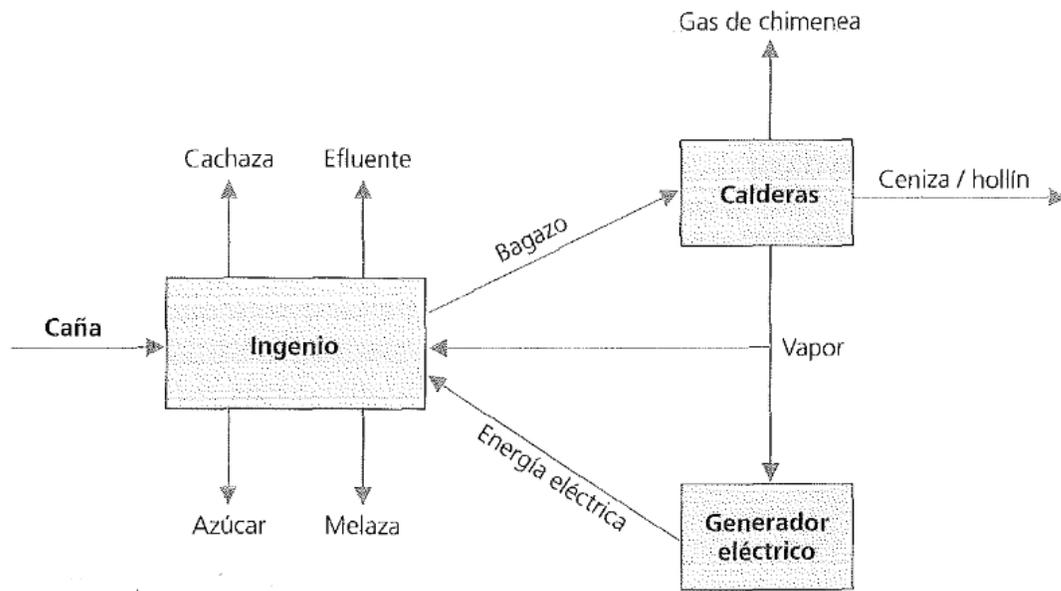
2.1.1. Subproductos de la caña

En los ingenios azucareros se producen diversos productos, de ellos el principal es el azúcar. Los otros productos adicionales al azúcar son denominados frecuentemente subproductos o coproductos; adicional a ellos, estos son denominados frecuentemente productos con valor agregado.

Para la corriente del efluente líquido se tienen disponibles varias opciones. Las emisiones gaseosas de la caldera son manejadas usualmente con filtros depuradores accionados con agua y no tienen valor alguno.

La ceniza proveniente del horno de la caldera y las cenizas emitidas en la chimenea se manejan como productos del bagazo.

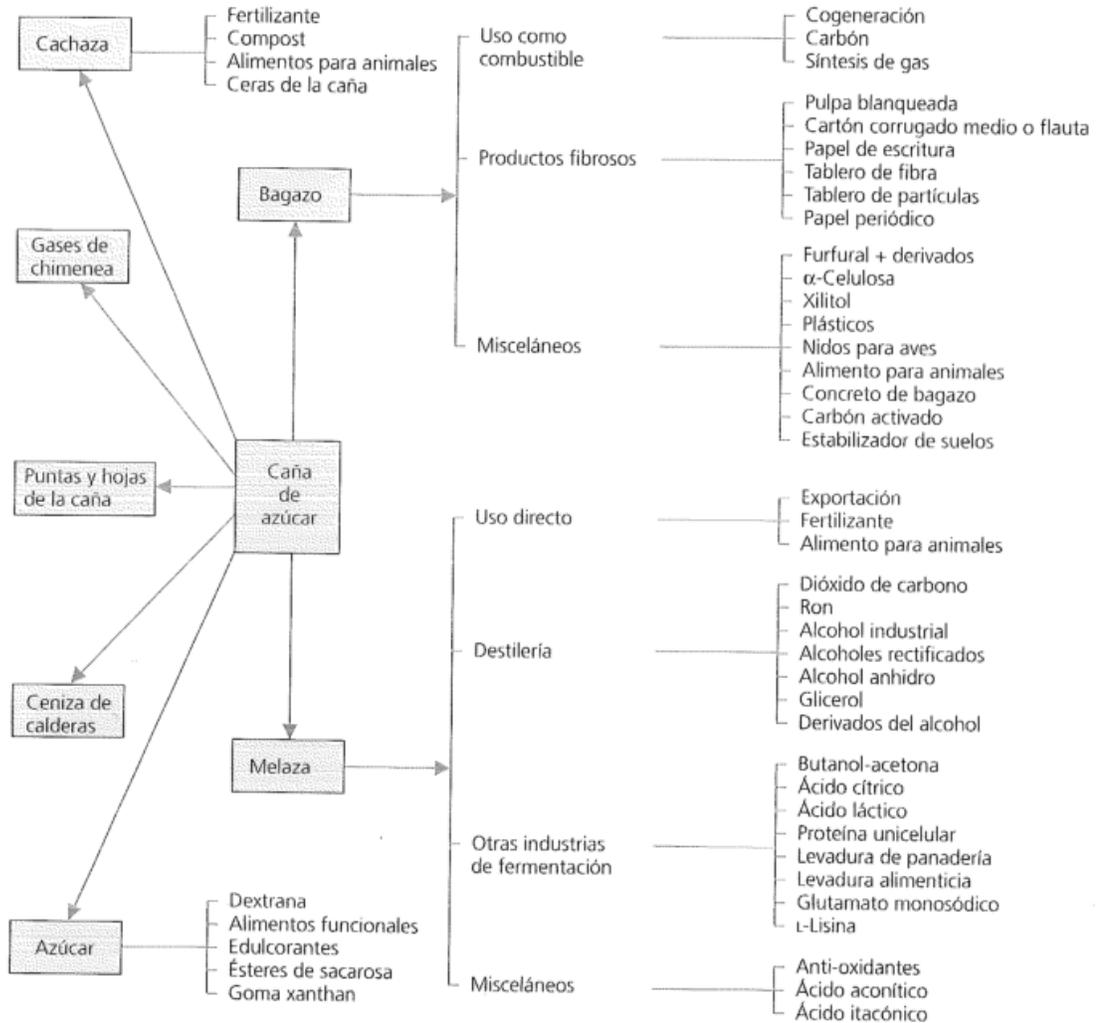
Figura 7. **Productos del ingenio azucarero**



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 821.

Es conveniente agruparlas en base al producto del ingenio del que se derivan. Se puede tener una visión integral de las oportunidades disponibles, enfocándose en aquellas que tengan una viabilidad económica actual o un futuro potencial. La literatura está llena de subproductos potenciales a partir de la caña de azúcar, pero muy pocos tienen un valor comercial importante.

Figura 8. Subproductos de la industria de la caña



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 822.

2.1.2. Cachaza

La cachaza es el producto que se separa del jugo de la caña en el proceso de clarificación y filtración. Incluye la mayoría del material sólido del jugo crudo y de los sólidos precipitados en los procesos de calentamiento y alcalizado del jugo.

También contiene algo del bagacillo fino agregado a los lodos del clarificador previo al ingreso a los filtros con el objeto de mejorar la filtración. La cantidad de la cachaza varía enormemente dependiendo de las cantidades de arena y tierra presentes en la caña y de la cantidad de bagacillo agregado en los filtros. En muchas fábricas la cantidad de cachaza producida es asumida o estimada y no se conoce con precisión. La cantidad es significativamente menor en fábricas que poseen difusores en lugar de molinos, los difusores proporcionan un jugo crudo mucho más limpio.

La cantidad de cachaza se encuentra entre un rango de 30 a 80 kg de torta / tonelada de caña, o de 10 a 40 kg / tonelada de caña en una fábrica con difusores. Un valor promedio razonable es 50 kg/t de caña. La calidad también varía sustancialmente. Contiene materia orgánica precipitada en la clarificación y componentes inorgánicos, particularmente calcio y fosfato que constituyen el precipitado inorgánico más importante en la clarificación. La cachaza constituye en muchos ingenios un problema de desecho.³

En muchos casos la cachaza es retomada a los cañaverales ya que posee valor tanto como fertilizante como acondicionador de suelos. En otros casos, la cachaza es generalmente acarreada hacia un vertedero o evacuada por canal a una pileta para su posterior eliminación. Debido al contenido de humedad y a algunos azúcares residuales, la cachaza fresca se fermenta originando ácidos y frecuentemente creando un olor desagradable. Por esta razón es común dejarla reposar apilada antes de esparcirla. Esto también conlleva a un secado de la torta, lo que reduce el costo del transporte.

La cachaza es utilizada como alimento para animales debido al contenido de proteína y carbohidratos en la torta. Sin embargo, también contiene arena y hace complicado el hecho de utilizarla como un alimento para animales.

³ REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 823.

El bagacillo que se mezcla con la cachaza es parte del bagazo, la cual también es empleada como ayuda filtrante en la estación de filtros. El bagacillo fino es mejor que el grueso y no debe contener fibras largas, las cuales no ayudan a lograr un buen filtrado. El bagacillo puede ser separado del bagazo mediante el uso de mallas, placas perforadas montadas en el fondo de un conductor de bagazo, mediante separación neumática usando un obturador de persiana, o mediante aspiración de las partículas finas de una corriente de bagazo.⁴

2.1.3. Bagazo

El bagazo contiene la mayoría del material fibroso de la caña que se suministra a las fábricas de azúcar y es debido a su naturaleza fibrosa que resulta difícil de manipular como material sólido. Aunque tiene capacidad para fluir, es propenso a formar atoramientos, apuntalarse y compactarse cuando no se manipula correctamente. No es corrosivo, pero contiene arena que ha sido alimentada con la caña de azúcar y se considera bastante abrasivo.

Debido a su tendencia a formar atoramientos de manera muy rápida, cualquier tolva utilizada para el transporte del bagazo debe ser divergente buscando garantizar que no se produzcan atoramientos. El tamaño promedio normalmente se encuentra entre 1 y 5 mm, obtenido mediante análisis con tamices. Este varía ampliamente dependiendo del tipo y grado de preparación de la caña y del número de molinos.

Existen ingenios en donde el procesamiento de la caña es pobre ya que son frecuentes las partículas superan los 25 mm. El bagazo obtenido de un sistema difusor usualmente presenta una apariencia más fibrosa debido a que ha sido sometido a menos reducción de tamaño que en el caso de un tren de molinos. Como resultado de eso es más difícil de procesar y necesita una manipulación adecuada.

⁴ REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 700.

El contenido de cenizas en el bagazo es bastante variable y está determinado en gran medida por el tipo de suelo del campo donde se ha cosechado o la materia extraña contenida en la caña a procesar. También es afectado por el proceso de extracción.

La materia extraña que se encuentra presente en el bagazo puede resultar en un desgaste sustancial de los equipos debido a su naturaleza abrasiva. El bagazo no es un material homogéneo, sino que consiste de una mezcla entre fibra y médula, las cuales tienen partículas que presentan grandes diferencias en las proporciones de forma y de aspecto.

El almacenamiento de grandes cantidades de bagazo para su uso fuera de la temporada de zafra o para aplicaciones de subproductos, se está haciendo más común.

De igual manera los métodos para reducir el consumo de bagazo durante la zafra y/o reducir el consumo de combustible de las fábricas incluyen en algunas instancias el secado de bagazo. En algunos casos la obtención de subproductos requiere remover la médula del bagazo para la producción de pulpa, papel y aglomerados.

La cantidad de bagazo se determina en forma preliminar a partir del contenido de fibra de la caña que va a ser procesada. Casi la totalidad de la fibra termina en el bagazo, pero alguna logra introducirse en el jugo crudo que va hacia la fábrica y adicionalmente algo de bagacillo es requerido usualmente para utilizarse en los filtros rotativos al vacío. Ambas abandonan la fábrica en la cachaza.

“La cantidad de bagazo perdido en el jugo crudo y en los filtros depende de si se practica molienda o difusión. Considerando todos los aspectos que afectan la cantidad de bagazo disponible para la producción de vapor en base continua, la cantidad de bagazo disponible puede estar entre 22 y 36 t/100 t de caña, pero es más común un valor entre el rango de 25 a 30 t/100 t de caña”.⁵

El bagazo contiene la mayor parte del material fibroso de la caña alimentada al ingenio y en el momento de producirse tiene un contenido de humedad muy cercano a los 50 g de agua/100 g de bagazo.

“La materia seca se compone principalmente de los tres componentes de la fibra de caña que son celulosa, hemicelulosa y lignina, así como de una pequeña cantidad de ceniza y material soluble, principalmente sacarosa. El uso principal del bagazo es como combustible en las calderas”.⁶ Esto permite a los ingenios ser autosuficientes en términos de todas sus necesidades energéticas, lo que representa un gran beneficio a la economía del proceso del azúcar crudo.

2.1.3.1. Bagazo en Guatemala

La capacidad de producción de Residuo Agrícola de Cosecha (RAC) en Guatemala, está en función de cuánto RAC se pueda recolectar en el año. Hay aproximadamente 270,000 hectáreas de caña sembradas y se cosechan en una zafra, CENGICAÑA determinó que se generan en promedio 21 t/ha de residuos verdes (Pérez, 2012), esto da un potencial teórico de 5,6 millones de t/zafra, sin embargo, no todos los campos son mecanizables, asumiendo un 70 por ciento de mecanización se tiene un potencial disponible de 3,9 millones de t/zafra.

⁵ REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 766-768.

⁶ *Ibíd.* p. 824.

“En la recolección no se pueden levantar todos los residuos del campo, por lo tanto, se estima que hay una capacidad de recolección del 50 por ciento del potencial disponible, es decir, que hay un potencial real de 1,9 millones de t/zafra, si al potencial se le aplica una eficiencia de los equipos recolectores de 90%, se tiene entonces un potencial final de 1,7 millones de t/zafra”.⁷

Esta cantidad de RAC en contenido energético es equivalente a 3,1 millones de toneladas de bagazo / zafra (según relación 1:1,87, de la figura anterior). En la zafra 2016/2017, la agroindustria azucarera del país molió 24 millones de toneladas de caña con un 27 por ciento de bagazo, esto generó 6.4 millones de toneladas de bagazo, por lo tanto, el potencial final de 1,7 millones de t/zafra de RAC significaría 50 por ciento más de combustibles para la generación de energía.⁸

2.1.3.2. Tableros de bagazo

A través de los años se han realizado muchos intentos para elaborar productos conglomerados de diferentes clases utilizando bagazo como la materia prima principal. Se han construido una gran cantidad de plantas, pero pocas de ellas han resultado viables al considerar un tiempo grande de operación y muchas han sido las plantas que han tenido que parar operaciones. El bagazo entero puede ser utilizado en tableros de aislamiento, por otro lado, es necesario utilizar bagazo desmedulado para elaborar tableros de alta calidad.

El tablero más simple producido es el de aislamiento de baja densidad, que no está sujeto a prensado y es formado agregando un aglutinante al bagazo en el que se utilizaba un aglutinador de bajo costo, como asfalto o almidón y esto producía un tablero de baja densidad bastante suave utilizado como paneles de cielo (raso) falso.

⁷ CENGICAÑA. *Presentación de resultados de investigación, Zafra 2016 - 2017*. p. 458.

⁸ *Ibíd.*

Otros tipos de tablero de fibra pueden producirse en forma húmeda o seca y prensados para alcanzar una alta densidad y mayor resistencia. Estos son calentados durante el prensado y pueden contener algunos aditivos incorporados para mejorar su resistencia a la intemperie y a la abrasión.⁹

Los tableros de partículas se parecen a los producidos con virutas de madera y utilizan una resina junto al prensado y calentamiento para formar paneles utilizados para fabricar muebles o casas. Usualmente se requiere de secado del bagazo a un contenido bajo de humedad (< 4 g de agua / 100 g de bagazo) antes de la adición de la resina.

La resina utilizada es normalmente una resina urea-formaldehído o fenol-formaldehído y, con un 8-10 % de la masa del tablero, constituye una parte significativa del costo total de elaboración del tablero.

El bagazo es mezclado con el aglutinador y luego prensado y calentado en una prensa para curar la resina. Luego es enfriado, acabado y cortado a la medida.

En algunos casos la alfombra de bagazo se construye formando capas antes del prensado, con capas de partículas de bagazo finas en las partes exteriores para mejorar la textura de la superficie. Frecuentemente los bordes son tratados para proporcionar resistencia al tablero y evitar desmoronamiento de los bordes. Es posible obtener diferentes densidades para diversas aplicaciones.

⁹ REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 828.

Una ventaja de los tableros de bagazo es la versatilidad de ser un tablero liviano de baja densidad que a la vez posee suficiente resistencia. Se alcanzan densidades entre 250 a 1200 kg/m^3 .

La viabilidad del proceso está determinada en gran extensión por el costo del aglutinador utilizado junto con el del bagazo. Los materiales utilizados en la elaboración de tableros de bagazo han consistido, además de las resinas, en concreto, asfalto o alquitrán o brea.

Algunas de las razones para el fracaso comercial de las plantas de tableros de bagazo incluyen:¹⁰

- Mercadeo inadecuado. El tablero frecuentemente es producido en relativamente pequeñas cantidades y pareciera que los productores existentes tienen la capacidad de controlar el mercado, lo que dificulta el ingreso de nuevos productores.
- Arena en el tablero. Ésta viene con el bagazo y es difícil removerla. Trae como consecuencia un alto desgaste de las sierras por lo que eleva el costo de los productos elaborados a partir del mismo.
- Alto costo de la resina. Formas más efectivas y baratas de unir y pegar el bagazo harán de él una vía más rentable de subproducto.
- Fermentación de azúcares. El azúcar residual en bagazo puede ocasionar un crecimiento de hongos en el tablero. Esto puede resolverse utilizando fungicidas.

¹⁰ REIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 828.

2.2. Composición de la cachaza

“La cachaza es un residuo en forma de sedimento que resulta de la clarificación del jugo de caña en la fabricación del azúcar. Por cada tonelada de caña molida en la fábrica se producen alrededor de 30 kg de cachaza. Se estima que en cada zafra se producen más de 750 000 toneladas de cachaza. La cachaza tiene altos contenidos de Carbono orgánico, fósforo y calcio”.¹¹

Figura 9. Cachaza (base seca) en Guatemala

Análisis	Valor
Agua (%)	75
pH	5.8
N (%)	1.2
P ₂ O ₅ (%)	2.2
K ₂ O (%)	0.6
CaO (%)	1.0
MgO (%)	0.6
C (%)	40
Relación C/N	33

Fuente: CENGICAÑA. *Guía de buenas prácticas agrícolas en caña de azúcar*. p. 38.

Este subproducto de la producción azucarera contiene gran parte de materia orgánica coloidal dispersa en el jugo, que al alcalinizarse precipita con los aniones orgánicos en forma de sales de calcio, junto con otros materiales que son arrastrados en estos precipitados.

“El contenido de nutrientes de la cachaza, para distintos países, y que pueden ser asimilados por las plantas en su uso como fertilizantes, así como para la alimentación animal. La cachaza al degradarse microbiológicamente, varía en la concentración de nitrógeno”.¹²

¹¹ CENGICAÑA. *Guía de buenas prácticas agrícolas en caña de azúcar*. p. 38.

¹² MORALES, E. *Evaluación del efecto de la cachaza, nitrógeno y fósforo en caña de azúcar*. p. 12.

2.3. Formación de la cachaza

La formación de la cachaza incluye una gran cantidad de procesos físicos y mecánicos que deben ser coordinados para optimizar el proceso de la extracción del azúcar de la caña.

2.3.1. Preparación de caña

La preparación de la caña debe coordinarse desde la actividad del corte de la caña, hasta la obtención del RAC.

2.3.1.1. Patio de caña

La caña que llega del campo en contenedores remolcados por cabezales, se pesa primero con básculas electrónicas, con la finalidad de determinar las características de calidad tales como, su contenido de sacarosa, fibra y cantidad de impurezas. Luego se conduce al patio, donde se utiliza un sistema de grúas para disponer la caña directamente en las mesas de alimentación, esto para luego dirigirla al conductor donde se prepara la caña para la molienda.

2.3.1.2. Picadoras de caña

La caña es transportada por un sistema de conductores de tablillas, que la pone en contacto con las picadoras y la desfibradora, las cuales son rotores provistos de cuchillas colocados sobre el conductor, accionados por turbinas de vapor y/o motores eléctricos; que giran a una velocidad aproximada de 650 RPM por donde se hace pasar el colchón de caña; la caña se fracciona abriendo las celdas para facilitar la extracción del jugo que contiene la caña.

2.3.2. Extracción de jugo

La caña preparada por la desfibradora llega al tándem de molienda. Cada molino está conformado por mazas cilíndricas ranuradas entre las que se hace pasar el colchón de caña y mediante la aplicación de presión hidráulica sobre esas mazas, se extrae el jugo que se recolecta para el proceso posterior.

El jugo se recircula con la finalidad de aumentar la extracción de la sacarosa presente en el material fibroso que sale de cada unidad; a este proceso se le denomina maceración. El bagazo (fibra de caña molida) que sale del último molino se conduce hacia las calderas que se utiliza como combustible biomásico.

2.3.3. Preparación de jugo

El jugo que se extrae en el molino se llama jugo diluido o mixto y tiene un pH entre 5,4 – 5,5.

2.3.3.1. Sulfitación y alcalización

En hornos quemadores de azufre se produce dióxido de azufre (SO₂). Es utilizado para sulfitar el jugo en una torre de absorción en contracorriente para eliminar sustancias formadoras de color.

El producto se denomina jugo sulfitado, tiene un pH alrededor de 4,5 – 4,8. Al jugo sulfitado se le añade lechada de cal para neutralizar la acidez e iniciar los procesos de floculación que permiten la separación de los sólidos no azúcares que han entrado con la caña. Este jugo alcalizado tiene un pH entre 7,2 – 7,5.

2.3.3.2. Calentamiento y clarificación

El jugo alcalizado se calienta con vapor en intercambiadores de calor de tubo y coraza hasta una temperatura de 102-105 °C y se dispone en clarificadores, donde los sólidos no azúcares son floculados por la alcalización el calentamiento y la adición de polímeros. De la precipitación por gravedad se forma un lodo llamado cachaza, que se procesa en la filtración de cachaza. El jugo clarificado producido en los clarificadores se pasa por tamices finos para remover partículas e impurezas y se envía al proceso de evaporación.

El jugo alcalizado caliente se bombea al tanque flash y entra tangencialmente por la pared de dicho tanque, en el tanque flash además de liberar el vapor de agua, el jugo pierde velocidad (lo que va a favorecer la sedimentación de las impurezas insolubles).

Del tanque flash el jugo se alimenta por gravedad a los clarificadores. Los clarificadores son equipos para sedimentar los sólidos insolubles y separarlos de la fase líquida.

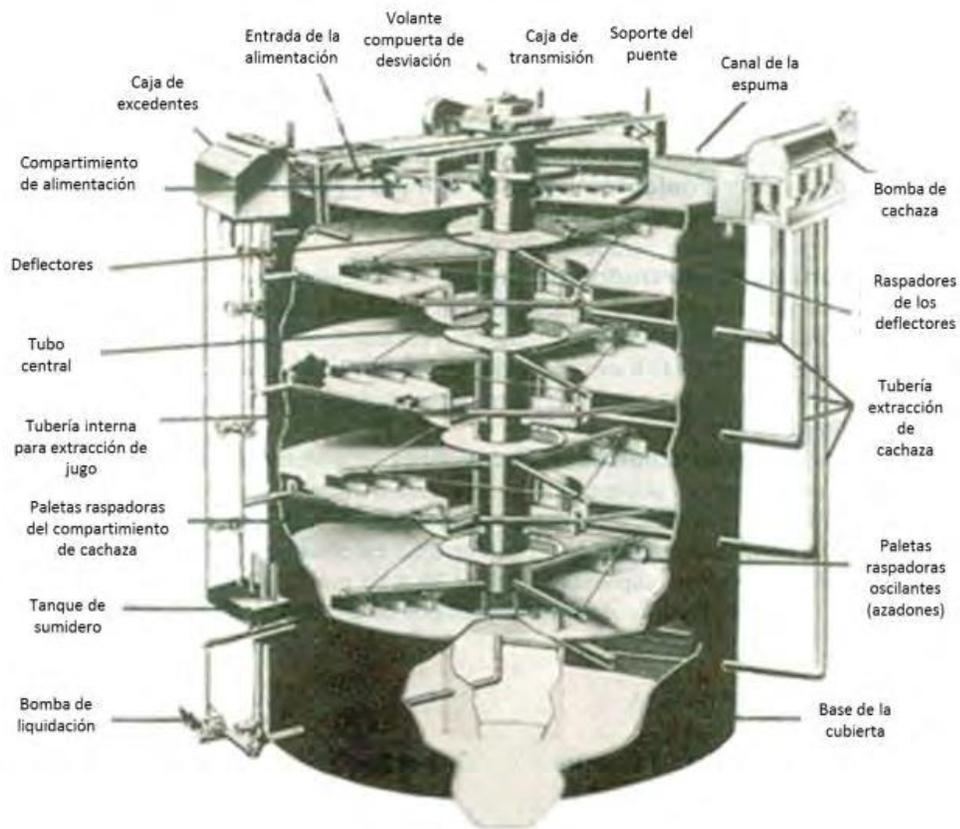
Los más usados en Guatemala son los de tipo Dorr - Oliver. Éstos poseen cuatro compartimientos independientes de fondos cónicos y cada uno con un cabezal para la decantación del jugo clarificado y juegos de bombas de diafragma para extraer los lodos sedimentados.

Durante el tiempo de retención en el clarificador, los precipitados de especies fosfatadas de calcio en formación se asocian con los sólidos en suspensión que trae el jugo (tierra, bagacillo, basura) y con las proteínas desnaturalizadas; esta asociación primaria forma partículas sólidas llamadas floc primario (proceso de floculación primaria). Las partículas de floc primario se asocian en conglomerados más grandes y compactos denominados coágulos (proceso de coagulación).¹³

¹³ CENGICAÑA. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. p. 338.

Paralelamente a la coagulación, las cadenas de floculante extendidas empiezan a asociarse con varias partículas de floc primario, generando agregados esponjosos (floculación secundaria), que a la vez se unen a los coágulos formados y en conjunto forman un lodo altamente denso y con alta velocidad de sedimentación, a este lodo se le denomina cachaza.

Figura 10. Diagrama de un clarificador tipo *Dorr - Oliver*



Fuente: CENGICAÑA. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. p. 339.

La cachaza sedimentada en el fondo de los compartimientos de los clarificadores es succionada por medio de bombas de diafragma, es descargada desde cada uno de los clarificadores a un tanque, que en los ingenios se conoce como tanque cachazón o simplemente cachazón.

En este punto la cachaza está lista para iniciar el proceso de manejo y agotamiento de su contenido de sacarosa, para su disposición final como subproducto.

La cachaza desalojada de los clarificadores aún tiene una cantidad considerable de jugo, éste debe eliminarse hasta que la cachaza como subproducto, contenga la menor cantidad posible de sacarosa.

“Dependiendo del sistema y equipos disponibles, ésta puede tener un pol menor a dos por ciento (2%)”.¹⁴ Los equipos que se usan para eliminar la sacarosa de la cachaza son los filtros rotativos continuos al vacío. A la cachaza se le adiciona bagacillo, cal y floculante (generalmente en el cachazón), para darle una consistencia que le permita ser cargada (adherida) a la superficie del tambor, que le permita engrosar la capa de cachaza adherida y que le confiera filtrabilidad a la misma.

A la torta de cachaza adherida al tambor se le aplica agua caliente por medio de boquillas que forman un chorro cónico, el agua lava la sacarosa de la torta. Los cabezales con vacío succionan el jugo y lo transfieren a los tanques de alto y bajo vacío, al jugo obtenido se le denomina jugo filtrado y se bombea al tanque de jugo alcalizado para reintegrarlo al proceso.

Los filtros descargan la torta final de cachaza agotada, que es conducida a una tolva elevada y desde ésta se carga a camiones de volteo, para disponer de la cachaza final como fertilizante en los campos de cultivo.

¹⁴ CENGICAÑA. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. p. 339.

2.3.4. Filtración de cachaza

Los lodos o cachaza contienen azúcar y para recuperarla se somete a un proceso de filtración. En este proceso se les agrega bagacillo, cal y floculante para aumentar la filtrabilidad y son bombeados hacia filtros donde se separan los sólidos (cachaza) del jugo resultante (filtrado).

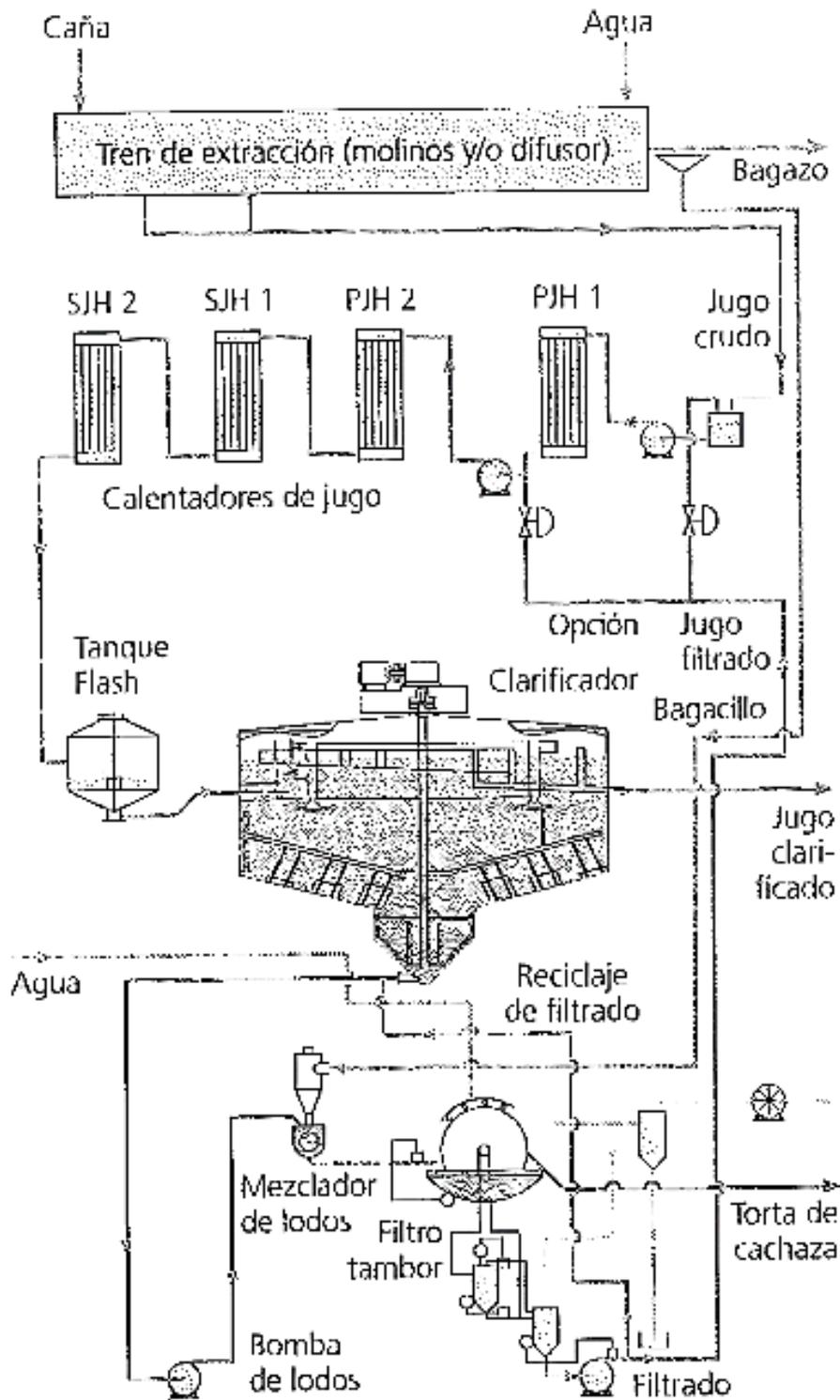
Se tienen instalados filtros rotatorios al vacío y filtro banda. En los filtros se aplica agua caliente con boquillas aspersoras para minimizar la cantidad de sacarosa residual en la cachaza. La materia sólida o torta del filtro se traslada con transportadores tipo gusanos sin fin y es recolectada en vagonetas. Es pesada y se dispone en el campo como estabilizador de suelos pobres en materia orgánica.

2.3.4.1. Manejo de lodos

El lodo primario debe ser transferido desde el clarificador hasta los filtros con mínima turbulencia para preservar la estructura de los flóculos. Esto se facilita usando gravedad para inducir el flujo de lodo primario y un buen control de nivel en la bola de los filtros, dado que ambos contribuyen a minimizar el reciclaje de lodo primario y aseguran que los flóculos del lodo sean entregados a los filtros en excelentes condiciones.

Es necesario que las tuberías de lodos sean tan cortas y directas como sea posible, con un descenso gradual, continuo y sin redondeos tipo U invertida.

Figura 11. Esquema típico para procesamiento del jugo



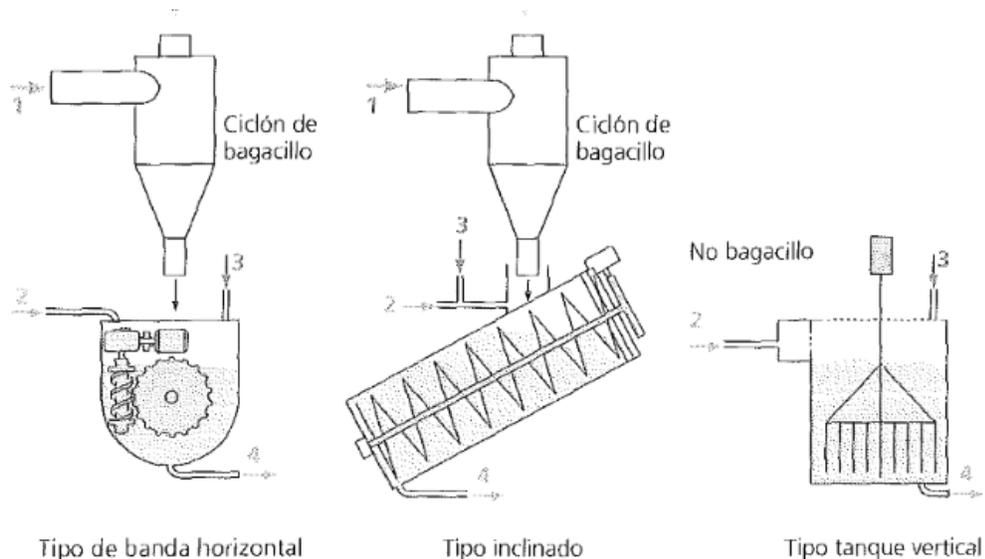
Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 287.

2.3.4.2. Mezclador de cachaza

Los mezcladores de cachaza o lodos tienen como función incorporar el bagacillo que es adicionado y acondicionar el lodo hasta una temperatura y un pH satisfactorios. En algunos casos se adiciona solución de floculante en el mezclador de cachaza, aunque es preferible adicionarle por separado usando pequeños mezcladores conectados individualmente a cada uno de los filtros.

En algunos casos se adicionan floculantes para mejorar la permeabilidad de la torta de cachaza. Adiciones de hasta 1mg/kg caña pueden ser utilizadas, para incrementar la tasa de remoción de lodos, durante periodos en los que se presente dificultades en la clarificación. Sin embargo, el pol en cachaza se puede incrementar, a menos de que se aplique agua de lavado adicional durante estos periodos.

Figura 12. Mezclador de cachaza

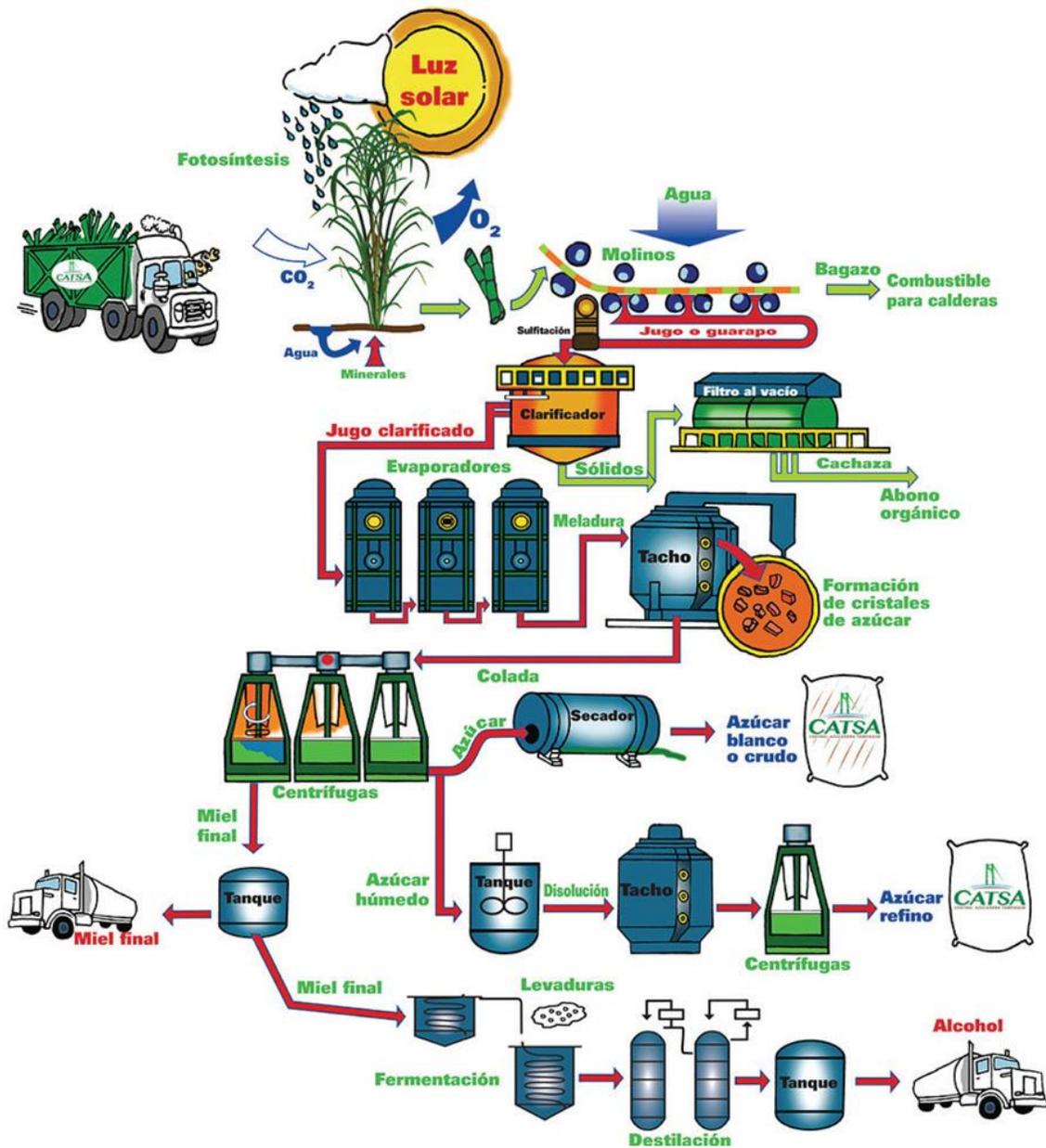


Ejemplos de configuraciones del mezclador de cachaza
1 Bagacillo de los molinos; 2 Lodos del clarificador; 3 Sacarato, floculante, reciclaje de filtrado; 4 Alimentación de filtros

Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 292.

En la siguiente figura se puede apreciar claramente que el bagazo y la cachaza se obtienen en las fases primarias del proceso de fabricación del azúcar.

Figura 13. Proceso de fabricación del azúcar



Fuente: CATSA. *Proceso de fabricación del azúcar*. <https://www.catsa.net/como-trabajamos/area-industrial/fabricacion-del-azucar/>. Consulta: 16 de abril de 2018.

2.3.5. Factores agroindustriales que afectan la composición

La composición de la cachaza varía de una fábrica a otra ya que está influida por los factores agroindustriales siguientes¹⁵:

- Tipo de cosecha: la cosecha de la caña de azúcar puede realizarse de forma mecanizada o por corte manual, además puede quemarse la caña antes del corte lo que aumenta el contenido de cenizas, materia orgánica y otros sedimentos que hacen variar la composición de la cachaza.
- Preparación de la caña: la preparación de la caña afecta en el contenido de tierra; algunos ingenios lavan la caña antes de entrar a los molinos, en Ingenio La Unión no se lava la caña antes de entrar a molienda.
- Temperatura del agua de imbibición: el agua utilizada en el proceso de extracción de sacarosa del bagazo generalmente se calienta y existe arrastre de materiales solubles y ceras con mayor facilidad a altas temperaturas.
- Factores climáticos: en períodos de lluvia es arrastrada una mayor cantidad de tierra, lo que aumenta la materia orgánica.

¹⁵ MORALES, E. *Evaluación del efecto de la cachaza, nitrógeno y fósforo en caña de azúcar*. p. 14.

3. ELEMENTOS RECICLABLES COMO CATALIZADORES Y OTROS DISPONIBLES EN EL MERCADO

3.1. Estearato de zinc

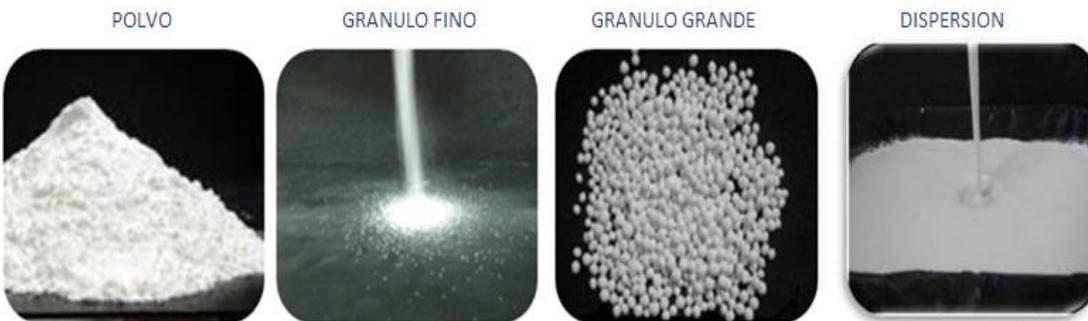
“Es un polvo blanco de la reacción de sales de zinc y un ácido graso $(C_{18}H_{35}O_2)_2Zn$. Es insoluble en disolventes polares como el alcohol y éter, pero soluble en los hidrocarburos aromáticos. Es el mejor agente desmoldante entre todos los estearatos (jabones) metálicos. No contiene electrolitos y tiene un efecto hidrofóbico”.¹⁶ Gracias a sus propiedades como estabilizador y lubricante es utilizado para la industria de plásticos, hule (caucho), pinturas y barnices.

- Entre sus principales aplicaciones se encuentran:
 - Estabilizador secundario para PVC
 - Lubricante para PS cristal Antiestático para poliestireno expandido.
 - Anti aglomerante para extruidos de hule.
 - Anti aglomerante para hojas de hule.
 - Antiestático para polímeros granulados.
 - Anti aglomerante para polvos diversos.
 - Desmoldante para PE, PP, PS, urea-formol, fenol-formol y poliéster.

¹⁶CORPORACIÓN SIERRA MADRE. <https://corpsierramadre.com/estearatos/estearato-de-zinc/>. Consulta: 16 de abril de 2018.

- En su forma granular tiene las siguientes ventajas:
 - Hace más fácil su manejo y reduce el desperdicio de material
 - Permite el cumplimiento de las normas de medio ambiente establecido por algunas empresas y países, debido a la eliminación de la contaminación por polvo.
 - Permite trabajar en un ambiente más limpio y reduce los riesgos de explosión causada por polvo.

Figura 14. **Presentaciones del estearato de zinc**



Fuente: Corporación sierra madre. *Estearato de zinc*.

<https://corpsierramadre.com/estearatos/estearato-de-zinc/>. Consulta: 16 de abril de 2018.

En su presentación en polvo blanco de tacto suave, con ligero olor característico a ácidos grasos. Es hidrofóbico (repele el agua), de forma comercial contiene aproximadamente un 2% de otros ácidos grasos de cadenas próximas (C_{16} y C_{18}). Es insoluble en alcohol, pero sí en benceno y en ácidos.

Producto estable en condiciones normales. No se polimeriza. Por aumento de la temperatura, o cuando se quema, se descompone en óxidos de carbono, vapores de ácido esteárico y óxidos de zinc, siendo estos últimos tóxicos que pueden causar la llamada fiebre de los metales.

El estearato de zinc reacciona fuertemente con los ácidos y con los álcalis fuertes, con desprendimiento de calor. No ataca a los metales.

3.1.1. Riesgos toxicológicos

- Inhalación: el estearato de zinc no es tóxico. Únicamente en altas concentraciones, puede provocar irritaciones pasajeras del tracto respiratorio, con aumento de la segregación de mucosidad en las vías respiratorias. Los síntomas son: tos, dolor de garganta y dificultad respiratoria.
- Piel: no es irritante para el tejido epitelial. Únicamente en casos de exposición muy prolongada puede presentarse algún foco localizado favorecido por la existencia de grietas o pequeñas heridas. Se manifiesta por enrojecimiento de la zona, sin ningún tipo de molestias.
- Ojos: puede causar irritación del globo ocular, pero sin causar lesiones permanentes o graves. Los síntomas son: picores, sensación de dolor y enrojecimiento.

Se debe considerar las siguientes medidas de prevención:

- Inhalación: usar sistemas de ventilación general o localizada, para controlar el desprendimiento de polvo y la formación de aerosoles en el aire, más por el riesgo de explosión que por el de intoxicación. Cuando se juzgue necesario, usar protección respiratoria con filtro mecánico.

- Piel: usar ropa de trabajo normal y guantes de PVC o cualquier tipo de plásticos, en caso necesario. No limpiar la ropa por aspiración, por poderse formar cargas electrostáticas.
- Ojos: usar gafas de protección completa del ojo contra el polvo. Combinarlas con la protección respiratoria en caso necesario.

En caso de aplicar primeros auxilios puede hacerse lo siguiente:

- Inhalación: retirar al afectado de la zona contaminada, llevar al aire limpio y requerir ayuda médica.
- Piel: -si es necesario, quitar la ropa y lavar la parte afectada con agua y jabón durante 5 minutos.
- Ojos: no frotarse los ojos, sino lavarlos con agua abundante durante 5 o 10 minutos, sobre todo por debajo de los párpados. Si la irritación persiste, ir a revisión médica.
- Ingestión: en caso de molestias abdominales, requerir auxilio médico.

El estearato de zinc es un producto combustible. El polvo finamente dividido puede formar mezclas explosivas con el aire, por eso se debe prevenir la dispersión del polvo y no utilizar cerca de llamas o chispas.

El polvo seco puede acumular cargas electrostáticas cuando es agitado, vertido, trasvasado neumáticamente, e incrementa el riesgo de explosión. Por ello toda la maquinaria que se use deberá estar conectada a tierra.

Con preferencia deberá ser de tipo estanco o dotada de sistemas de extracción para evitar la formación y dispersión del polvo. La instalación eléctrica y de iluminación será de tipo anti explosión. Se prohibirá fumar en las áreas de trabajo.

Como agentes extintores se debe usar polvo químico seco, anhídrido carbónico, espuma o agua pulverizada. Esta puede ser útil también para evitar la dispersión de polvo y de productos de descomposición térmica (óxidos de carbono, óxidos de zinc), que tienen riesgo de toxicidad.

Puede utilizarse cualquier tipo de recipientes, manteniéndolos cerrados para evitar la dispersión del polvo y con resistencia a choques y golpes por la misma razón. Los locales se mantendrán frescos y bien ventilados, y alejados de fuentes de ignición. No se almacenarán en el mismo local sustancias incompatibles (ácidos, oxidantes).

Las áreas de trabajo tendrán instalación eléctrica y de alumbrado de tipo anti explosión, y la estructura será resistente al fuego. Debiendo ser estrictamente prohibido fumar en el área de trabajo.

En caso de derrame del producto, recogerlo en recipientes adecuados, primero por medios mecánicos y solamente los residuos últimos se recogerán por aspiración, cuidando de que todas las partes del sistema de aspiración sean metálicas y estén conectadas a tierra, a efectos de disipar las posibles cargas electrostáticas. También pueden eliminarse los residuos lavando la zona con agua. El producto no se considera tóxico para el medio ambiente.

3.2. Yeso

Con la palabra yeso se designan en castellano varios productos diferentes. Por una parte la piedra natural, compuesta químicamente por sulfato cálcico cristalizado conjuntamente con agua, en la proporción de dos moléculas de agua por cada molécula de sulfato cálcico, o sea sulfato cálcico dihidrato o doble hidrato, que también se denomina aljez o piedra de yeso.

El producto en estado plástico formado por la mezcla del yeso y el agua se denomina pasta de yeso. Y si se le añade arena o carga, se llama mortero de yeso. Por último una vez endurecido el producto vuelve a transformarse en yeso, o sea en sulfato cálcico dihidrato. Algunos autores emplean el término rehidrato, para diferenciarlo del anterior, aunque la composición química es igual, la estructura física es más porosa.

3.2.1. Materias primas

La materia prima utilizada para la fabricación de los conglomerantes basados en el sulfato de calcio (yesos y escayolas), empleados en construcción, así como sus derivados y prefabricados (placas de yeso, paneles de paramento vertical), es casi exclusiva la roca llamada piedra de yeso o aljez.

El yeso, en su acepción de material natural, constituye una sustancia ampliamente repartida en la corteza terrestre y en la mayor parte de los casos, resulta de la precipitación de cristales de sulfato cálcico dihidratado a partir de soluciones concentradas o salmueras.

Como mineral, el yeso cristaliza en el sistema monoclinico y tanto la morfología como el tamaño de los cristales presentan una amplia variedad dependiendo de las condiciones y ambientes de formación.

El yeso aparece en muchas ocasiones como un material de alta pureza, sin mezcla de otras sustancias minerales, aunque con mucha frecuencia presenta intercalaciones de arcillas, carbonatos (en buena parte de los casos, dolomita), sílex y otros minerales evaporíticos tales como halita, sulfatos sódicos y, en especial, la forma no hidratada del sulfato cálcico, la anhidrita. La presencia, en mayor o menor proporción, de estas sustancias condiciona la calidad y métodos de laboreo de los yacimientos de yeso.

Es una roca blanca o incolora cuando no está contaminada por impurezas y en general, presenta colores claros. Debido a la presencia de impurezas puede presentar tonalidades grises, amarillentas, rojizas, azuladas, castaño, etc. El brillo es vítreo o sedoso.

Su estructura cristalina pertenece al sistema monoclinico en el que se alternan capas de sulfato cálcico y capas de agua, con 4 u 8 moléculas por estructura elemental. La red cristalina está formada por capas de átomos de calcio y grupo de iones sulfato (SO_4^{2-}), separados por capas de moléculas de agua. Esta ocupa una posición importante en la red y será necesario romperla para eliminar el agua.

El sulfato cálcico está formado por una alternancia de iones sulfato SO_4^{2-} , organizados en pirámides tetraédricas, alternadas con iones calcio Ca^{2+} formando un cristal iónico.

El agua se combina en una proporción del 20,92 % y alterna con las láminas de sulfato cálcico, uniéndose a través de puentes de hidrógeno de modo que enlaza un oxígeno de un ion sulfato de una capa con un oxígeno de un ion sulfato de la adyacente, estando además el oxígeno de la molécula de agua coordinado con un ion calcio.

El resultado es una estructura estable por debajo de 40 °C con una dureza superficial de 2 en la escala de MOHS (Se raya con la uña y solo tiene por debajo al talco) y su densidad varía entre 2,3 y 2,4 g/cm^3 .

La anhidrita natural ($CaSO_4$, 41,2% de CaO , 58,8% de SO_3) es una roca blanca o grisácea en la que apenas se reconoce la cristalización. Es ligeramente más pesada y más dura que el yeso. Su dureza oscila entre 3-3,5 en la escala de MOHS y su densidad es 2,89 – 2,98 kg/dm^3 . La anhidrita es poco soluble en el agua (2,7 g/dm^3 en agua fría). Es poco abundante y sus yacimientos suelen ser adyacentes a los del yeso. No toma agua de hidratación y por encima de los 40 °C presenta la menor solubilidad de todos los sulfatos cálcico (Dihidrato, hemihidrato y anhidro).

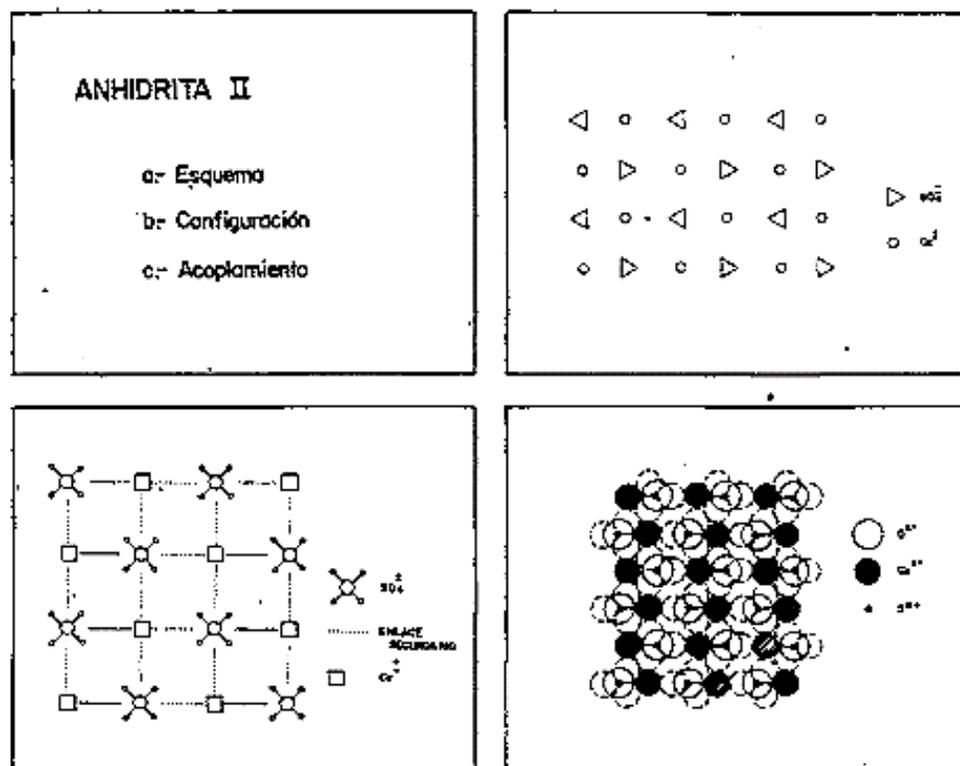
La red cristalina pertenece al sistema rómbico y la estructura elemental contiene 4 moléculas. La red es muy compacta, de mayor densidad que el yeso (2,96 g/cm^3) y de mayor estabilidad que ningún otro sulfato cálcico lo que explica, en parte, su débil reactividad. Además se obtienen grandes cantidades de yeso y anhidrita como subproducto de diversos procesos industriales.

El yeso es uno de los materiales de construcción más antiguos que se conocen debido a su abundancia en la naturaleza, manejabilidad y sus propiedades de habitabilidad.

Para seleccionar aquellos productos que puedan añadirse al yeso, con objeto de aumentar su fuerza de cohesión intercrystalina, o absorber las tensiones en forma de fibras, se ha utilizado la contribución de la ciencia de materiales, consistente en relacionar las propiedades externas del material con su estructura interna.

Las moléculas de sulfato cálcico y agua se encuentran unidas por enlaces secundarios de origen electroestático, debido al comportamiento dipolar de ambas moléculas. La relación entre las moléculas de sulfato cálcico y agua presenta diversas fases en función de la cantidad de molécula de agua en su estructura interna (dihidrato, semihidrato, anhidrita y otros).

Figura 15. Fase anhidrita natural



Fuente: GARCÍA, Alfonso. *Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos*. p. 71.

Por calentamiento a partir de 350°C y hasta 800°C, aumento de la energía interna es suficiente para asegurar ausencia total de moléculas de agua y permitir la movilidad de la totalidad de los dipolos existentes, que se reagrupan en una nueva organización estructural, apareciendo la fase denominada Anhidrita II.

Esta reacción es también reversible, pero la hidratación se produce de forma muy lenta, la nueva organización cristalina ortorrómbica que adapta es estable al producirse una reacción exotérmica, adoptando una configuración dipolar compacta, con ausencia de grandes espacios intermoleculares.

“De esta forma pasa de una organización laminar a una espacial. Esta relación produce estructuras cristalinas diferentes para cada fase, siendo más estable la correspondiente al dihidrato. Las fases presentan una solubilidad distinta, debido a la acción dipolar ejercida por las moléculas de agua, siendo similar en la anhidrita y el semihidrato e inferior en el dihidrato”.¹⁷

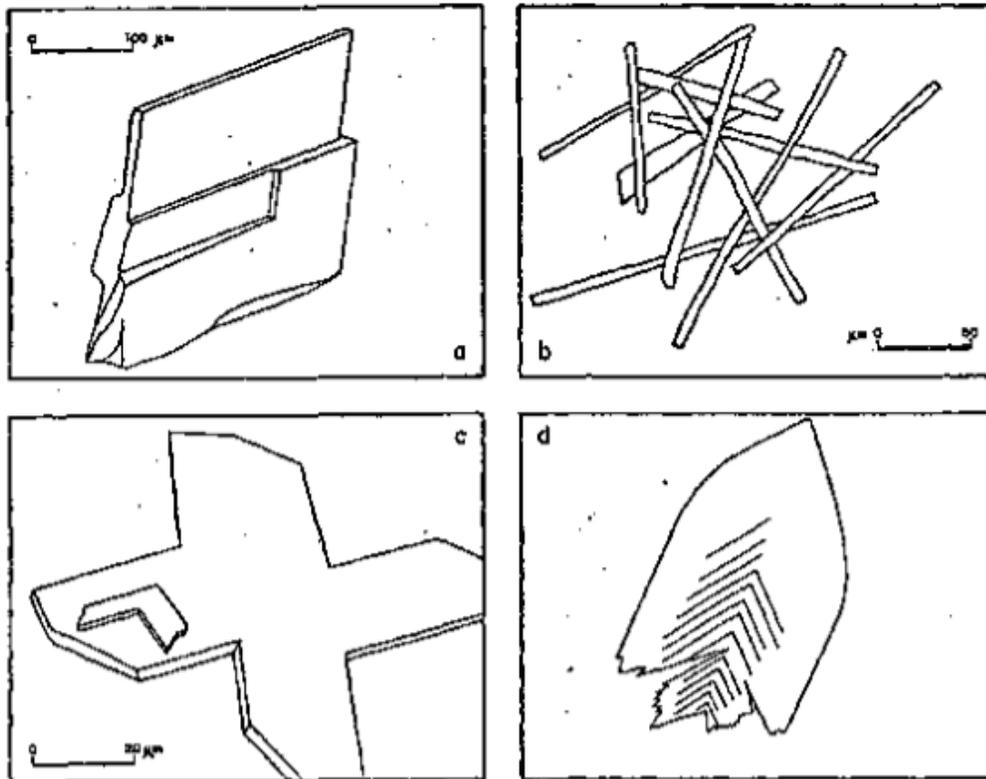
Dependiendo de la agregación iónica formada en la disolución, los cristales de dihidrato pueden presentar aspectos muy variados, trapezoidales, prismas alargados de tipo circular, maclas lisas, escalonadas, gemelares y otros. La resistencia mecánica del yeso es debida al entrecruzamiento de cristales y a la existencia de una película intercristalina en los puntos de contacto existentes entre las nucleaciones.

¹⁷ GARCÍA. Alfonso. *Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos*. p. 70.

3.2.2. Tipos de cristales en el yeso

Formalmente y dependiendo de la agregación iónica formada en la disolución, los cristales de dihidrato pueden presentar aspectos muy variadas; desde los cristales trapezoidales masivos de Hány, hasta las formas prismáticas alargadas de tipo circular, pasando por las mallas de Dejong y Bouman (cuyos cálculos cristalográficos fueron realizados por Simón y Bienfait), o por las maclas, lisas, escalonadas, o gemelares como es el caso de las de frac o de cola de golondrina.¹⁸

Figura 16. Tipos de cristales en el yeso



Fuente: GARCÍA, Alfonso. *Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos*. p. 80.

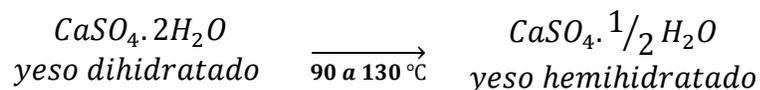
Partes: a) Cristales trapezoidales; b) Cristales circulares; c) Maclas; d) Cristales gemelares.

¹⁸ GARCÍA, Alfonso. *Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos*. p. 80.

Según los citados autores, con la formación de cristales gemelos el yeso adquiere una tercera simetría, alcanzando de este modo una configuración más estable. Consecuentemente la variedad gemelar del yeso tiene un contenido de energía libre más bajo que los demás. Por esta razón la presencia de cantidades mayores o menores de cristales de yeso gemelas puede explicar las diferentes temperaturas de calcinación aparente de algunos tipos de yeso.¹⁹

3.2.3. Transformación del yeso en un material aglomerante

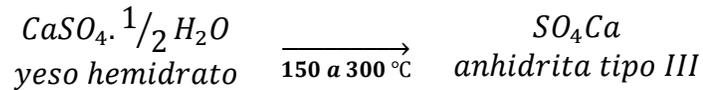
Todo lo que sigue en esta sección está explicado por Xavier Gironés, en su tesis doctoral “METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LA FABRICACIÓN DE ANHIDRITA EN HORNO ROTATIVO MEDIANTE ELEMENTOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL”. En la que afirma que el yeso en su estado natural se encuentra como un sulfato de calcio dihidratado, es decir, tiene dos moléculas de agua de hidratación. En el proceso de calcinación pierde parte de esa agua, dependiendo de la temperatura a que se someta. Idealmente se debe alcanzar la forma de hemidrato, en la que el yeso ha perdido molécula y media de agua.



A temperaturas mayores de 130° C el yeso puede continuar perdiendo agua, hasta llegar al estado de anhidrita.

Todas las formas de sulfato de calcio dihidratado son termodinámica y cristalográficamente equivalentes, dependiendo únicamente de su pureza. Su forma puede ser de agujas, de conchas o prismática.

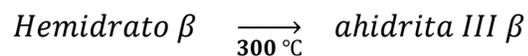
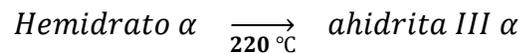
¹⁹ GARCÍA, Alfonso. *Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos*. p. 82.



Esta anhidrita producida a bajas temperaturas fragua rápidamente y reacciona ávidamente con agua o con la humedad del aire para formar nuevamente un hemidrato. Por esta razón se recomienda estabilizar el yeso en grandes silos, almacenándolo con una humedad relativa del 80% durante 12 horas. Esta anhidrita tipo III es soluble.

Las variedades alotrópicas más importantes, relacionadas con las propiedades de un hemidrato, son los tipos α y β . La producción de un yeso hemidratado del tipo α , se logra a presiones mayores de 1 atmósfera en autoclaves y en ambientes saturados de vapor de agua.

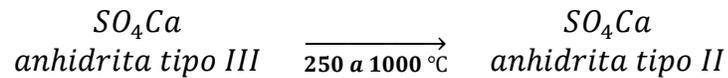
En el proceso de calcinación se puede producir:



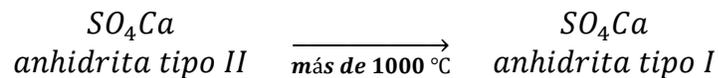
Generalmente el hemidrato beta se obtiene en horno rotatorio y el alfa en autoclaves. Dependiendo del proceso se pueden obtener los dos tipos en un horno rotatorio y se pueden separar por una extracción en lugares distintos o mezclados al final.

Industrialmente en los procesos de calcinación, se obtiene de los granos gruesos un yeso hemidrato que no alcanza a reaccionar, mientras que de las partículas finas se obtienen anhidritas que están directamente expuestas a las altas temperaturas de cocción.

El hemidrato α es muy compacto, resistente y de cristales grandes. El hemidrato β es más poroso, menos denso, ávido de agua, reacciona liberando gran calor y tiene un tiempo de fraguado de 4 o 5 minutos.



“Esta anhidrita tipo II, es relativamente inerte e insoluble. Su reactividad depende de la temperatura y el tiempo de calcinación relacionados con el tamaño de las partículas. La anhidrita tipo II se le conoce como un yeso cocido a muerte”.²⁰



La anhidrita tipo I producida a altas temperaturas contiene oxido de calcio libre, generado por la descomposición del sulfato de calcio. Esta anhidrita es soluble y puede fraguar incluso bajo el agua (tiene propiedades hidráulicas). Las anhidritas producen un conglomerante más denso y con mayor resistencia. Los yesos comerciales, contienen además del hemidrato, cantidades variables de anhidritas y de dihidratos. La presencia de uno u otro, afecta la calidad de los yesos producidos.

La variedad del tipo de yeso se puede determinar por análisis térmico diferencial. Cuando se utiliza yeso de roca como materia prima, se introduce al horno un material con un amplio rango granulométrico, que genera toda la gama de yesos descrita anteriormente.

²⁰ Producción de materiales para acabados en la construcción a partir de un yeso de alta calidad y pureza. http://www.ecoingenieria.org/docs/LOS_YESOS_2005.pdf. Consulta: 4 de abril de 2018.

Esto dificulta la estandarización de la calidad del producto final. Al utilizarse como materia prima sulfato de calcio de origen químico, se tiene un material de alta pureza y una distribución del tamaño de las partículas dentro de un rango más estrecho y permite un control del proceso más eficiente, para la obtención de un yeso de calidad uniforme.

La calcinación en hornos rotatorios confiere además una cocción más uniforme por el efecto de clasificación neumática de los gases de combustión, que arrastran las partículas más pequeñas disminuyendo su exposición excesiva al calor y evitando su deshidratación total. Debido a la ausencia de vapor de agua dentro del horno, la anhidrita tipo III que se forma, que es muy inestable, se transforma en un hemidrato beta con la humedad del aire.

La calidad y las propiedades de los yesos dependen de muchas variables. Las principales de ellas son:

- Pureza en la composición de la materia prima
- El grado de selección realizado a la materia prima
- El método empleado para la cocción
- La temperatura y el tiempo empleado para la cocción
- El grado de molienda
- La clasificación de los tipos de yeso y su mezcla
- El tipo de aditivos usado

De la combinación de estas variables, se pueden producir diversas clases de yesos, con propiedades diferentes, que le confieren a los productos aptitudes para diversas aplicaciones. Un yeso apropiado para la elaboración de estucos, debe tener las siguientes características:

- Entre un 50 y 70 % de hemidrato
- Entre el 50 y el 30 % de anhidrita tipo II
- Mínimas cantidades de dihidrato
- Ausencia total de anhidrita tipo III

Por razones técnicas y de la calidad de las materias primas y de los procesos de cocción, los yesos comerciales poseen proporciones elevadas de anhidrita del tipo III y de dihidratos que son indeseables. También la presencia de inertes finos puede favorecer el proceso de cristalización. Industrialmente se pueden elaborar mezclas de los diferentes tipos de yeso dependiendo de su uso específico, principalmente de hemidratos y anhidritas.

4. RESINAS POLIÉSTER

4.1. Termoplásticos

La gran variedad de materiales plásticos existentes así como su aplicación han cobrado una importancia tal en el uso diario ya sea industrial, doméstico o en objetos de uso personal, tanto en aplicaciones específicas como en sustitución de algunos materiales tradicionales, que consideramos difícil mantener el ritmo de vida actual sin el concurso de los materiales denominados genéricamente con el nombre de plásticos.

La clasificación de los plásticos se divide en dos grandes grupos; termoplásticos y termofijos.

Los materiales termoplásticos como el nombre indica, son aquellos que cambian su forma o estado físico por medio de calor y en algunos casos se requiere de presión para lograr este cambio, pudiendo volver a su estado original por medio de una nueva aplicación de calor (proceso reversible), en este grupo se encuentran entre otros los siguientes plásticos:

- Acrílicos
- Acrilo Nitrilo Butadieno Estireno (ABS)
- Acetato de Celulosa
- Policarbonatos
- Poliestireno
- Polipropileno
- Etil Celulosa
- Poliamidas (Nylon)
- Tereftalato de Polietileno (PET)

Los plásticos termofijos son aquellos que endurecen por medio del calor siendo necesario en algunos casos el empleo de presión para ser moldeados, pero a diferencia de los termoplásticos los termofijos no son regenerables por medio del calor (proceso irreversible). En este grupo los más conocidos son:

- Resina Epoxi
- Resinas Furánicas
- Resinas Fenólicas (Fenol-Formaldehido)
- Resinas de Melamina o Melamínicas (Melamina-Formaldehido)
- Poliuretanos
- Silicones
- Resinas Urea Formaldehido
- Resinas Ester Vinílico
- Poliésteres no saturados²¹

4.2. Plásticos reforzados

Con el nombre de plásticos reforzados se denominan aquellos materiales, termoplásticos o termofijos, en los que y durante el proceso de formación o moldeo se emplea algún producto vigorizante que mejora las características mecánicas del producto.

Este material reforzante, puede ser continuo o discontinuo y como ejemplo de los primeros se encuentran los materiales fibrosos como poliamidas (nylon), sisal, yute, hequén, rayón y otros, pero el más empleado es el refuerzo de fibra de vidrio.

En lo que se refiere a los materiales no fibrosos discontinuos se pueden mencionar las micro esferas de vidrio, mica cristales de sulfato de calcio entre otros. Estos materiales se emplean principalmente, para mejorar las características físicas de los termoplásticos y en algunos casos como cargas en los plásticos termofijos.

²¹ PARRILLA, Felipe. *Resinas poliéster, plásticos reforzados*. p.3.

Por definición química, un poliéster se forma al hacer reaccionar un ácido dicarboxílico y un alcohol polihídrico, a temperaturas superiores a 100 °C, obteniéndose un poliéster y agua como resultado de la reacción mencionada anteriormente. Las resinas poliéster se emplean en una amplia gama de aplicaciones y en distintas industrias como son el moldeo con materiales de refuerzo (plástico reforzado), encapsulado, recubrimientos protectores, artículos decorativos, botones y otros, siendo la industria del plástico reforzado la que tiene el mayor consumo de poliéster en todos los lugares en donde se produce este tipo de resinas.

La creciente demanda y aplicación de artículos de plástico reforzado se debe básicamente a las propiedades y características de este tipo de materiales entre las que podemos mencionar los siguientes:

- Facilidad en el manejo de los componentes
- Rápida cura y viabilidad de uso
- Excelentes propiedades físicas y mecánicas. Una lámina de plástico reforzado, con el equivalente a 3 espesores de una de acero, tiene la misma resistencia mecánica a la tensión y mayor módulo de elongación, pesando aproximadamente 60%.
- Resistencia a la corrosión y a gran cantidad de agentes químicos.
- Facilidad de acabado (coloreado, pintado, maquinado y otros).
- Excelente estabilidad dimensional en el producto final.
- Buenas propiedades dieléctricas.
- Facilidad de reparación. Las secciones dañadas pueden estar en funciones en corto tiempo empleando materiales y proceso adecuados, sin riesgos de seguridad en áreas restringidas.
- Fabricación o moldeo "*IN SITU*" sin necesidad de equipo incómodo o de difícil operación.²²

²² PARRILLA, Felipe. *Resinas poliéster, plásticos reforzados*. p.5.

4.3. Materiales reforzantes

Al realizar una analogía con el concreto armado, se hace una comparación de los materiales semejantes al hormigón armado, es decir, el cemento actúa como aglutinante en el concreto armado y la resina poliéster cumple con esta función en el plástico reforzado.

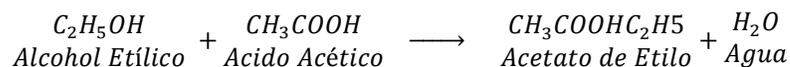
Tabla II. Comparación de materiales reforzantes

Concreto armado	Función	Plásticos reforzados
Cemento	Aglutinante	Resina poliéster o epoxi
Varilla/empalme	Mejorar resistencia mecánica	Material de refuerzo/traslape
Arena/grava	Mejorar propiedades mecánicas	Cargas
Agua	Lograr cristalización	Catalizador/acelerador-Monómero
Cimbra	Dar forma	Molde
Aceite o grasa	Facilitar separación	Desmoldante
Vibrado	Deaerar o compactar	Rolado
Fraguado	Endurecer y tomar forma	Curado
Descimbrado	Separar molde	Desmolde
Yeso	Base pintura	Gel Coat
Pintura	Embellecimientos	Acabado

Fuente: PARRILLA, Felipe. *Resinas poliéster, plásticos reforzados*. p. 6.

4.4. Proceso de fabricación

En química orgánica, al reaccionar un ácido y un alcohol se producen dos compuestos: agua y un éster. Esta reacción, llamada de esterificación, es básica en el proceso de fabricación de resinas de poliéster. Un ejemplo sencillo de esterificación es el siguiente:



A fin de obtener un buen rendimiento en la reacción química, es necesario que las moléculas de agua formadas sean extraídas del recipiente donde se efectúa la reacción, evitando en esta forma una transformación o reacción reversible conocida como hidrólisis. En el ejemplo anterior se forma un éster simple, las moléculas que originan el compuesto tienen un solo grupo reactivo o funcional.

Para la obtención de las resinas poliéster, se parte de ácidos y alcoholes poli funcionales y los compuestos formados con este tipo de materiales, se conocen con el nombre de polímero (Poli=muchos, Mer=unidades).

En la fabricación de resinas poliéster es necesario tener en consideración una gran cantidad de factores de acuerdo con el producto que se desea obtener. Las principales variables son:

- Tipo y cantidad de ácidos polihidroxílicos por emplear
- Tipo y cantidad de alcoholes necesarios
- Tipo y cantidad de monómero reactivo
- Sistema de inhibición²³

²³ PARRILLA, Felipe. *Resinas poliéster, plásticos reforzados*. p. 28.

4.4.1. Ácidos saturados

El anhídrido ftálico es el componente empleado con mayor frecuencia como ácido saturado en las resinas poliéster comerciales, los poliésteres así formados tienen una gran compatibilidad con el monómero de estireno. Las resinas fabricadas con ácido Isoftálico tienen una mayor resistencia química, dureza y resistencia al calor que aquellas obtenidas con anhídrido ftálico y las resinas tereftálicas tienen mayor punto o temperatura de ablandamiento.

4.4.2. Ácidos no saturados

Los ácidos no saturados empleados con mayor frecuencia en las resinas poliéster, son los isómeros conocidos como anhídrido maleico y ácido fumárico. Cuando en la fabricación de resinas poliéster, se emplea anhídrido maleico, éste se transforma en ácido fumárico al reaccionar con el glicol sin embargo éste cambio no es completo, por lo que existe diferencia en propiedades entre las resinas formuladas con anhídrido maleico y aquellos que se obtienen con ácido fumárico.

4.4.3. Alcoholes

El alcohol poli funcional, conocido también como glicol tienen una gran influencia en las propiedades de la resina poliéster en que se ha empleado, la flexibilidad, cristalinidad, resistencia al calor y agua, son propiedades afectadas por el glicol empleado en la formulación. Los alcoholes polihídricos usados con mayor frecuencia son el glicol propilénico, glicol dietilénico y dipropilénico. Los productos fabricados con estos materiales, tienen menor tendencia a cristalizar, que aquellos en los que interviene el glicol etilénico.

4.5. Formulación para propiedades especiales

La resina poliéster se refuerza (principalmente con fibra de vidrio), para obtener un laminado con muy buenas características mecánicas y resistencia a algunos productos o reactivos químicos. Sin embargo la creciente aplicación de plásticos reforzados en la industria, exige materiales con propiedades específicas, sin detrimento de las propiedades mecánicas.

4.5.1. Resistencia al fuego (retardantes)

Estrictamente hablando son muy pocos los materiales comerciales o de construcción que puedan llamarse resistentes al fuego, todos los materiales o productos empleados en forma industrial, sufren cambios o modificaciones cuando accidentalmente o por razones de uso son sometidos al fuego.

Esto es más patente, cuando se trata de metales, una sección de acero sobrecalentado, al volver a su condición inicial, ha perdido resistencia a la tensión y compresión. Casos semejantes ocurren con el concreto y otros materiales, de aquí la aseveración de que no existe ningún material industrial resistente al fuego.

En el caso de los plásticos reforzados, esta situación es más crítica, sin embargo se han desarrollado compuestos que imparten características de retardantes al fuego, es decir, con estos productos los artículos de plástico reforzado o resina poliéster se consumirán lentamente y al cesar el origen del fuego tendrán a apagarse en forma propia (resinas retardantes al fuego y auto extingüibles).

La propiedad de auto extingible y retardante al fuego se debe a que durante la combustión se origina gases y humos densos, que al desplazar el aire, no permite la presencia de oxígeno.

Este gas o humo es sumamente tóxico y contaminante, lo que ha disminuido la utilización de compuestos halogenados, empleando en su caso alumina trihidratada, que al someterse a temperatura libera vapor de agua que actúa en forma similar a la descrita anteriormente con una menor toxicidad y generación de humos.

Existen tres formas de lograr resinas con estas características y son las siguientes:

- Por formulación: en la formulación de resinas poliéster se emplean ácidos poli funcionales saturados y no saturados, como alcoholes polihídricos. Para imprimir propiedades de retardante al fuego y auto extingible, el ácido saturado se substituye por su derivado halogenado, es decir un compuesto Cloro o Bromoftálico. De estos dos derivados, se ha reportado que el compuesto con Bromo tiene más propiedades de retardante al fuego.

En cierto tipo de resinas se substituye el anhídrido ftálico por tetrahidroftalato de hexaclorometileno (ácido HET), con lo que se logran características notables. En otros casos el derivado halogenado se encuentra en el monómero reactivo, substituyendo a éste parcial o totalmente.

El Orto Cloro estireno imparte estas características y cuando substituye totalmente al estireno, mejora las propiedades mecánicas y de intemperismo aumentando además la reactividad de este tipo de resinas.

El dibromo-estireno imparte características semejantes y si se combina con Trióxido de Antimonio (5%), el producto obtenido mejora sus características de retardante al fuego.

- Adición de componentes líquidos: existen en el mercado una gran variedad de componentes líquidos, generalmente productos fosfohalogenados, que al agregarse a la resina poliéster en cantidades que fluctúan de 8 a 15% imparten al producto propiedades de retardante al fuego.

Estos compuestos tienen una gran compatibilidad con las resinas poliéster, pero usados en exceso tienden a plastificar la resina y producto terminado, lo que disminuye las propiedades mecánicas.

- Adición de compuestos en polvo: este tipo de productos se agregan a la resina como carga pero tienen el inconveniente de reducir la transmisión de la luz y resistencia al intemperismo de los artículos con ellos fabricados. Los compuestos de este tipo empleados con mayor frecuencia son: Trióxido de Antimonio, Hidrato de Aluminio, Borato de Zinc y Parafina Clorada conteniendo 70% de Cloro.

La parafina clorada y el trióxido de antimonio se emplean combinados en porcentajes de aproximadamente 10 a 15% en el total de la formulación base resina y las propiedades de retardantes al fuego son óptimas cuando el espesor mínimo del laminado es de 2,5 mm.²⁴

El uso excesivo de parafina clorada, tiende a plastificar el laminado, por lo que el porcentaje empleado debe ser relativamente bajo (4-8%). El Hidrato de Aluminio se emplea en porcentajes que varían de 20 a 40% en base resina y reportes acerca de este material indican que los artículos fabricados con este componente tienen una mayor resistencia al intemperismo y a la hidrólisis.

²⁴ PARRILLA, Felipe. *Resinas poliéster, plásticos reforzados*. p. 34.

“En algunos casos, la adición de 5 a 10% de Policloruro de Vinilo (P.V.C.) en polvo, imparte características de autoextinguible, pero pueden disminuirse propiedades mecánicas. El empleo de ciertas cargas, como el silicato de sodio, asbesto, caolín, carbonato de calcio y algunos pigmentos, imparten al laminado características de retardante al fuego”.²⁵

4.5.2. Resistencia al intemperismo

Aunque esta característica se requiere en ciertos usos de resina poliéster, es aconsejable que todos los productos de plástico reforzado posean esta propiedad. Con objeto de satisfacer esta necesidad, el monómero de estireno empleado, para ajustar la viscosidad de la resina, se substituye en forma parcial por monómero de Metil Metacrilato (MMM). Este producto, además de impartir resistencia al intemperismo, aumenta la translucidez del plástico reforzado, su índice de refracción es semejante al de la fibra de vidrio.

El amarillamiento producido por la exposición de la luz solar, se disminuye en forma notable mediante el empleo de absorbentes de rayos ultravioleta del tipo de las benzofenonas o benzotriazoles.

Otra forma de aumentar la resistencia al amarillamiento consiste en la adición de colorantes o pigmentos, resistentes a la luz solar, sin embargo, el procedimiento más recomendable para evitar este tipo de problemas, ocasionados por el intemperismo, consiste en colocar en la superficie o cara por exponer, un velo de fibra de vidrio. De esta manera se asegura el hecho de dejar una capa superficial con exceso de resina y además el velo impide que la fibra de vidrio del refuerzo, aflore en la superficie del producto terminado.

²⁵ PARRILLA, Felipe. *Resinas poliéster, plásticos reforzados*. p. 35.

4.5.3. Resistencia a temperatura

La creciente aplicación del plástico reforzado en tuberías, tanques y otros elementos plásticos, requiere de resinas poliéster con resistencia a temperaturas mayores de 150 °C sin pérdida de sus características mecánicas. Aunque existen resinas especializadas, una resina de uso general puede aumentar sus propiedades de resistencia a temperatura, empleando Cianurato de Trialilo como monómero de enlace.

4.5.4. Resistencia química

Indudablemente un gran campo de aplicación para los plásticos reforzados se encuentra en el terreno industrial, donde muchos objetos fabricados tradicionalmente con otros materiales, (acero al carbón, acero inoxidable y otros aceros), han sido substituidos, con grandes ventajas, por plástico reforzado, los artículos manufacturados con estos materiales, poseen resistencia a la corrosión, bajo peso específico, requieren poco mantenimiento.

“Las resinas poliéster de uso general, tienen buenas características de resistencia química a ciertos reactivos como ácido acético, alcohol etílico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico formaldehído en bajas concentraciones, sin embargo, esta gama de resistencia química es insuficiente en ciertos casos, por lo que se recurre a otros tipos de resinas poliéster como la isoftálica o bisfenólica”.²⁶

²⁶ PARRILLA, Felipe. *Resinas poliéster, plásticos reforzados*. p. 36.

4.6. Fibras de polímeros termoplásticos

Los polímeros termoplásticos presentan aumentos del peso molecular en relación con la complejidad de la cadena molecular y con incrementos de su longitud. La influencia de la fabricación en la variación de la longitud de las cadenas impide su selección.

Para facilitar la adherencia se prefiere aquellos polarmente más simples, como pueden ser los celulósicos, vinílicos y etilénicos. Todos ellos son fácilmente transformables en fibras, sin embargo los celulósicos presenta bajos valores de resistencia mecánica y los vinílicos presentan el inconveniente de reaccionar con los plastificantes, necesarios en el proceso de transformación; luego los idóneos son los etilénicos.

Estos presentan una buena resistencia química, siendo inalterables por la acción del agua, con la que van a estar en contacto continuo (en estado líquido o en vapor), desde el momento de su agregación al yeso. Presentan un buen aislamiento eléctrico, que nos indica su alto comportamiento polar, de naturaleza electrostática, al ser mal conductor. Mecánicamente poseen una buena mecanibilidad, para su transformación en fibras y buena resistencia a la rotura por fatiga.

“Como aspectos negativos se observa fragilidad a bajas temperaturas, y poca resistencia al envejecimiento por la acción de los rayos ultravioletas, lo que limita su utilización en ambientes con esas características. Dentro de los etilénicos, el propileno es el que presenta mayores valores de resistencia a menor costo”.²⁷

²⁷ GARCÍA, Alfonso. *Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos*. p. 181.

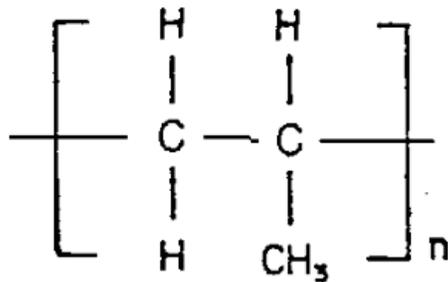
4.7. Polipropileno

El polipropileno es un polímero termoplástico de cadena lineal perteneciente al grupo etilénico, denominado también olefínico, de modo genérico este grupo está basado en la polimerización de la olefina ($CH_2 = CH_2$).

4.7.1. Estructura molecular

El polipropileno procede de la polimerización del monómero del propileno ($CH_2 = CH - CH_3$), formando cadenas lineales constituidas por una cantidad de monómeros que oscila entre los 10,000 y 20,000.

Figura 17. Estructura del propileno



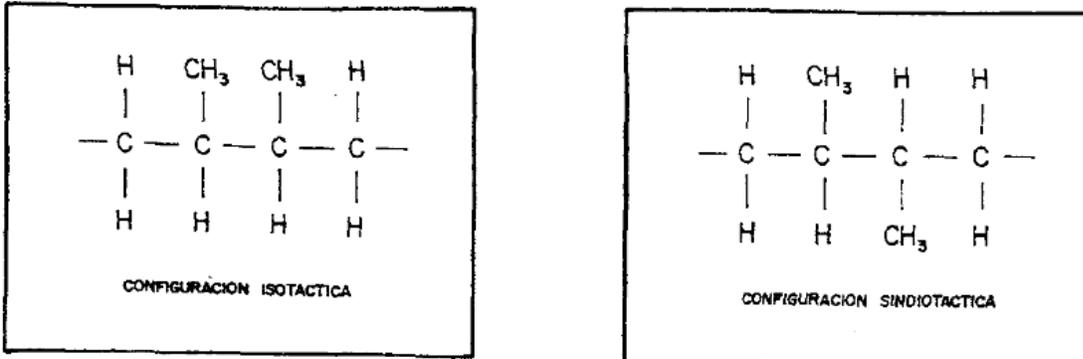
Fuente: GARCÍA, Alfonso. *Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos*. p. 186.

4.7.2. Macro estructura

Debido a las características no simétricas del monómero por la existencia de grupo metilo (CH_3), pueden presentarse diversas estructuras de la macromolécula, posibilitadas por la libertad angular de los enlaces entre carbonos, que serán responsables de las propiedades específicas de cada cadena molecular.

Figura 18.

Configuraciones del polipropileno



Fuente: GARCÍA, Alfonso. *Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos*. p. 187.

Estas configuraciones, por causa de la repulsión existente entre los grupos metilo, producen ordenaciones preferentes que influirán en el entrelazamiento de las cadenas. La configuración isotáctica produce, por repulsión electrostática, una organización helicoidal (con tres moléculas en cada paso), a lo largo de la cadena, u organizaciones curvadas de la molécula.

Esta configuración favorece la formación de zonas cristalinas que suponen el 60-70% del material, con pérdida de movilidad molecular al equilibrarse las fuerzas electrostáticas. Raramente las cadenas moleculares se integran en toda su longitud en una zona cristalizada; también participan de la formación de zonas amorfas, coexistiendo estructuras paracristalinas entre una masa de entrecruzamientos amorfas.

La pérdida de movilidad molecular confiere las características de resistencia y tenacidad, mientras que las zonas amorfas aportan las características termoplásticas y la tenacidad al conservar las moléculas cierta movilidad por no estar equilibrados sus grupos laterales.

4.7.3. Estructura paracristalina

Debido a la existencia de formaciones cristalinas, crece el punto de reblandecimiento, por lo que se puede trabajar con normalidad a temperaturas de 100 °C y disminuye la resistencia al impacto, dada la fragilidad que provoca la estructura cristalina. Esta resistencia depende de la orientación con que se aplique el impacto y de la axialidad molecular (los monofilamentos tienen orientación monoaxial y las láminas multiaxial).

La formación de zonas cristalinas depende del peso molecular y de la velocidad de enfriamiento. Cuanto mayor sea el peso molecular, más aumentarán las conexiones entre las zonas cristalizadas y las amorfas, produciéndose una mayor cohesión interna que facilita la redistribución interna de las tensiones, aumentando el comportamiento mecánico y la resistencia al impacto.

La velocidad de enfriamiento influye sobre el tamaño y el tipo de las zonas cristalizadas. A mayor velocidad de enfriamiento disminuirá el tamaño y la cantidad de zonas cristalizadas (con preferencia por las primarias, de forma helicoidal), empeorando el comportamiento mecánico. A menor velocidad de enfriamiento se facilita la formación de zonas cristalizadas, aumentando su tamaño y posibilitándose la aparición de cristalizaciones curvadas en forma de esfeoidizaciones, con mejora del comportamiento mecánico y térmico.

La configuración sindiotáctica favorece la linealidad de las cadenas moleculares por la alternancia de los grupos metilo, disminuyendo el enredamiento entre las cadenas y aumentando la cristalinidad de tipo unicelular. Ambos efectos disminuyen notablemente las resistencias mecánicas del polipropileno.

La configuración atáctica, al estar formada por una sucesión estéricamente desordenada, impide la capacidad de creación de zonas cristalinas y por tanto no se consiguen valores utilizables de resistencias mecánicas, usándose únicamente como adhesivo de alto punto de fusión, normalmente durante la fabricación del polipropileno se produce un 7% de configuración atáctica, que coexiste con las configuraciones anteriores.

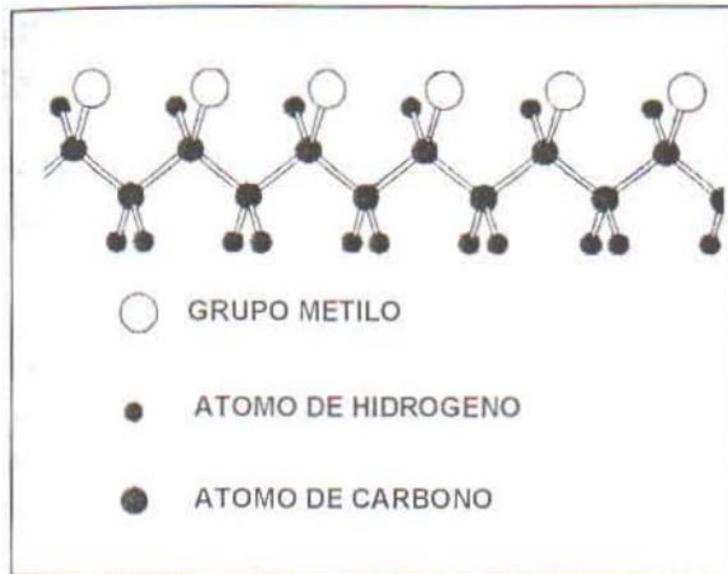
4.7.4. Estructura química

En toda polimerización se obtiene una mezcla de ellos y se busca alcanzar los mayores porcentajes del tipo Isotáctico, que es la estructura obtenida en el nuevo sistema de polimerización gaseosa (esferipol).

La estereo-regularidad en las cadenas lineales, depende del orden en que estén colocados los grupos metilos laterales, así como del catalizador y proceso de polimerización usado, originando tres tipos de acomodo en la estructura molecular. Esta estereo-regularidad se denomina Tacticidad y se clasifica en:

- **Isotácticos:** se caracteriza por una posición estereoquímica de los radicales de metilo a lo largo de la cadena, que permite cristalizar. Esto se refleja principalmente en valores altos de propiedades mecánicas y térmicas. La cadena molecular no puede cristalizar en forma plana como el polietileno, sus cadenas toman una forma helicoidal con tres moléculas en cada vuelta.

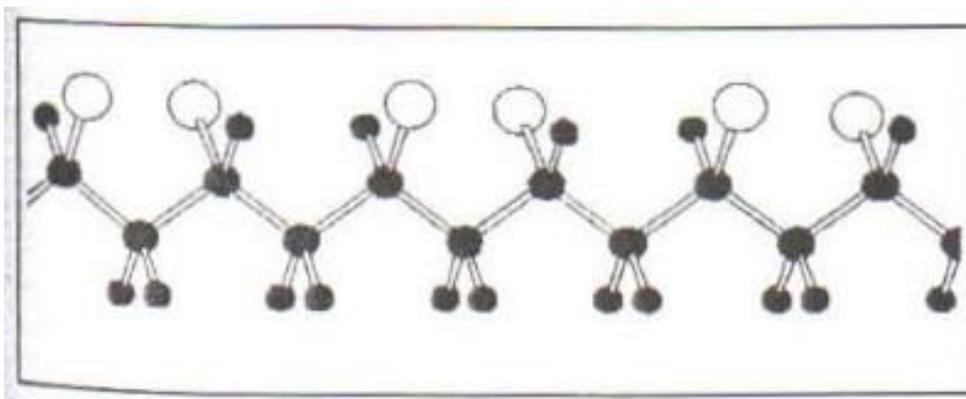
Figura 19. **Estructura isotáctica**



Fuente: Enciclopedia del plástico. *El mundo de los plásticos*. Capítulo IV. p. 5.

- Sindiotáticos: en esta estructura los radicales metilos, están alternados a lo largo de la cadena de manera ordenada estereoquímicamente.

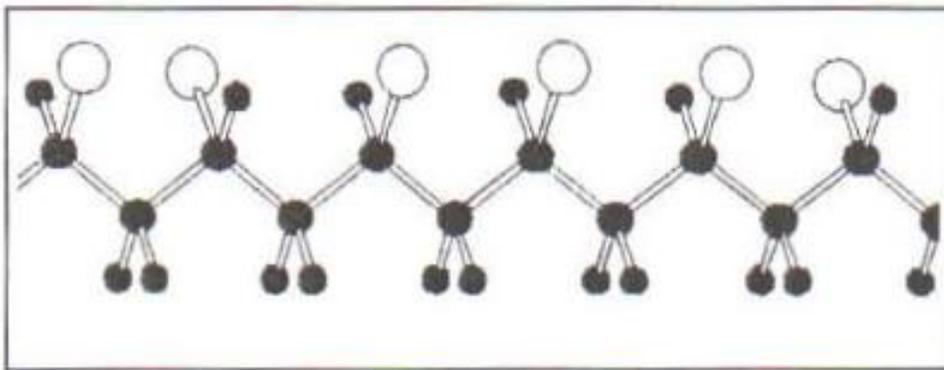
Figura 20. **Estructura sindiotáctica**



Fuente: Enciclopedia del plástico. *El mundo de los plásticos*. Capítulo IV. p. 5.

- Atácticos: en el polipropileno atáctico, los radicales metilos se encuentran al azar en la cadena. El polipropileno atáctico apenas tiende a cristalizar, dado que carece de ordenamiento espacial. Por consiguiente, su densidad y resistencia mecánica son menores al isotáctico, así como las temperaturas de reblandecimiento y fusión.

Figura 21. **Estructura atáctica**



Fuente: Enciclopedia del plástico. *El mundo de los plásticos*. Capítulo IV. p. 5.

4.8. **Propiedades del polipropileno**

El polipropileno tiene propiedades que le permiten comportarse muy bien ante esfuerzos de tensión y tener buena resistencia a la corrosión.

4.8.1. **Propiedades físicas**

- Densidad: Es útil para determinar la cantidad de materia prima que se va a utilizar en la fabricación de un artículo determinado. El polipropileno, en comparación con polietileno, tiene una densidad más baja, permitiendo que su rendimiento en producción sea mayor. Su rango de densidad es de 0,89 a 0,91 g/cm^3 .

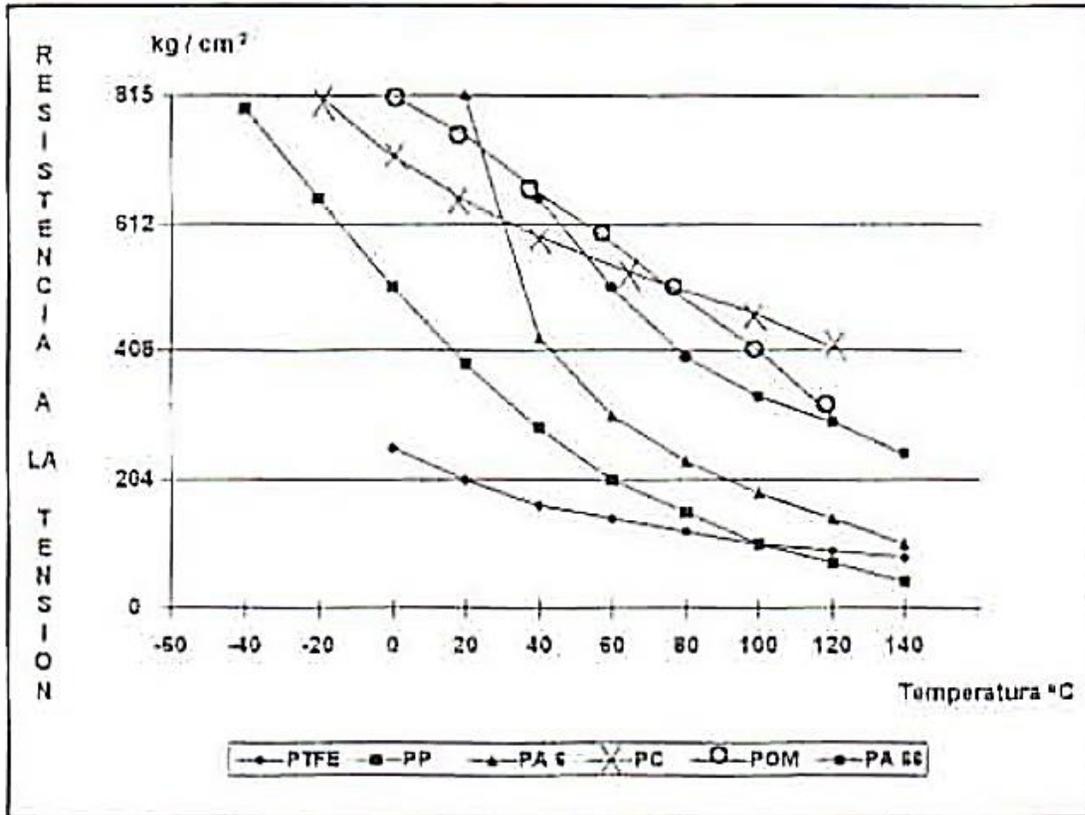
- Absorción de agua: el polipropileno, es un material que no absorbe humedad y evita su secado previo para procesarlo, manteniendo una buena estabilidad dimensional, incluso en ambientes altamente húmedos.
- Contracción de moldeo: la contracción del PP en el molde, es menor que la que sufre el PE, depende fundamentalmente de la temperatura del molde, temperatura de fundido y tiempo de sostenimiento. El rango de contracción del moldeo, para PP es de 1 a 2% y debe tomarse en cuenta durante el diseño del molde.
- Índice de fluidez: Determina la elección del grado del material de acuerdo al proceso de transformación que se va a utilizar, también es una medida indirecta del peso molecular del material. A medida que es menor este valor, el peso molecular es mayor y la rigidez de la pieza es elevada. Por el contrario, cuando el índice de fluidez es elevado, el peso molecular es menor, la rigidez disminuye, el brillo aumenta y se facilita la inyección en piezas de diseños complicados.

4.8.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del PP están en función del peso molecular y del grado de cristalinidad.

- Resistencia a la tensión: la resistencia a la tensión del PP tiene un valor medio en comparación con los demás termoplásticos, la ventaja es que su resistencia se incrementa considerablemente durante el proceso de fabricación de películas, rafia y cuerdas.

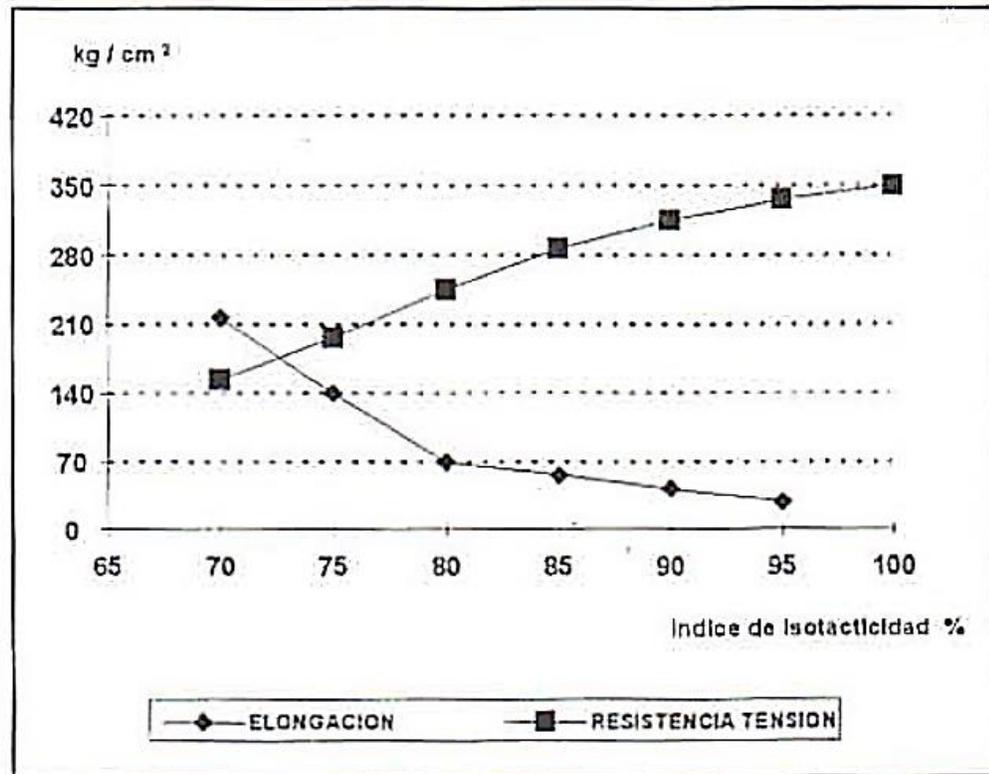
Figura 22. Comparación PP modificado vs plásticos de ingeniería



Fuente: Enciclopedia del plástico. *El mundo de los plásticos*. Capítulo IV. p. 10.

Del análisis de la gráfica, resalta como la forma de la curva de PP modificado se asemeja a la del nylon 6/6. Sin embargo, la poliamida tiene mayores propiedades de esfuerzo a la tensión a mayor temperatura, debido a que es un plástico de ingeniería. De la isotacticidad del PP, dependen las propiedades de tensión del material.

Figura 23. Isotacticidad en las propiedades de tensión

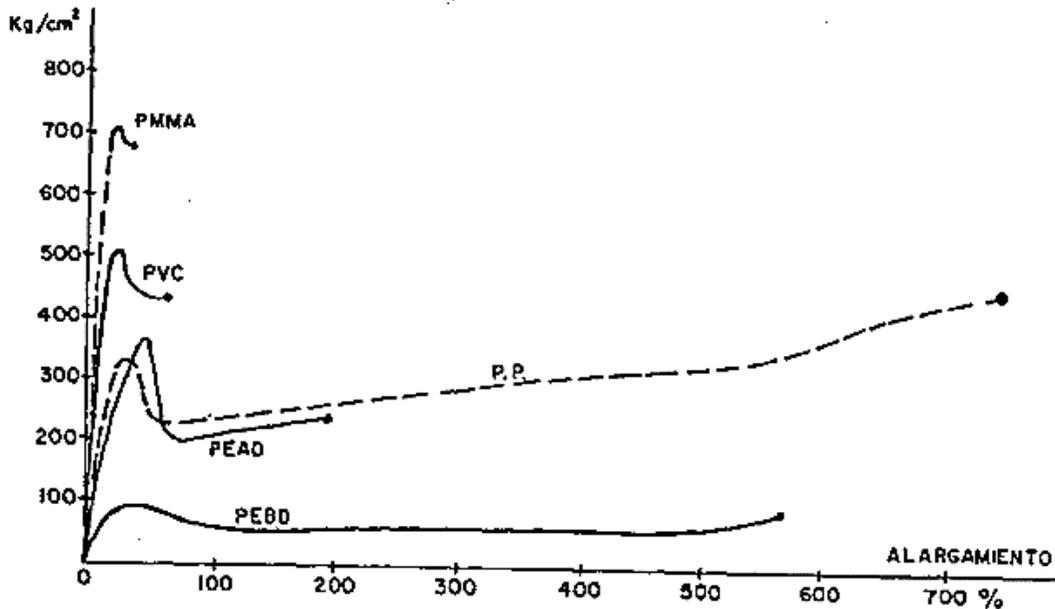


Fuente: Enciclopedia del plástico. *El mundo de los plásticos*. Capítulo IV. p. 10.

Dentro de los tipos comerciales, a medida que aumenta la cantidad de material isotáctico, aumenta la cristalinidad, el punto de reblandecimiento, la rigidez, resistencia a la tracción, módulo de tensión y dureza, a pesar de que siempre existe polímero atáctico, como subproducto que no se logra separar y se encuentra presente por debajo del 5%. Se ha comprobado que un polímero totalmente isotáctico, tampoco sería conveniente para las aplicaciones donde se requiere resistencia al impacto o cierta elongación.

- Elongación: el PP tiene un excelente rango de elongación, fluctúa entre 400 y 430% utilizando cargas de 300 a 400 kg/cm^2 , lo que justifica el amplio uso de este material en la fabricación de películas y que hace posible su estiramiento en dirección máquina (MD) y transversal (TD).

Figura 24. **Elongación de PP vs comodities**



Fuente: Materiales poliméricos y compuestos. *Polipropileno*. p. 24.

- Resistencia al impacto: la resistencia al impacto del PP, es de $6,8$ a $8,16 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}$, y por esta propiedad se emplea para fabricar carcasas de electrodomésticos, gabinetes, portafolios, aspas para lavadoras y botellas.
- Resistencia a la flexión: el PP es un material semi-rígido, su resistencia es de $600 \text{ kg}/\text{cm}^2$, se utiliza en la fabricación de carcasas de aparatos, cajas y contenedores de alimentos.
- Módulo de flexión: es una medida de la rigidez del material. La presencia de los grupos metílicos en el PP, proporcionan una mayor rigidez con respecto al PE, incluso por encima de los $100 \text{ }^\circ\text{C}$, se utiliza en la manufactura de popotes, cerdas para escoba y tapas con bisagra integrada.

- Resistencia a la compresión: esta propiedad indica la carga que soporta un plástico antes de deformarse. El PP presenta un valor de 500 kg/cm^2 , se utiliza en la inyección de sillas y soportes para muebles.

4.8.3. Propiedades térmicas

- Temperatura de reblandecimiento Vicat: El PP presenta resistencia a la temperatura por períodos cortos sin deformarse en temperaturas arriba de $140 \text{ }^\circ\text{C}$, puede ser esterilizado con rayos gamma y óxido de etileno. Por otro lado, en el proceso de metalizado se manejan elevadas temperaturas que el material soporta sin deformarse. La temperatura de reblandecimiento del PE de baja densidad es $86 \text{ }^\circ\text{C}$, del PE de alta densidad $127 \text{ }^\circ\text{C}$ y PP $140 \text{ }^\circ\text{C}$; debido a su resistencia se utiliza para envasar mermeladas.
- Temperatura de deformación bajo carga: este material a $110 \text{ }^\circ\text{C}$ soporta $4,5 \text{ kg/cm}^2$, es utilizado en la fabricación de piezas mecánicas como engranes, cafeteras eléctricas y freidoras. Con una temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$ soporta una carga de $18,5 \text{ kg/cm}^2$, pero si se refuerza con cargas como fibra de vidrio, talco o carbonato de calcio, la temperatura aumenta hasta $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Se emplea para fabricar tableros automotrices, parrillas para auto y piezas mecánicas.
- Conductividad térmica: el PP presenta un valor muy pequeño de conductividad, el calor que absorbe lo transmite lentamente; esto se refleja en ciclos más largos de enfriamiento durante su transformación.

- Resistencia al calor continuo: es la capacidad que presentan los plásticos para soportar elevadas temperaturas libres de esfuerzos mecánicos. De los plásticos commodities y el ABS, el PP es el material que más resistencia posee, se utiliza en la inyección de acumuladores para automóvil.
- Calor específico: es la cantidad de calor que se necesita para elevar un grado centígrado, la temperatura de un material por unidad de peso. El PP presenta un valor elevado de calor específico, consumiendo más energía para su transformación y enfriamiento.

4.8.4. Propiedades ópticas

El polipropileno por naturaleza es traslúcido y su transmitancia es de 70 a 75%. A pesar del valor bajo, las piezas moldeadas en este material sin pigmentar presentan mayor transparencia que las fabricadas a base de polietileno de alta densidad. Eso se debe a que existe menor densidad en las zonas amorfas y cristalinas del PP, cuya densidad es de $0,85 \text{ g/cm}^3$ y para el PE es de $0,94 \text{ g/cm}^3$.

A pesar de poseer una transmitancia pobre, ésta pasa a valores de 90 – 92% en el caso de película cuando se biorienta y de 87 a 90% en recipientes soplados cuando se emplean agentes clarificantes.

4.8.5. Propiedades eléctricas

La constante dieléctrica es la capacidad de los materiales plásticos para almacenar la energía dentro de ellos. El polipropileno es un material que casi no acumula energía, puede ser utilizado en circuitos eléctricos y electrónicos.

Sin embargo, al compararlo con el polietileno, el PP presenta la desventaja de que químicamente, el cobre y otros metales catalizan la descomposición, que resulta más fácil en los carbono terciarios. También se vuelve frágil a temperaturas de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 25. **Propiedades de PE vs PP**

PROPIEDADES	UNIDADES	PEBD	PEAD	PP
Densidad	g/cm^3	0.92 - 0.93	0.94 - 0.96	0.90 - 0.91
Cristalinidad	%	60 - 65	80 - 90	60 - 80
Resistencia a la Tensión	kg/cm^2	100 - 170	210 - 380	300 - 400
Elongación	%	500 - 725	100 - 200	500 - 700
Módulo Elástico	$1 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$	1.2 - 2.6	5.6 - 10	11 - 18
Resistencia a la Flexión	$1 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$	---	1.0 - 1.2	---
Dureza (shore)		40 - 45 D	60 - 70 D	85 - 95 R
Conductividad Térmica	$1 \times 10^4 \text{ Cal cm/seg cm}^2$	8	11 - 12.5	3.3
Temp. Reblandecimiento (Vicat)	$^{\circ}\text{C}$	80 - 90	120 - 130	140 - 160
Temp. Fusión	$^{\circ}\text{C}$	110 - 115	130 - 140	170 - 175
Temp. de Procesamiento	$^{\circ}\text{C}$			
Moldeo por Inyección		190 - 240	220 - 280	230 - 290
Extrusión		150 - 160	170 - 220	200 - 230
Contracción de Moldeo	%	1 - 2	1 - 3	1.8

Fuente: Enciclopedia del plástico. *El mundo de los plásticos*. Capítulo IV. p. 12.

Debido a que en algunas propiedades el polietileno y polipropileno se asemejan, se pueden emplear indistintamente en algunos artículos. Pero se utiliza PP cuando se requiere cierta resistencia a la temperatura, por ejemplo, para fabricar lavavajillas que estarán en contacto con agua hirviendo.

4.8.6. Propiedades químicas

Presenta excelente resistencia a los ácidos y bases fuertes o débiles; sólo lo ataca el ácido nítrico concentrado por arriba de los 80 °C. Pocos solventes orgánicos pueden disolverlo a temperatura ambiente. A continuación, se muestran algunos productos químicos y el cambio que ocasionan en el material.

Figura 26. Cambios del PP con productos químicos

PRODUCTO QUIMICO	CAMBIO
Acetona	No
Acido Acético (5%)	Ligera Decoloración
Acido Fosfórico (conc.)	No
Acido Sulfúrico (30%)	No
Cloruro Férrico (10%)	No
Etanol	No
Formaldehído	Ligero Amarillamiento
Gasolina	Hinchamiento
Hidróxido de Sodio (10%)	No
Tolueno	Ligera Decoloración

Fuente: Enciclopedia del plástico. *El mundo de los plásticos*. Capítulo IV. p. 13.

Cuando en condiciones de trabajo se tienen temperaturas altas en presencia de sustancias químicas corrosivas, se utiliza como polímero PP, en lugar del PE, el primero no sufre fisuración bajo la acción de estos agentes. El polipropileno, al igual que los demás polímeros, necesita de aditivos para incrementar la facilidad de procesamiento y mejorar sus propiedades obteniendo nuevas aplicaciones. Los aditivos que se utilizan para el polipropileno se describen de la siguiente manera:

- Lubricantes: “tienen como función disminuir el esfuerzo del husillo para transportar y comprimir los pellets, así como minimizar la fricción de la masa fundida con la maquinaria. El tipo de lubricante empleado por el PP es el interno-externo como el estearato de zinc, ya que lubrica a nivel molecular y superficial”.²⁸ Se aplica en cantidades de 0,25 a 1,00%.
- Absorbedores de luz ultravioleta: “evitan la degradación de los plásticos causada por la radiación ultravioleta proveniente de la luz solar. Los que se utilizan para polipropileno son los fosfitos, fosfatos y benzotriazoles en una cantidad de 0,05 – 0,3%. En ciertos casos se adiciona negro de humo (un 2%) que filtra los rayos ultravioleta y evita la fotooxidación”.²⁹
- Antioxidantes: su función es inhibir o retardar al mecanismo de oxidación-degradación, provocado por las altas temperaturas de procesamiento que van desde los 200 a 280 °C, proporcionando estabilidad al polímero que depende del grado de material.

Actualmente se formulan grados especiales porque están estabilizados y retardan la oxidación del polímero. También es frecuente la adición de antioxidantes (fenoles sustituidos y aminas aromáticas) que reducen la oxidación por el calor. Algunos antioxidantes que se utilizan para polipropileno son:

²⁸ Enciclopedia del plástico. *El mundo de los plásticos*. Capítulo IV. p. 13.

²⁹ Materiales poliméricos y compuestos. *Polipropileno*. p. 25.

Figura 27. **Antioxidantes para polipropileno**

ANTIOXIDANTE	% A UTILIZAR
BHT (2, 6-terbutil-para-cresol)	0,05 - 0,25
DLTDP (Dilauril triodipropianato)	0,02 - 0,1
DSTDP (Diestearil triodipropianato)	0,02 - 0,1

Fuente: Enciclopedia del plástico. *El mundo de los plásticos*. Capítulo IV. p. 14.

Las características de comportamiento del polipropileno, después de degradarse son:

- Aumenta la rigidez
 - Se decolora
 - Disminuye su elongación y resistencia a la tensión, al igual que su resistencia al impacto y a la flexión.
-
- Retardantes a la flama: inhiben las características de flamabilidad de los plásticos. En polipropileno, los compuestos bromados son los más utilizados en porcentajes de 3 a 15%. Sus principales características son:
 - Liberan bromo gaseoso
 - Poseen alta retardancia a la flama
 - Variedad de grados de acuerdo a la temperatura de procesamiento.
 - Gases altamente tóxicos.
 - Baja estabilidad a la luz.

- Modificadores de impacto: aumentan la resistencia al impacto del polímero, proporcionan características de elasticidad, absorbiendo los golpes que recibe el producto. El polipropileno utiliza como modificador el hule EPDM con un porcentaje de 5 a 15%.

5. HABITABILIDAD EN LAS VIVIENDAS

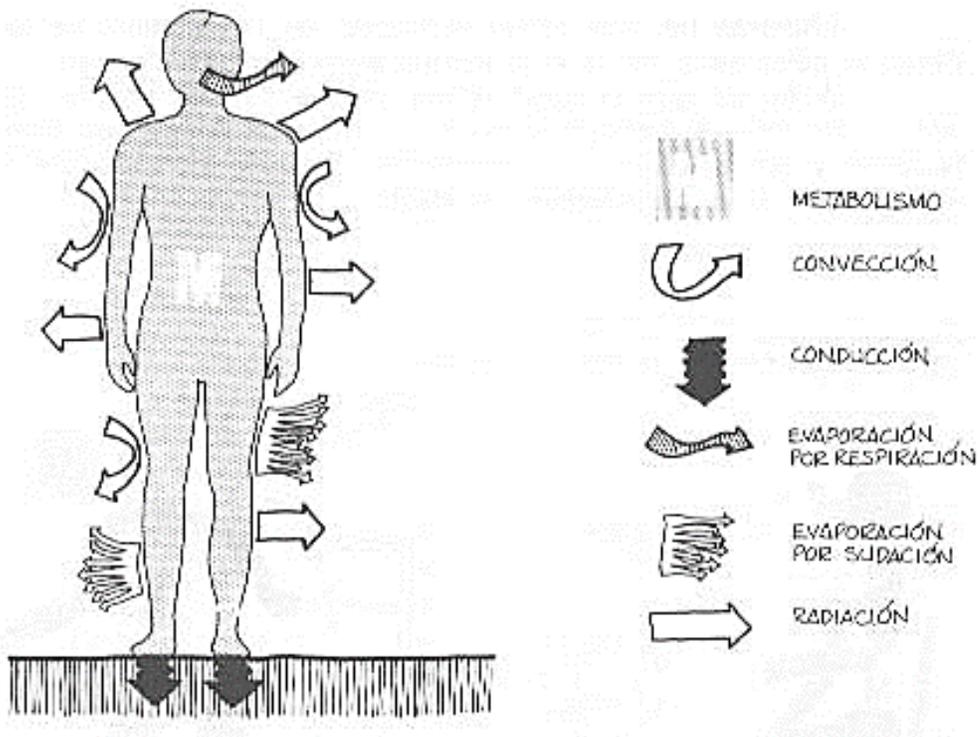
Se denomina confort térmico cuando las personas no experimentan sensación de calor ni de frío; es decir cuando las condiciones de temperatura, humedad y movimientos del aire son favorables en referencia a las actividades que se desarrollan.

Para la correcta evaluación del confort térmico hay que valorar diferentes parámetros, existiendo unas variables modificables que influyen en los intercambios térmicos entre el individuo y el ambiente, que contribuyen a la sensación de confort, éstas son: la temperatura del aire, la temperatura de las paredes y objetos que nos rodean, la humedad del aire, la actividad física, la clase de vestido y la velocidad del aire.

Se dice que el cuerpo se encuentra en una situación de confort térmico cuando el ritmo al que se genera calor es el mismo que el ritmo al que se pierde, para la temperatura corporal normal. Esto implica que en balance global, se tiene que perder calor permanentemente para encontrarse bien, pero al ritmo adecuado. Para esto se encuentran varios factores.

El cuerpo humano genera calor para mantener la temperatura corporal, pero también es un subproducto de la actividad física y mental.

Figura 28. **Confort térmico**



Fuente: GARCÍA, Juan. *Vivienda bioclimática en San José Pinula*. p. 12.

5.1. Temperatura

La temperatura es una propiedad de la materia que está relacionada con la sensación de calor o frío que se siente en contacto con ella. Cuando se toca un cuerpo que está a menos temperatura que el nuestro, se siente una sensación de frío y al revés de calor.

Cuando dos cuerpos, que se encuentran a distinta temperatura, se ponen en contacto, se producen una transferencia de energía, en forma de calor, desde el cuerpo caliente al frío, esto ocurre hasta que las temperaturas de ambos cuerpos se igualan. En este sentido, la temperatura es un indicador de la dirección que toma la energía en su tránsito de unos cuerpos a otros.

La temperatura de radiación está relacionada con el calor que se recibe por radiación. Se puede estar cómodos con una temperatura del aire muy baja si la temperatura de radiación es alta; por ejemplo, un día moderadamente frío de invierno, en el campo, puede ser agradable si se está recibiendo el calor del sol de mediodía; o puede ser agradable una casa en la que, la temperatura del aire no es muy alta, pero las paredes están calientes.

“Esto es importante, porque suele ocurrir en las casas bioclimáticas, en donde la temperatura del aire suele ser menor que la temperatura de las paredes, suelos y techos, que pueden haber sido calentadas por el sol”.³⁰

5.2. Calor

El calor es la transferencia de energía desde un cuerpo que se encuentra a mayor temperatura hasta otro de menor temperatura. Cuando ambos cuerpos igualan sus temperaturas se detiene la transmisión de energía. Cuando dos cuerpos a distintas temperaturas se ponen en contacto, terminan igualando sus temperaturas. Entonces se dice que se ha alcanzado el equilibrio térmico.

Cuando dos sistemas en desequilibrio térmico entran en contacto, el de mayor temperatura transfiere energía térmica al de menor temperatura hasta conseguir el equilibrio térmico.

“El calor se propaga a través de los materiales por diferentes medios o formas. Cada uno de los materiales se calienta a diferentes velocidades y retiene el calor en función de sus características, por lo que cada uno tendrá diferentes temperaturas”.³¹

³⁰ MORILLÓN, David. *Habitabilidad térmica en la vivienda*. p. 13.

³¹ *Ibid.* p. 1.

5.3. Aislante térmico

Son aquéllas sustancias que transmiten lentamente la energía térmica de un punto a otro. Ejemplos: Vidrio, hielo, ladrillo rojo, madera, corcho, etc. Suelen ser materiales porosos o fibrosos que contienen aire en su interior. Un mal aislamiento es un problema común y que dificulta alcanzar el confort que se quiere en la vivienda, aun cuando las instalaciones son eficientes desde el punto de vista energético y técnico.

Cuando una persona se desea proteger de las inclemencias del tiempo recurre a abrigarse, en primera instancia. Esto supone que en el caso de las viviendas, para conseguir condiciones de confort en el interior adecuadas, se debe conseguir con la citada envolvente térmica unas características aislantes determinadas.

De no conseguirse esas condiciones de aislamiento térmico, la demanda de energía eléctrica será mayor que en el caso contrario, lo que supondrá un gasto anual importante en el hogar. El aislamiento natural del individuo. La grasa y el vello, son aisladores naturales y reducen las pérdidas de calor. También se puede considerar como un aislamiento sintético a la ropa de abrigo, mantiene una capa de aire entre la superficie del cuerpo y el tejido que aísla térmicamente el mismo.

5.4. Conducción térmica

Los gases son muy malos conductores del calor; por eso, el aire contenido entre dos superficies, constituye un método muy eficaz para reducir las pérdidas de calor a través de ellas, como las cámaras de aire que se utilizan por medio del doble vidriado.

“El calor se propaga a través de los materiales por diferentes medios o formas. Cada uno de los materiales se calienta a diferentes velocidades y retiene el calor en función de sus características, por lo que cada uno tendrá diferentes temperaturas”.³²

La conducción térmica es la transmisión de calor en forma directa de molécula a molécula en el mismo cuerpo o en contacto directo entre cuerpos. Se lleva a cabo en todas direcciones.

La convección es la transmisión de calor a través de los fluidos (gases o líquidos). El calor se transmite al fluido por conducción, la densidad del fluido se reduce, éste se dilata y sube, su lugar es ocupado por moléculas frías.

Otra forma de conducción térmica es la radiación, que consta en la propagación del calor en forma de radiaciones, de ondas electromagnéticas. Se propaga en línea recta a través de todo los medios. La radiación solar llega a tierra y calienta los cuerpos. La radiación solar es de onda corta y la radiación de los cuerpos calientes es de onda larga.

5.5. Termodinámica ambiental

La termodinámica es una ciencia fundamental en que se estudian el almacenamiento, transformación, transferencia y usos de la energía. También se ocupa de las interacciones de un sistema y ambiente, o de un sistema que interactúa con otro.

³² MORILLÓN, David. *Habitabilidad térmica en la vivienda*. p. 1.

Desde hace mucho tiempo la termodinámica ha sido parte esencial de los programas de estudio de ingeniería a nivel global. La comprensión por parte del estudiante, de las transformaciones de energía precisa la orientación en el reconocimiento y apropiación de las definiciones básicas de energía, sistemas, estados y procesos desde su entorno más inmediato asociando elementos y situaciones de uso diario con requerimientos de energía.

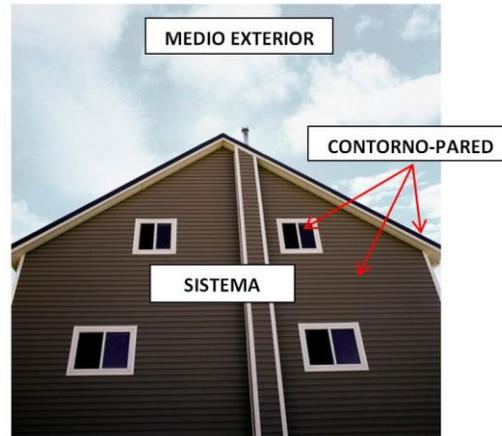
La termodinámica estudia sistemas, un sistema es una parte del universo sobre la que hacemos un estudio (saber cómo se comporta ante una o varias acciones exteriores), está delimitado por un contorno, que si es real se llama pared y todo lo que rodea al sistema se denomina entorno o medio exterior. Por analogía, se puede asimilar que un sistema puede ser una vivienda, el contorno es la envolvente y el medio exterior, sería el medio que rodea a la vivienda.³³

La transferencia de calor es fundamental en el estudio energético de la vivienda, el calor fluye entre las paredes y suelo de la vivienda (envolvente). Mediante los mecanismos de transferencia de calor, sabemos la limitación energética de la vivienda, las cargas térmicas a la que está sometida, conocemos las propiedades del aislamiento a utilizar y otros factores que pueden analizarse.

La psicrometría estudia las propiedades del aire y la humedad, saber estas propiedades, es importante para dimensionar instalaciones de ventilación y climatización. También debe considerarse la dinámica de los fluidos, en el cálculo de tuberías y conductos para instalaciones en viviendas y edificios.

³³ CARMONA, Julio. *Termodinámica y construcción*. <https://julio-carmona.blog.wordpress.com/2013/05/14/termodinamica-y-construccion/>. Consulta: 24 de abril de 2018.

Figura 29. **Termodinámica en una vivienda**



Fuente: CARMONA, Julio. *Termodinámica y construcción*.

<https://julioarmonablog.wordpress.com/2013/05/14/termodinamica-y-construccion/>. Consulta: 24 de abril de 2018.

5.6. Humedad

Humedad del aire incide en la capacidad de transpiración que tiene el organismo, mecanismo por el que se elimina el calor. A mayor humedad, menor transpiración. La humedad relativa cambia con la temperatura por la sencilla razón de que la máxima humedad que admite el aire cambia con ella.

La forma en la que habitualmente nos referimos a la humedad, se expresa a través de dos formas principalmente: la llamada humedad relativa y la humedad absoluta.

La humedad relativa es la medida porcentual, que expresa la relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene el aire y la máxima que podría tener sin variar la temperatura; y cuando hablamos de humedad absoluta nos referimos al peso del vapor de agua contenido por unidad de volumen de aire y que normalmente se expresa en gramos o kilogramos.

Diversas normativas y organismos internacionales hablan sobre los parámetros que se deben cumplir en cuanto a humedad relativa. Mayormente se aconseja por razones sanitarias mantener la humedad relativa dentro del campo del 40 al 60% en su conjunto, donde el crecimiento de microorganismos es mínimo. Otras organizaciones recomiendan un nivel de humedad entre el 30% y el 50% en el interior de la casa, en función de la temperatura exterior con niveles que no deben superar el 55% en verano y con unos niveles de entre el 30% y el 40% en los meses de invierno.³⁴

Los niveles de humedad en el hogar pueden convertirse en un factor fundamental en la salud de sus ocupantes. Cuando en una vivienda o espacio habitado se exceden los límites recomendados de humedad relativa, este hecho puede causar efectos adversos para la salud relacionados con la formación de moho, ácaros y la proliferación de virus y bacterias debidos a la exposición a una humedad excesiva.

Pero no son estos los únicos inconvenientes de unos niveles de humedad excesiva. Además de causar problemas de salud, el exceso en los niveles recomendables de humedad también puede afectar a las edificaciones y puede llegar a dañar los materiales de construcción y sus componentes.

El control del grado de humedad adecuado en una vivienda incidirá directamente no sólo en la propia calidad del aire interior, sino también en la sensación de confort térmico y por supuesto en el ahorro y la eficiencia energética de nuestro hogar. En este sentido, será conveniente adoptar las medidas necesarias para controlar y mantener un nivel adecuado de humedad y evitar problemas de salud.

³⁴ S&P. *Sistemas de ventilación*. <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-ideal-confort-termico/>. Consulta: 24 de abril de 2018.

Utilizar extractores de aire; a priori, el baño y la cocina son los lugares de la casa en los que más humedad se genera por lo que es conveniente utilizar extractores de aire que nos permitan eliminar parte del vapor de agua generado por ejemplo en la ducha.

Cambiar ventanas si nuestras viviendas aún tienen ventanas con marcos de aluminio, utilizar revestimientos y pinturas resistentes a la humedad e incluso seleccionar algunos tipos de plantas que contribuyan a absorber la humedad, pueden ser otras medidas muy útiles a la hora de controlar el nivel de humedad del entorno.

6. TECHOS INCLINADOS

El techo en una vivienda es el elemento que se ubica en la parte superior para cerrar o cubrir a la misma. La función primordial de un techo es la de resguardar a quienes están en el interior de la vivienda. Algunos techos cumplen la función de ser un diafragma estructural, porque tienen la capacidad de transmitir fuerzas que actúan en el plano del miembro hacia los elementos verticales del sistema de resistencia ante fuerzas sísmicas.

Los techos pueden ser diseñados de acuerdo a su uso, forma y características de los materiales a utilizar. En el caso de los grupos sociales de bajos ingresos se puede observar techos de paja, chapa o cartón, palma y otros materiales que son poco estables al momento de ser solicitados ante eventos naturales extremos.

La estructura de techos construidos de hormigón armado debe contar con vigas o cerchas estructurales, para el soporte de las cubiertas, apoyándose en las paredes u otras vigas, a las que les transmite las sobrecargas que le son impuestas y les transmiten su propio peso. Según el uso para el que esté diseñada la estructura, esta puede variar tanto en su forma como en los materiales que la componen.

6.1. Cubiertas

La cubierta de techo es la superficie o lámina instalada que protege a las viviendas en la parte superior y a la estructura que la sustenta. Las cubiertas tienen la función de proteger a las viviendas de los fenómenos meteorológicos (calor, lluvia, escarcha, frío).

Existen cubiertas planas y cubiertas inclinadas, se diferencian entre sí, debido a su inclinación respecto al plano horizontal del suelo. Con la inclinación se logra drenar la cantidad de agua que es producto de la lluvia, también se logran ciertos estándares de confort térmico que va en juego también con la altura de la vivienda. Y las cubiertas planas son utilizadas mayormente en climas secos.

6.2. Formas de techos

Existen distintos tipos de techos y para el caso de Guatemala nos enfocamos más en los techos planos y los techos inclinados. El criterio que permite decidir entre uno y el otro es el lugar donde está ubicada la vivienda, si está ubicada en una zona con lluvias copiosas y muy frecuentes, son preferibles los techos con una inclinación pronunciada para evacuar el agua con mayor facilidad, evitando las filtraciones que se producen por el acumulamiento en el techo.

6.2.1. Techos planos

Los techos planos están sometidos a variaciones de temperatura que los vuelven propensos a deteriorarse con mayor rapidez, son utilizados para soportar distintos tipos de carga y al combinar ambos factores conlleva a tomar la decisión de seccionarlos dejando juntas de dilatación entre ellas y así puedan tener el espacio requerido, para la dilatación y contracción del material, reduciendo el área que es afectada por las variaciones de temperatura.

Se logra también una mejor distribución de las cargas a las que son sometidos. Las dimensiones de dichas secciones de techo están relacionadas en gran medida con el tipo de material que los conforman. En la actualidad se les puede aplicar un aislante térmico, que reduce el intercambio de frío o calor con el exterior. Los techos planos son a simple vista horizontales, pero están conformadas por uno o varios faldones que tienen una pendiente no mayor del 5%, para poder drenar el agua de lluvia.

Figura 30. **Techo plano**



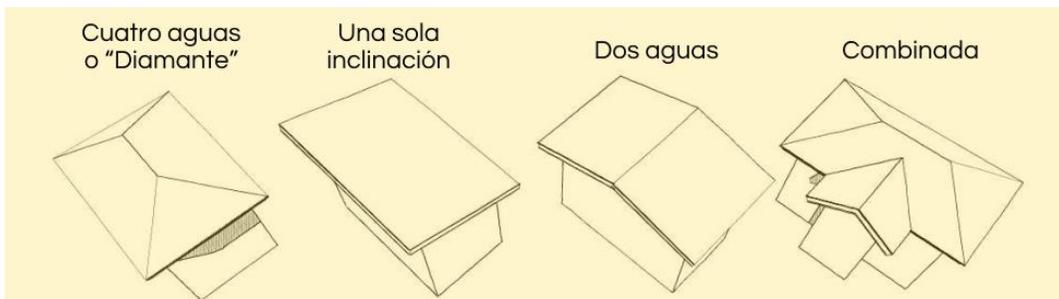
Fuente: MN DEL GOLFO. <http://www.mndelgolfo.com/tip/consejos-para-impermeabilizar-techos-planos/>. Consulta: 06 de mayo de 2018.

6.2.2. Techos inclinados

Los techos inclinados están formados por faldones, que poseen una inclinación entre el 10% y 60%, puede estar compuesto por láminas o por piezas impermeables colocadas sobre una base o estructura y solapadas entre sí. En los países que están más cercanos a los polos se emplean para que la nieve o la lluvia no se acumulen en ellos, evitando enfriar el interior de las edificaciones y sobrecargar las estructuras que sostienen las cubiertas.

En los países tropicales como Guatemala, los techos inclinados aumentan la altura interior con lo que mantienen un ambiente más fresco al permitir una mejor ventilación al interior. La forma de techo más común, es el de dos aguas. Debido a que los techos inclinados no acumulan agua de lluvia, sus periodos de mantenimiento son más espaciados.

Figura 31. Formas básicas de techos inclinadas



Fuente: ARCOGRAMA. *Diseño de techumbres y cubiertas*. <http://arcograma.com/blog/diseño-de-techumbres-y-cubiertas/>. Consulta: 06 de mayo de 2018.

6.3. Tipos de techos (materiales)

Existen diversos tipos de techos según sus materiales, desde estructuras de madera hasta estructuras metálicas. En el caso de los techos planos se pueden encontrar losas tradicionales hasta losas prefabricadas.

Los tipos de cubierta usuales entre la población pobre son los que están conformados por tejas, paja, palma y láminas de zinc. Todos estos materiales tienen como finalidad proporcionar la protección necesaria a los habitantes de una vivienda.

El material a utilizarse en el techo depende de la región del país en la que se ubique la vivienda, el clima es un factor determinante para saber que material es el adecuado. En Guatemala existe la época seca y la época lluviosa debido a su clima subtropical y la topografía que hace cambiar la dirección del viento.

“Además se tiene que existe una relación entre el material empleado como cubierta y la pendiente del techo, ya que cuando se trata de materiales vegetales (palma, paja, y otros), pendiente deber ser mayor, debido a que estos materiales tienen lento escurrimiento. Por otra parte, también la precipitación pluvial de la región obliga a incrementar o disminuir el ángulo de inclinación de los techos”.³⁵

Para fines de este trabajo se utilizarán materiales reciclados, materiales que son residuos de distintos procesos de fabricación y materia orgánica. Este prototipo podrá utilizarse como teja o bien como láminas con mayores dimensiones que las de una teja convencional.

³⁵ PUAC, Octavio. *Opciones de techos para vivienda en Guatemala*. p. 24.

Según Euge en su publicación de Características de las cubiertas y los distintos tipos según su composición, establece que las cubiertas pueden ser:

- De madera (en tablas o tablonados)
- De caña (entramado de cañas cubierto por barro y paja)
- De paja (entramado de paja de cebada o trigo en esterillas)
- De teja plana (teja de encaje o romana, más decorativa e ideal para cubiertas inclinadas a la vista).
- De pizarra /tablero (reposado sobre un tabique, de muy alta resistencia y durabilidad, recubierta de cemento o yeso y luego mortero).
- De fibrocemento (estructura previamente elaborada que soporta placas de madera o metálicas, mayormente con fibra de vidrio como aislante).
- De aluminio (chapas acanaladas en secciones, de aluminio-magnesio, muy resistente al clima y de bajo costo en países con acceso al metal y poco mantenimiento – conocida también como tinglado).
- Plástica (cubierta de materiales plásticos moldeadas en ondulaciones abovedadas, especial para sitios sísmicos pues resisten bien la flexión).
- De vidrio (en placas lisas u onduladas, o en forma de tejas, más vistosa pero menos resistente a ataques climáticos).
- De placa asfáltica (placas de fieltro onduladas, fortalecidas con cartón alquitranado).³⁶

³⁶ EUGE. *Características de las cubiertas y los distintos tipos según su composición*. <http://ideasparaconstruir.com/n/4004/las-cubiertas-y-sus-materiales.html>. Consulta: 12 de mayo de 2018.

7. ENSAYOS A EFECTUAR

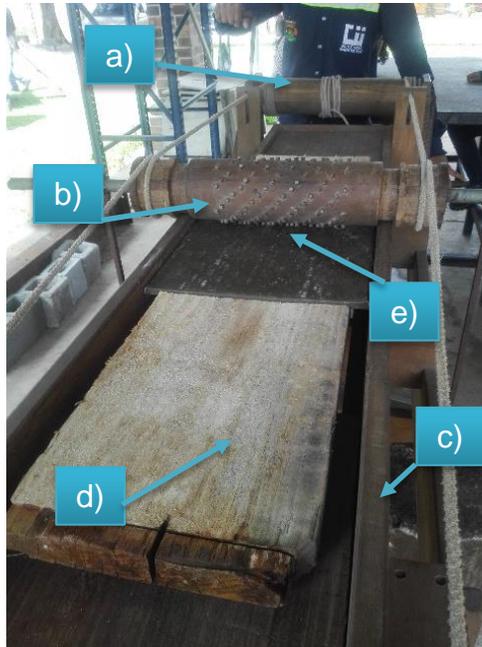
7.1. Ensayo de desgaste

Este ensayo consiste en someter el prototipo, a una simulación de condiciones de uso que pueden requerir mantenimiento más allá de lo considerado normal o la sustitución del material de la superficie debido al desgaste. Este método de ensayo permite comparar distintos materiales en cuanto a su resistencia a cargas de servicio severas y ordinarias.

7.1.1. Equipo utilizado

- Estructura de madera utilizada para soportar las guías horizontales en las que se colocará el prototipo.
- Rodillos con manivelas en los que se fijarán los lazos encargados de hacer girar el rodillo dentado.
- Rodillo dentado de madera dura (Bucida buceras).
- Tableros auxiliares para fijar el prototipo.
- Dos cargas de 45kg cada una.

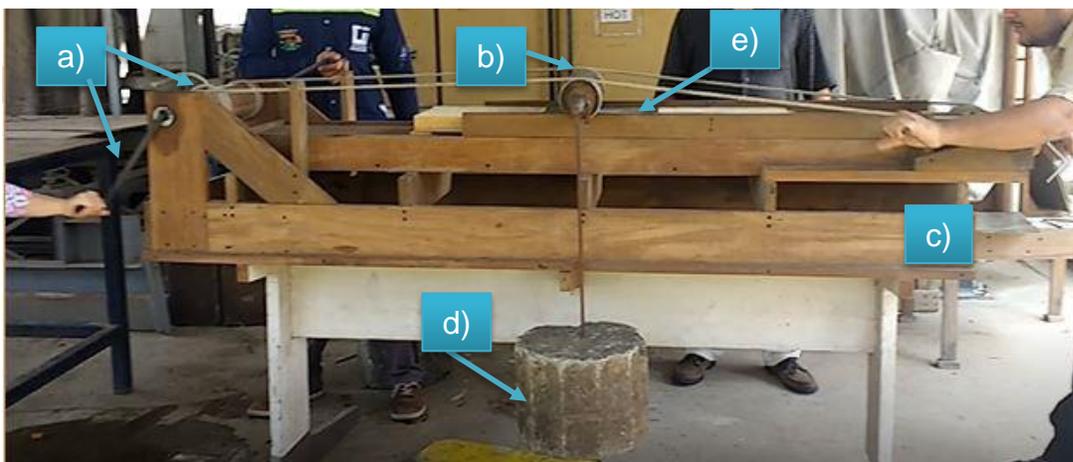
Figura 32. **Ensayo de desgaste**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Rodillos con manivelas; b) Rodillo dentado; c) Estructura de madera para el ensayo de desgaste; d) Tablero auxiliar; e) Prototipo.

Figura 33. **Partes del equipo para el ensayo de desgaste**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Rodillos con manivelas; b) Rodillo dentado; c) Estructura de madera para el ensayo de desgaste; d) Peso de 45kg; e) Prototipo.

7.1.2. Procedimiento

- Preparar el juego de lazos de tal manera que permita el desplazamiento del rodillo dentado a lo largo de la estructura de madera.
- Colocar el prototipo en la estructura de madera de tal forma que quede centrada.
- Ajustar la altura del prototipo con los tableros auxiliares.
- Colocar los pesos, de 45kg cada uno, en los extremos del eje central que tiene el rodillo dentado.
- Girar las manivelas para hacer pasar el rodillo dentado sobre el prototipo, un total de 50 repeticiones de ida y vuelta.
- Retirar los pesos, de 45kg cada uno, de los extremos del eje central que tiene el rodillo dentado.
- Retirar el rodillo dentado.
- Extraer el prototipo de la estructura de madera.
- Examinar el estado de la superficie del prototipo, según los daños apreciables, para determinar si el prototipo sigue siendo funcional, necesita ser reparada o reemplazada.

7.2. Ensayo de flexión

Este ensayo permite determinar el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura del prototipo. Al someter el prototipo a un esfuerzo de flexión pura.

7.2.1. Equipo utilizado

- Rodillos metálicos que sirven como apoyo para el prototipo
- Bases metálicas para dar soporte al prototipo
- Gato hidráulico con capacidad de cinco toneladas
- Bomba hidráulica modelo P-462
- Deformómetro

Figura 34. Equipo del ensayo de flexión pura



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Deformómetro; b) Bases metálicas; c) Gato hidráulico; d) Rodillos de apoyo; e) Prototipo.

Figura 35. **Bomba hidráulica P- 462**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.2.2. Procedimiento

- Preparar y nivelar el equipo para realizar el ensayo
- Colocar los apoyos en la parte inferior de los extremos del prototipo
- Colocar el apoyo en la parte superior y al centro del prototipo, para colocar el gato hidráulico directamente sobre este.
- Colocar el deformómetro sobre un punto específico del prototipo.
- Aplicar cargas sucesivas y tomar la lectura de las deformaciones correspondientes a cada carga.
- Disminuir la carga de manera gradual hasta que no exista carga aplicada en el prototipo.
- Retirar el prototipo y visualizar si esta tiene daños permanentes.

7.3. Ensayo de impacto

El ensayo de impacto permite conocer la capacidad del material para absorber energía, que en este caso es la relación entre la energía potencial y la energía cinética que puede tener un cuerpo que impacta sobre el prototipo.

7.3.1. Equipo utilizado

- Estructura de madera, diseñada para el ensayo de impacto
- Tubo de PVC marcado a cada 15 centímetros de distancia para tener la referencia de la altura, terminando a una altura total de 195 centímetros.
- Marco de madera para instalar el prototipo.
- Bala de acero, con un peso de 500 gramos.
- Polea, para subir y bajar la bala de acero.
- Cuerda, para sostener la bala de acero.

Figura 36. **Bala de impacto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 37. **Equipo ensayo de impacto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Soportes de madera para la tubería PVC; b) Tubería PVC marcada a cada 15 centímetros de distancia; c) Estructura de madera para el ensayo de impacto; d) Prototipo; e) Bala de impacto; f) Marco de madera en la que se atornilla la muestra del prototipo.

7.3.2. Procedimiento

- Colocar el prototipo sobre el marco de madera, sujetando los extremos con tornillos utilizados para techos.
- Centrar el prototipo en la parte inferior del aparato de ensayo de impacto.
- Colocar la bala de acero a cada altura predeterminada, desde los 15 centímetros hasta los 195 centímetros, en incrementos de 15 centímetros entre cada ensayo.
- Dejar caer la bala de acero sobre el prototipo, para cada altura del ensayo.
- Retirar el prototipo del marco de madera.
- Determinar si existen daños en el prototipo y si estos existen, determinar la altura a la que se produjo.

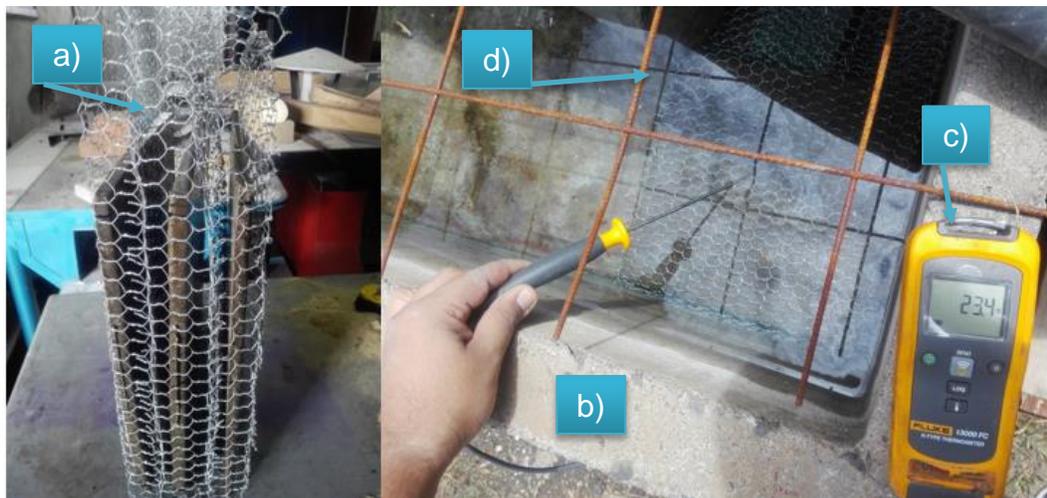
7.4. Ensayo de pesos volumétricos

El ensayo de pesos volumétricos permite determinar el comportamiento del prototipo al estar expuesto en un ambiente saturado de agua, se obtienen datos como lo son el porcentaje de absorción, porcentaje de humedad y la densidad del material tanto en estado seco como en estado húmedo. Adicional a ello se realiza un análisis de secado del material para estabilizar el valor de la densidad del material.

7.4.1. Equipo utilizado

- Pileta para sumergir el prototipo
- Jaula de acero para introducir el prototipo
- Vernier con lector digital
- Balanza digital
- Termómetro electrónica
- Horno de secado

Figura 38. Equipo para el ensayo de peso volumétrico



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Jaula para el prototipo; b) Pileta; c) Termómetro digital; d) Prototipo sumergido.

Figura 39. Vernier con lector digital



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Vernier con lector digital; b) Balanza electrónica; c) Horno de secado.

7.4.2. Procedimiento

- Preparar tres prototipos cuadrados de diez centímetros de lado
- Medir el prototipo para determinar el volumen en estado seco
- Pesar el prototipo en estado seco
- Introducir las muestras en una jaula para poder sumergirlas durante veinticuatro horas.
- Medir el prototipo para determinar el volumen en estado húmedo.
- Pesar el prototipo en estado húmedo.
- Secar el prototipo durante intervalos de 30 minutos hasta llegar a 180 minutos, a una temperatura de 110°C.
- Medir el prototipo para determinar el volumen cada 30 minutos, luego de sacarlo del horno en cada vez.
- Pesar el prototipo cada 30 minutos hasta llegar a 180 minutos, luego de sacarlo del horno en cada vez.

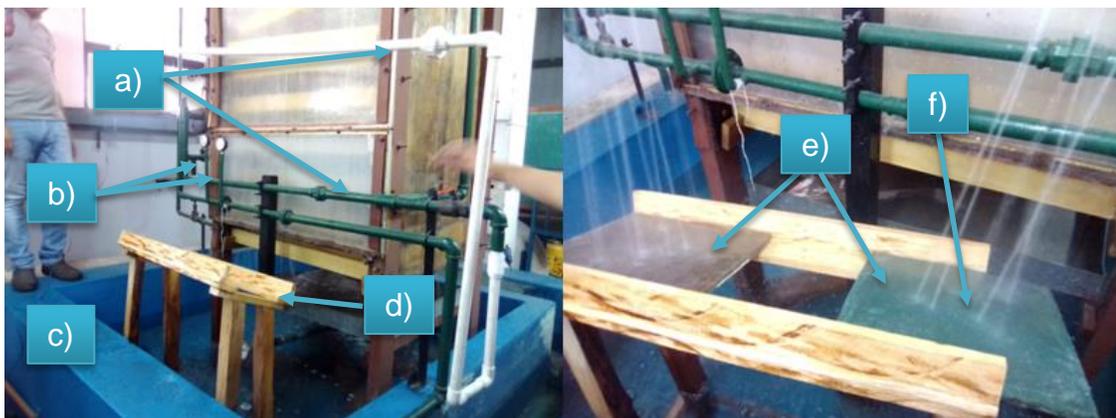
7.5. Ensayo de erosión acelerada

Este ensayo consiste en someter el prototipo, a una simulación de lluvia durante treinta minutos induciendo una presión al agua que se utilizará para verificar si existe algún tipo de desgaste del material o alguna alteración volumétrica del prototipo, indicando que exista una ganancia o una pérdida en el peso. Al terminar el ensayo se realiza también una inspección visual del prototipo evidenciando si existe algún desgaste respecto al estado inicial del mismo.

7.5.1. Equipo utilizado

- Estructura de madera para colocar el prototipo
- Pileta
- Instalación hidráulica
- Balanza

Figura 40. Equipo del ensayo de erosión acelerada



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Instalación hidráulica; b) Manómetros; c) Pileta; d) Estructura de madera para las muestras del prototipo; e) Prototipo; f) Zona de erosión.

Figura 41. **Balanza**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.5.2. Procedimiento

- Inspeccionar la superficie del prototipo para verificar que esta se encuentre en óptimas condiciones antes del ensayo.
- Colocar el prototipo en una estructura de madera dentro del tanque, en el se realizará el ensayo.
- Centrar el prototipo directamente bajo la tubería de la que recibirá la descarga de agua a presión.
- Abrir la válvula para que el agua fluya por las tuberías y esta impacte sobre el prototipo durante 30 minutos.
- Cerrar la válvula y extraer el prototipo.
- Examinar visualmente si existe algún desgaste en la superficie del prototipo.

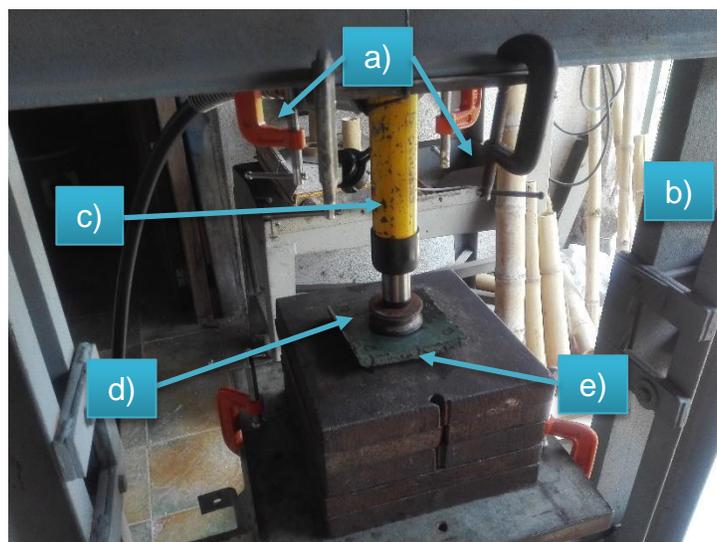
7.6. Ensayo de penetración

Este ensayo modificado de la bola Janka, permite determinar la dureza del material, se debe obtener la carga máxima requerida para incrustar la bola hasta la mitad de su diámetro (0,565 centímetros) y este valor de carga será el equivalente a la dureza del material.

7.6.1. Equipo utilizado

- Estructura metálica para el ensayo de dureza
- Gato hidráulico
- Bomba hidráulica P-462
- Bola Janka
- Regla milimétrica

Figura 42. Equipo para el ensayo de dureza



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Sargentos de 4 pulgadas; b) Estructura metálica; c) Gato hidráulico; d) Estructura de bola Janka; e) Muestra del prototipo.

7.6.2. Procedimiento

- Preparar estructura metálica para realizar el ensayo
- Centrar la muestra del prototipo
- Colocar la bola Janka junto con su cabezal sobre la muestra del prototipo y colocar el gato hidráulico sobre este cabezal.
- Aplicar cargas sucesivas hasta lograr que la bola Janka se incruste en el material.
- Anotar la carga con la que se incrustó la bola Janka, a una profundidad equivalente a la mitad de su diámetro.

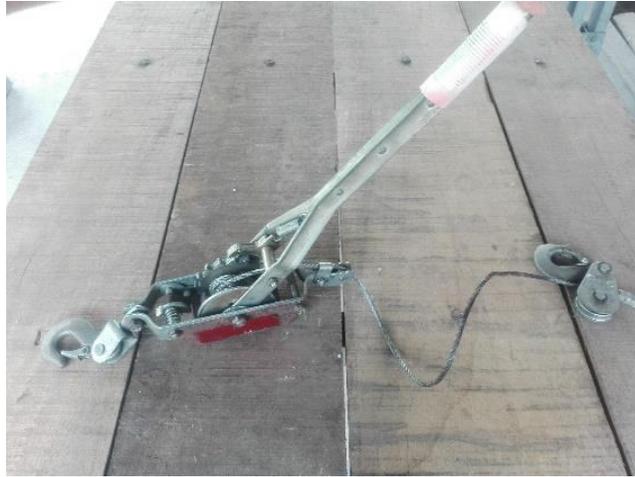
7.7. Ensayo de desgarro al tornillo

Esta prueba de resistencia de clavos laterales permite determinar la resistencia del material a los movimientos laterales cuando está siendo sujetado por clavos o tornillos especiales para la instalación del prototipo. La carga requerida para llevar el material al desgarro total, será la resistencia a las cargas laterales.

7.7.1. Equipo utilizado

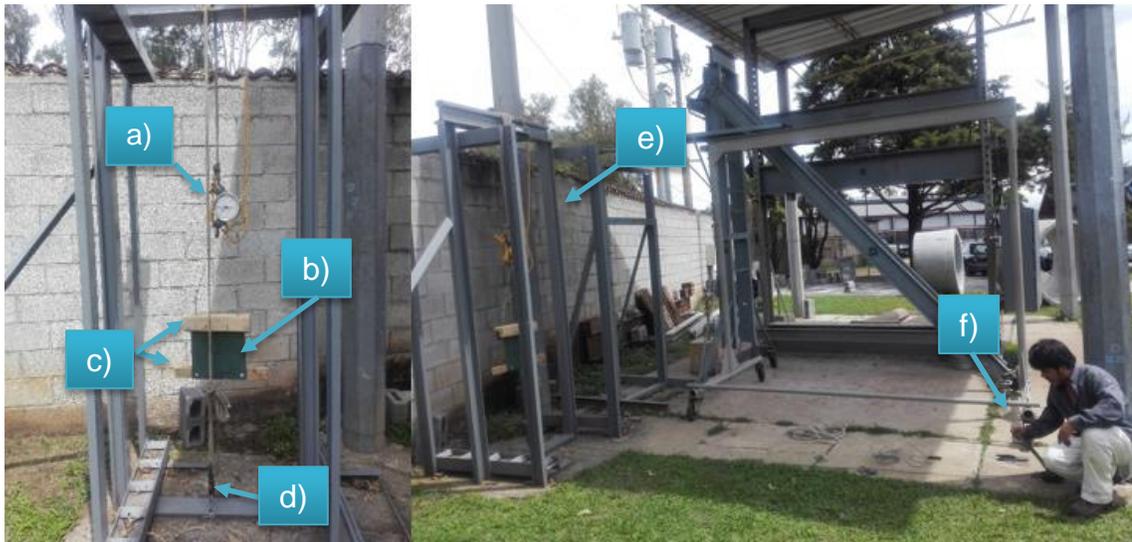
- Marco metálico
- Dinamómetro
- Mordazas para sujetar muestra del prototipo
- Base para atornillar la muestra del prototipo
- Polea para los cables metálicos que sujetan el equipo del ensayo
- Cable metálico para ejercer tensión en la muestra del prototipo
- Mica para aplicar la carga de tensión

Figura 43. **Mica**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 44. **Equipo para el ensayo de desgarró al tornillo**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Dinamómetro; b) Prototipo; c) Bases y mordazas; d) Polea; e) Estructura metálica; f) Mica.

7.7.2. Procedimiento

- Preparar el juego de cables para colocar las mordazas y las bases en las que se fijará la muestra del prototipo.
- Asegurar la muestra del prototipo con las mordazas y la base de tornillos.
- Instalar el dinamómetro dejando en un extremo el sistema de mordazas y en el otro extremo el cable sujeto a la estructura metálica.
- Pasar el cable metálico por la polea de la parte inferior.
- Conectar el cable metálico a la mica, con la que se ejercerá la fuerza de tensión al sistema de mordazas.
- Aplicar la carga mediante la mica hasta que la muestra del prototipo se desgarré.
- Anotar la carga a la que se desgarró la muestra del prototipo.

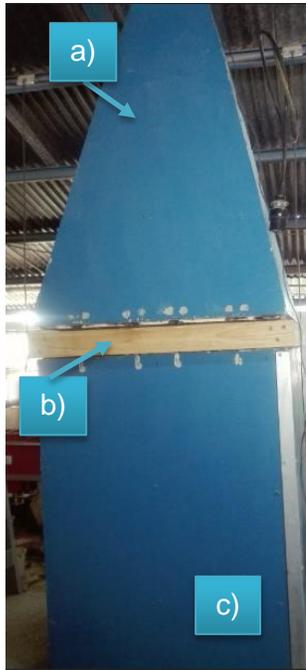
7.8. Ensayo de temperatura

Este ensayo de temperatura permite determinar las propiedades térmicas de la muestra del prototipo, es decir, permite conocer la capacidad de aislamiento térmico que tiene el material.

7.8.1. Equipo utilizado

- Equipo adecuado para el aislamiento térmico
- Lámpara de 150 watts
- Termómetro láser tipo pistola

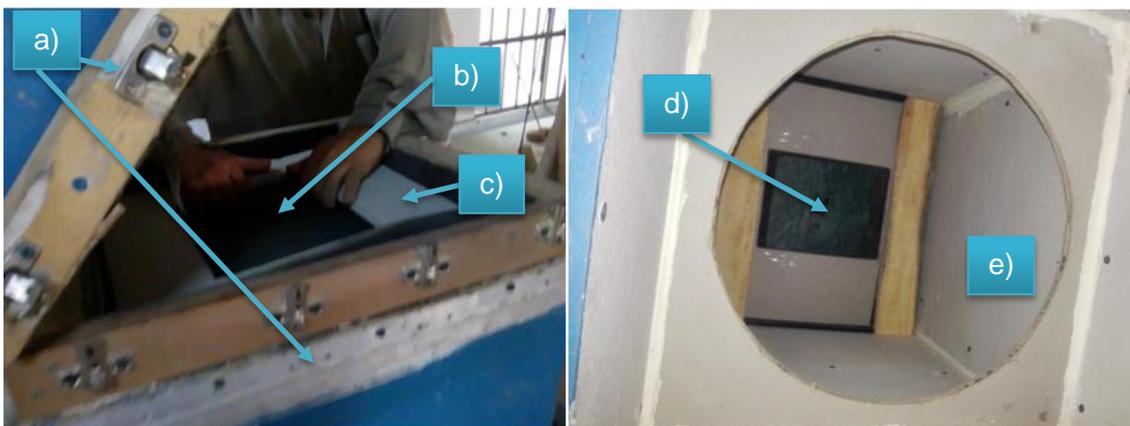
Figura 45. **Equipo de aislamiento térmico**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Copa del equipo, dentro de él se instala la lámpara; b) Juego de bisagras; c) Base hueca cuadrada.

Figura 46. **Partes del equipo de ensayo**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Equipo de aislamiento; b) Prototipo parte superior; c) Material aislante; d) Prototipo parte inferior; e) Base hueca cuadrada.

Figura 47. **Termómetro tipo pistola**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.8.2. Procedimiento

- Medir la temperatura ambiente
- Medir la temperatura interna sobre la muestra del prototipo inicialmente
- Medir la temperatura interna debajo de la muestra del prototipo inicialmente.
- Medir la temperatura interna sobre la muestra del prototipo cada 30 minutos, hasta cumplir los 180 minutos.
- Medir la temperatura interna debajo de la muestra del prototipo cada 30 minutos, hasta cumplir los 180 minutos.

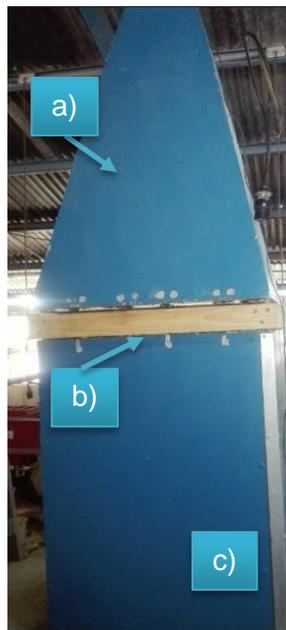
7.9. Ensayo de ruido

Este ensayo de ruido permite determinar las propiedades acústicas de la muestra del prototipo, es decir, permite conocer la capacidad de aislamiento acústico que tiene el material.

7.9.1. Equipo utilizado

- Equipo de aislamiento térmico
- Bocina
- Decibelímetro

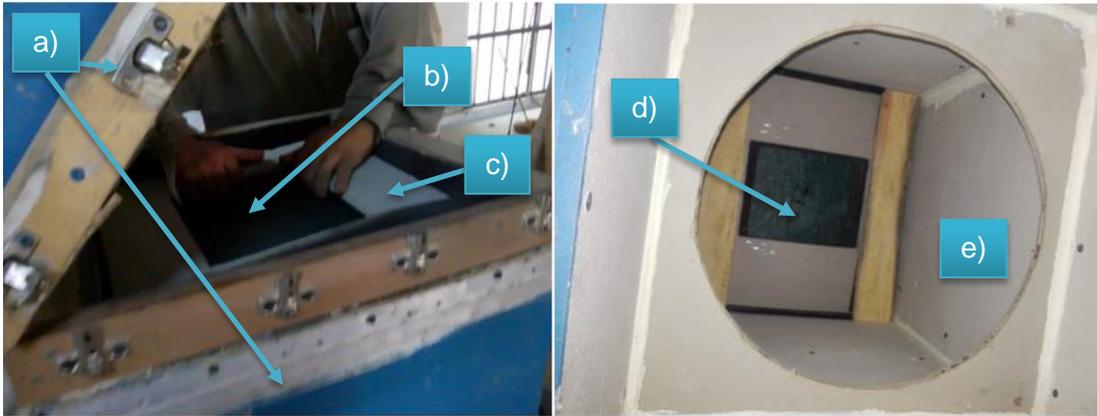
Figura 48. **Equipo de aislamiento térmico**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Cono del equipo, dentro de él se instala la lámpara; b) Juego de bisagras; c) Base hueca cuadrada.

Figura 49. **Partes del equipo de ensayo**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Equipo de aislamiento; b) Prototipo parte superior; c) Material aislante; d) Prototipo parte inferior; e) Base hueca cuadrada.

Figura 50. **Decibelímetro**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.9.2. Procedimiento

- Medir el ruido ambiente inicialmente
- Medir el ruido externo del equipo de aislamiento acústico inicialmente
- Medir el ruido interno sobre la muestra del prototipo inicialmente
- Medir el ruido interno debajo de la muestra del prototipo inicialmente.
- Medir el ruido ambiente cada 30 minutos, hasta cumplir los 180 minutos
- Medir el ruido externo del equipo de aislamiento acústico cada 30 minutos, hasta cumplir los 180 minutos.
- Medir el ruido interno sobre la muestra del prototipo cada 30 minutos, hasta cumplir los 180 minutos.
- Medir el ruido interno debajo de la muestra del prototipo cada 30 minutos, hasta cumplir los 180 minutos.

8. NORMAS APLICADAS

8.1. Construcción

- ASTM D 1037-99 / Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials.
- ASTM D 2394-83 / Standard Methods for Simulated Service Testing of Wood and Wood-Base Finish Flooring.
- ASTM D 3043-00 / Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure.

9. DESARROLLO EXPERIMENTAL

9.1. Materiales y equipo

Se utiliza distintos materiales y equipos recomendados según sea la característica a evaluar en el ensayo correspondiente.

9.1.1. Materiales

- Anhidrita tipo II
- Bagazo de caña
- Cachaza de caña
- Estearato de zinc
- Polipropileno de baja densidad

Figura 51. **Anhidrita tipo II**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 52. **Bagazo de caña**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 53. **Cachaza de caña**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 54. **Estearato de zinc en polvo**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 55. **Polipropileno de baja densidad**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

9.1.2. Equipo

- Balanza electrónica
- Horno de convección forzada
- Molde para las muestras del prototipo
- Prensa neumática

Figura 56. **Balanza electrónica**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 57. **Horno de convección forzada**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 58. **Molde para las muestras del prototipo**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 59. Prensa neumática



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

9.2. Metodología

- Secar el bagazo de caña y la cachaza de caña, esto puede hacerse durante varios días bajo el sol o mediante horneado a 110°C.

Figura 60. **Secado de bagazo y la cachaza de caña**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Bagazo seco de caña; b) Cachaza seca de caña.

- Mezclar el bagazo de caña con el polvo de cachaza de caña y la anhidrita tipo II.

Figura 61. **Mezcla de materiales**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Mezclar el estearato de zinc con el polipropileno de baja densidad, que es el desmoldante del mismo.

Figura 62. **Polipropileno con estearato de zinc**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Pesar cada una de las mezclas en las proporciones adecuadas

Figura 63. **Mezcla en sus proporciones**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Mezcla de polipropileno con estearato de zinc; b) Mezcla de bagazo, cachaza de caña y anhidrita tipo II.

- Distribuir los materiales dentro del molde correspondiente y meter dentro del horno de convección forzada, durante 45 minutos a una temperatura de 250°C.

Figura 64. **Distribución de materiales en el molde**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Primera capa con estearato de zinc; b) Segunda capa con todos los materiales; c) Tercera y última capa con estearato de zinc.

- Sacar el molde del horno y colocar en la prensa hidráulica, aplicando una presión uniformemente distribuida de 7 kg, durante 10 minutos.

Figura 65. Prensa neumática y molde



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Partes: a) Prensa hidráulica; b) Molde con sus respectivos pesos para distribuir la carga aplicada de manera uniforme.

- Sacar la muestra del molde y dejar enfriando

Figura 66. **Muestras finales**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

9.2.1. **Algunas variaciones del prototipo**

Durante el desarrollo de investigación se utilizaron distintas dosificaciones de cada uno de los materiales para lograr optimizar el prototipo final. Teniendo en cuenta los distintos factores que conllevan a su elaboración, entre estos se encuentra la temperatura del horno, la cantidad de desmoldante del polipropileno, el espesor de la lámina auxiliar para los moldes de horneado.

Se realizaron distintas combinaciones de los factores anteriores, hasta determinar la dosificación idónea de materiales y las condiciones del entorno de trabajo para la elaboración de las muestras del prototipo.

- Se presenta exceso de material fino y bagazo de caña en la parte central del prototipo, provocando la división de la muestra.

Figura 67. **Muestra con exceso de finos**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- La temperatura establecida en el horno de convección forzada es menor a los 210°C. Por lo tanto, no permite que el polipropileno pueda fundirse completamente.

Figura 68. **Temperatura inadecuada**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Se presenta exceso de material fino, mayormente anhidrita tipo II en la capa inferior del prototipo, es por ello que tiene esa coloración característica de color blanco amarillento.

Figura 69. **Exceso de anhidrita**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Distribución insuficiente de polipropileno en la capa intermedia del prototipo.

Figura 70. **Polipropileno insuficiente**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Se excede la presión requerida en el material, luego de sacar del horno de convección forzada y el polipropileno fundido tiende a fluir hacia los laterales del molde.

Figura 71. **Muestra con exceso de finos**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Se presenta una proporción de materiales idónea, con su temperatura y presión requerida.

Figura 72. **Muestra final**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

9.3. Datos obtenidos

Se tabularon los datos obtenidos de cada ensayo..

9.3.1. Ensayo de desgaste

En el ensayo de desgaste no se tuvo ninguna marca en la muestra, luego de que la carga móvil se hizo pasar sobre la muestra durante 50 repeticiones.

9.3.2. Ensayo de flexión

En el ensayo a flexión se tienen las lecturas obtenidas con el deformómetro para cada una de las cargas y descargas respectivas.

Tabla III. Deformación de las muestras

Carga (kgs)	2.3 Concava			2.2 Convexa		
	Def 1	Def 2	Def 3	Def 1	Def 2	Def 3
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0	38,05			48,31		
18	36,34	30,92	32,47	46,22	42,30	42,24
27	33,88	30,90	32,05	42,50	42,28	42,21
36	30,29	29,78	29,87	40,08	42,00	39,43
45	26,95	28,14	28,37	37,99	40,04	37,32
54	24,26	25,49	26,05	35,66	35,05	34,37
62	19,58	19,91	20,49	33,30	32,25	32,26
54	19,61	20,01	20,52	33,34	32,32	33,52
45	20,25	20,96	21,80	34,83	34,05	34,47
36	22,67	24,47	23,53	36,29	35,85	35,42
27	26,40	26,60	26,87	38,99	38,82	37,63
18	30,71	32,47	31,64	42,30	42,24	41,26

Fuente: elaboración propia.

9.3.3. Ensayo de impacto

Los datos obtenidos en este ensayo, se tabularon de tal forma que puedan ser analizados en base a las normas.

Tabla IV. **Alturas de caída de la bala**

Altura (m)	Observaciones
ho = 0,3	
0,45	Rebote de la bala, sin dañar la muestra.
0,60	
0,75	
0,90	
1,05	
1,20	
1,35	
1,50	
1,65	
1,80	
1,95	
2,10	
2,25	
2,40	

Fuente: elaboración propia.

9.3.4. Ensayo de pesos volumétricos

Los datos obtenidos en este ensayo, se tabularon de tal forma que puedan ser analizados en base a las normas.

Tabla V. **Medidas muestra 2.1.1**

MUESTRA 2.1.1									
Peso		Distancia perimetro		Espesores					
Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco			Húmedo		
g	g	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
82,80	83,72	102,30	101,87	8,53	8,84	9,14	8,50	8,99	9,05
		100,71	100,26	9,12	9,39	9,40	9,12	9,39	9,41
		100,29	100,51	9,61	10,76	9,34	9,85	10,23	9,38
		101,85	101,44	9,17	8,68	8,63	9,16	8,67	8,67

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Medidas muestra 2.2.1**

MUESTRA 2.2.1									
Peso		Distancia perimetro		Espesores					
Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco			Húmedo		
g	g	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
80,82	82,85	100,91	101,11	9,30	9,35	9,40	9,29	9,35	9,52
		100,70	100,34	9,10	9,04	9,23	9,21	9,04	9,25
		101,00	101,71	9,72	9,11	8,77	9,72	9,25	9,00
		100,70	100,48	8,73	9,02	9,30	8,87	9,19	9,37

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Medidas muestra 2.3.1**

MUESTRA 2.3.1									
Peso		Distancia perimetro		Espesores					
Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco			Húmedo		
g	g	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
86,80	87,78	101,43	100,77	9,13	9,76	9,34	9,11	9,70	9,32
		100,31	99,41	9,22	9,51	9,74	9,25	9,53	9,87
		100,74	101,46	9,37	9,87	10,18	9,37	9,91	10,00
		100,69	101,11	9,78	9,61	9,16	9,78	9,73	9,26

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Medidas de secado 2.1.1**

MUESTRA 2.1.1							
Tiempo	Peso	Distancia		Espesores			
Secado	Seco	Lado 1	Lado 2	AB	BC	CD	DA
min	g	Promedio (cm)		Promedio (cm)	Promedio (cm)	Promedio (cm)	Promedio (cm)
30	83,06	10,2	10,1	0,9	0,9	1,0	0,9
60	82,96	10,2	10,1	0,9	0,9	1,0	0,9
90	82,88	10,1	10,1	0,9	0,9	1,0	0,9
120	82,85	10,2	10,1	0,9	0,9	1,0	0,9
150	82,80	10,1	10,1	0,9	0,9	1,0	0,9
180	82,77	10,2	10,1	0,9	0,9	1,0	0,9

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Medidas de secado 2.2.1**

MUESTRA 2.2.1							
Tiempo	Peso	Distancia		Espesores			
Secado	Seco	Lado 1	Lado 2	AB	BC	CD	DA
min	g	Promedio(cm)		Promedio (cm)	Promedio (cm)	Promedio (cm)	Promedio (cm)
30	81,62	10,1	10,1	0,9	0,9	0,9	0,9
60	81,37	10,1	10,1	0,9	0,9	0,9	0,9
90	81,02	10,1	10,1	1,0	0,9	0,9	0,9
120	80,92	10,1	10,1	0,9	0,9	0,9	0,9
150	80,79	10,1	10,1	0,9	0,9	0,9	0,9
180	80,76	10,1	10,1	0,9	0,9	0,9	0,9

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Medidas de secado 2.3.1**

MUESTRA 2.3.1							
Tiempo	Peso	Distancia		Espesores			
Secado	Seco	Lado 1	Lado 2	AB	BC	CD	DA
min	g	Promedio(cm)		Promedio (cm)	Promedio (cm)	Promedio (cm)	Promedio (cm)
30	86,99	10,1	10,1	0,9	0,9	1,0	0,9
60	86,90	10,2	10,1	0,9	1,0	1,0	1,0
90	86,83	10,1	10,1	0,9	1,0	1,0	1,0
120	86,79	10,2	10,1	0,9	0,9	1,0	0,9
150	86,77	10,2	10,1	0,9	0,9	1,0	1,0
180	86,75	10,2	10,0	0,9	0,9	1,0	1,0

Fuente: elaboración propia.

9.3.5. **Ensayo de erosión acelerada**

Los datos obtenidos en este ensayo, se tabularon de tal forma que puedan ser analizados en base a las normas.

Tabla XI. **Medidas muestra 2.1**

MUESTRA 2.1									
Peso		Distancia		Espesores					
Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco			Húmedo		
Lb	Lb	cm	cm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1,65	1,65	30,1	30,1	6,88	8,16	9,41	6,56	7,40	9,21
		30,3	30,3	9,51	10,85	10,85	9,57	9,68	10,61
		30,1	30,1	11,00	10,12	9,31	10,82	10,26	9,28
		30,3	30,3	8,89	7,04	6,79	8,79	7,27	7,06

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Medidas muestra 2.2**

MUESTRA 2.2									
Peso		Distancia		Espesores					
Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco			Húmedo		
Lb	Lb	cm	cm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1,65	1,65	30,3	30,3	9,70	9,95	11,14	9,70	9,95	11,14
		30,5	30,5	10,12	12,45	12,47	10,12	12,45	12,47
		30,3	30,3	12,52	10,01	9,25	12,52	10,01	9,25
		30,5	30,5	10,28	11,8	9,87	10,28	11,8	9,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Medidas muestra 2.3**

MUESTRA 2.3									
Peso		Distancia		Espesores					
Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco			Húmedo		
Lb	Lb	cm	cm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1,65	1,65	30,3	30,3	8,78	7,63	8,49	8,56	7,60	8,63
		30,4	30,4	7,46	8,62	8,52	7,16	8,87	8,62
		30,3	30,3	7,52	8,87	9,85	7,32	8,63	9,93
		30,4	30,4	9,62	8,93	9,37	9,72	8,45	9,03

Fuente: elaboración propia.

9.3.6. Ensayo de penetración

Los datos obtenidos en este ensayo, se tabularon de tal forma que puedan ser analizados en base a las normas.

Tabla XIV. **Lecturas de penetración Janka**

Carga (kgs)	Bola Janka
	Penetración (mm)
0	0,00
7	0,00
14	0,00
21	0,00
28	1,00
35	1,00
42	1,00
49	2,00
57	2,00
64	2,00
71	2,00
78	2,00
85	2,00
92	2,00
99	2,00
106	3,00
113	3,00
120	3,00
127	3,00
134	3,00
141	4,00
148	4,00
155	4,00
163	5,00
170	5,00

Fuente: elaboración propia.

9.3.7. Ensayo de desgarro al tornillo

Los datos obtenidos en este ensayo, se tabularon de tal forma que puedan ser analizados en base a las normas.

Tabla XV. **Carga a desgarre**

Tensión al tornillo	
Muestra	Carga (kg)
2.1 S	341
2.2 S	330

Fuente: elaboración propia.

9.3.8. Ensayo de temperatura

Los datos obtenidos en este ensayo, se tabularon de tal forma que puedan ser analizados en base a las normas.

Tabla XVI. **Datos temperatura**

Tiempo (min)	2.1 S		AMBIENTE 2.1 S		2.2 S		AMBIENTE 2.2 S	
	Encima	Debajo	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Encima	Debajo	Humedad (%)	Temperatura (°C)
0	19,3	19,5	67	22	19,5	19,3	83	21,9
15	38,2	32,7			35,3	31,8		
30	43,1	38,1			41,8	36,2		
45	43,7	39,0			43,9	40,2		
60	48,3	40,9	54	24,8	46,8	40,7	69	24,3
75	48,8	41,2			47,8	41,6		
90	50,3	45,3			49,3	43,9		
105	41,7	44,8			50,5	45,4		
120	53,1	46,2	48	27,3	52,2	46,5	63	26,8
135	56,5	47,8			52,8	46,8		
150	55,6	49,6			54,3	47,1		
165	57,0	50,0			54,6	47,3		
180	57,2	50,8	42	29,3	54,7	48,9	56	28,2

Fuente: elaboración propia.

9.3.9. Ensayo de ruido

Los datos obtenidos en este ensayo, se tabularon de tal forma que puedan ser analizados en base a las normas.

Tabla XVII. **Medidas de ruido 2.1 S**

2.1 S			
	1	2	3
Ubicación de la medida del ruido	Db	Db	Db
Ambiente	39,5	38,8	43,1
Sonido externo	83,5	85,7	84,5
Sonido interno sobre tablero	109,0	110,8	110,4
Sonido interno debajo tablero	94,1	92,7	95,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Medidas de ruido 2.2 S**

2.2 S			
	1	2	3
Ubicación de la medida del ruido	Db	Db	Db
Ambiente	44,5	43,6	42,6
Sonido externo	81,9	89,3	80,7
Sonido interno sobre tablero	109,1	109,1	111,8
Sonido interno debajo tablero	95,3	95,8	95,4

Fuente: elaboración propia.

9.4. Cálculos efectuados

Los cálculos se realizaron en base a las normas correspondientes a cada ensayo.

9.4.1. Ensayo de flexión

- Esfuerzo a la flexión

$$\sigma = \frac{3Pl}{2ab^2}$$

Donde:

σ = esfuerzo a la flexión (kg/cm²)

P = carga puntual (kg)

l = luz libre entre apoyos inferiores (cm)

a = ancho de la muestra (cm)

b = espesor de la muestra (cm)

- Deformación real

$$Def_{real} = Def_{inicial} - Def_{final}$$

Donde:

Def_{real} = es la resta de la deformación inicial y la deformación final (cm)

$Def_{inicial}$ = deformación inicial de la muestra según su curvatura (cm)

Def_{final} = deformación correspondiente a cada carga aplicada a la muestras (cm)

9.4.2. Ensayo de impacto

- Velocidad

$$v = \sqrt{2gh}$$

Donde:

v = velocidad (m/s)

g = gravedad (m/s²)

h = altura (m)

- Energía de choque

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Donde:

E_c = energía de choque (Joules)

m = masa (kg)

v = velocidad (m/s)

9.4.3. Ensayo de pesos volumétricos

- Promedio

$$\text{Promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

Promedio = valor promedio de una sucesión de datos

i = dato i – ésimo

n = total de datos

- Volumen

$$V = l * a * e$$

Donde:

V = volumen (cm³)

l = largo de la muestra (cm)

a = ancho de la muestra (cm)

e = espesor de la muestra (cm)

- Densidad

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

$\rho = \text{volumen (g/cm}^3\text{)}$

$m = \text{masa (g)}$

$V = \text{volumen (cm}^3\text{)}$

- Porcentaje de absorción

$$\%A = \left(\frac{w_h - w_s}{w_s} \right) * 100$$

Donde:

$\%A = \text{porcentaje de absorción(\%)}$

$w_h = \text{peso saturado (g)}$

$w_s = \text{peso seco (g)}$

- Porcentaje de humedad

$$\%H = \left(\frac{w_n - w_s}{w_s} \right) * 100$$

Donde:

$\%H = \text{porcentaje de humedad(\%)}$

$w_n = \text{peso natural (g)}$

$w_s = \text{peso seco (g)}$

9.4.4. Ensayo de erosión acelerada

- Promedio

$$\text{Promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

Promedio = valor promedio de una sucesión de datos

i = dato i – ésimo

n = total de datos

- Volumen

$$V = l * a * e$$

Donde:

V = volumen (cm³)

l = largo de la muestra(cm)

a = ancho de la muestra(cm)

e = espesor de la muestra (cm)

- Densidad

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

$\rho = \text{volumen (g/cm}^3\text{)}$

$m = \text{masa (g)}$

$V = \text{volumen (cm}^3\text{)}$

- Porcentaje de absorción

$$\%A = \left(\frac{w_h - w_s}{w_s} \right) * 100$$

Donde:

$\%A = \text{porcentaje de absorción(\%)}$

$w_h = \text{peso saturado (g)}$

$w_s = \text{peso seco (g)}$

- Porcentaje de humedad

$$\%H = \left(\frac{w_n - w_s}{w_s} \right) * 100$$

Donde:

$\%H = \text{porcentaje de humedad(\%)}$

$w_n = \text{peso natural (g)}$

$w_s = \text{peso seco (g)}$

9.4.5. Ensayo de temperatura

- Promedio

$$\text{Promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

Promedio = valor promedio de una sucesión de datos

i = dato i – ésimo

n = total de datos

9.4.6. Ensayo de ruido

- Promedio

$$\text{Promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

Promedio = valor promedio de una sucesión de datos

i = dato i – ésimo

n = total de datos

9.5. Resultados

Con los resultados de ensayo se determinó las características y propiedades del material.

9.5.1. Ensayo de desgaste

Las muestras soportaron de manera eficiente el desgaste producido por la carga móvil equivalente a 90kg de peso, distribuida en una serie de dientes de madera dura. No se presentó ningún hundimiento en el material, sino una marca superficial sin profundidad.

Figura 73. Ensayo de desgaste



Partes: a) Muestra en el momento del ensayo de desgaste; b) Muestras después de las 50 pasadas del rodillo dentado en el ensayo de desgaste.

9.5.2. Ensayo de flexión

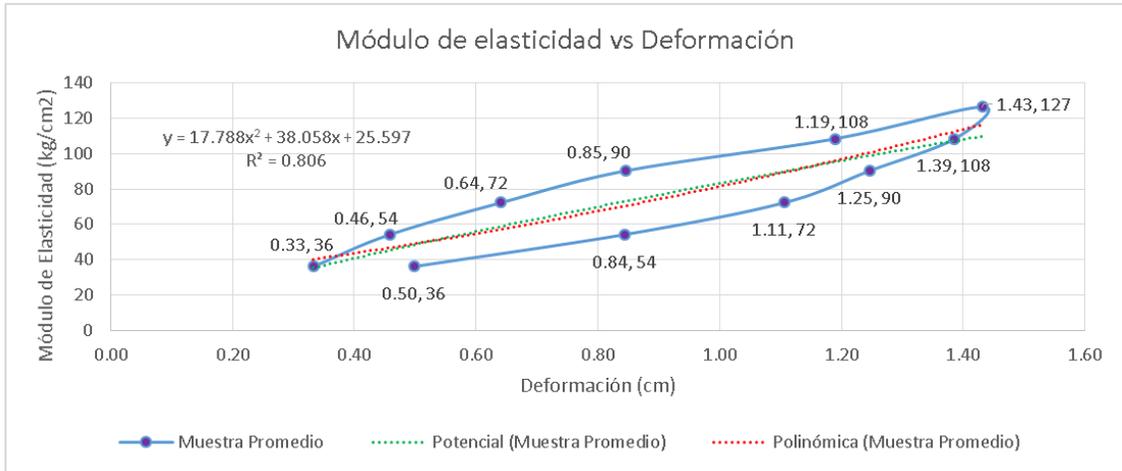
Los resultados del ensayo se obtuvieron del análisis de los datos obtenidos de cada ensayo.

Tabla XIX. **Esfuerzos y deformaciones**

Carga (kg)	Esfuerzo de flexión (kg/cm ²)	Deformación real (cm) PROMEDIO
18	36	0,33
27	54	0,46
36	72	0,64
45	90	0,85
54	108	1,19
62	127	1,43
54	108	1,39
45	90	1,25
36	72	1,11
27	54	0,84
18	36	0,50

Fuente: elaboración propia.

Figura 74. **Módulo de elasticidad vs deformación**



Fuente: elaboración propia.

9.5.3. **Ensayo de impacto**

Los resultados del ensayo se obtuvieron del análisis de los datos obtenidos de cada ensayo.

Tabla XX. **Capacidad de energía**

Capacidad de energía promedio	
Muestra	Energía (N*m = J)
SISTEMA DE TECHO	12

Fuente: elaboración propia.

9.5.4. Ensayo de pesos volumétricos

Los resultados del ensayo se obtuvieron del análisis de los datos obtenidos de cada ensayo.

Tabla XXI. **Resultados húmedo 2.1.1**

MUESTRA 2.1.1					
VOLUMEN		Porcentaje de absorción	Porcentaje de humedad	DENSIDAD	
SECO	HÚMEDO			SECO	HÚMEDO
cm ³	cm ³	(%)	(%)	g/cm ³	g/cm ³
92,72	91,92	1,11	0,04	0,89	0,91

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Resultados húmedo 2.2.1**

MUESTRA 2.2.1					
VOLUMEN		Porcentaje de absorción	Porcentaje de humedad	DENSIDAD	
SECO	HÚMEDO			SECO	HÚMEDO
cm ³	cm ³	(%)	(%)	g/cm ³	g/cm ³
91,45	91,31	2,51	0,07	0,88	0,91

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Resultados húmedo 2.3.1

MUESTRA 2.3.1					
VOLUMEN		Porcentaje de absorción	Porcentaje de humedad	DENSIDAD	
SECO	HÚMEDO			SECO	HÚMEDO
cm ³	cm ³	(%)	(%)	g/cm ³	g/cm ³
101,74	100,18	1,13	0,06	0,85	0,88

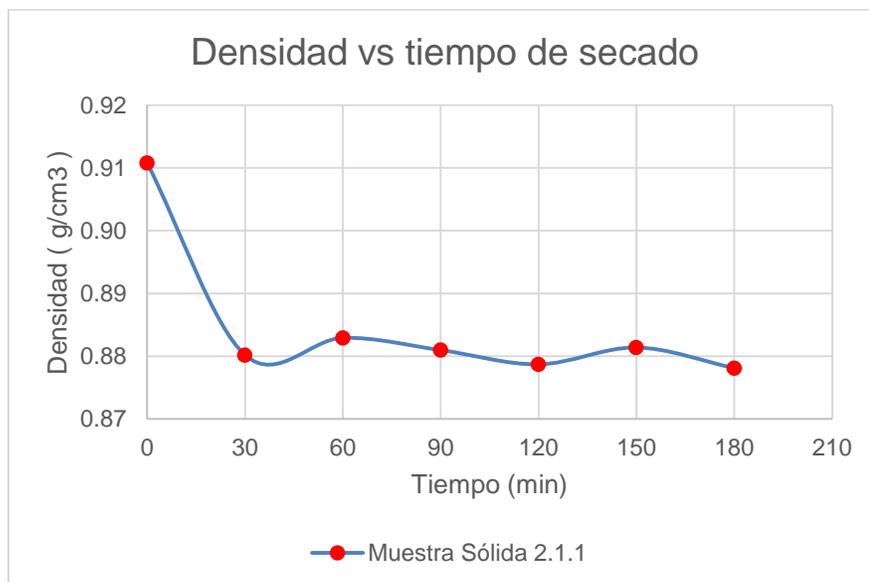
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Resultados secado 2.1.1

MUESTRA 2.1.1			
Tiempo	Peso	Volumen	Densidad
Secado	Seco		
min	g	cm ³	g/cm ³
30	83,06	94,37	0,88
60	82,96	93,96	0,88
90	82,88	94,08	0,88
120	82,85	94,29	0,88
150	82,8	93,94	0,88
180	82,77	94,26	0,88

Fuente: elaboración propia.

Figura 75. **Secado muestra 2.1.1**



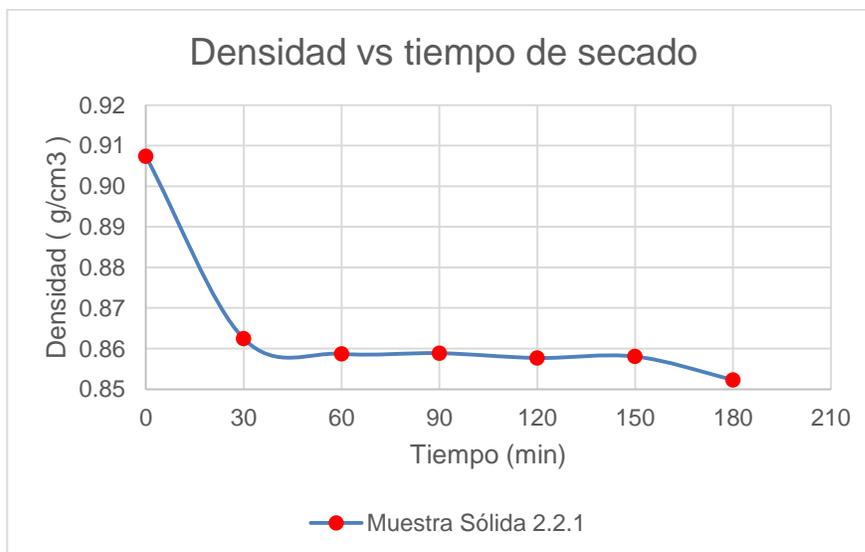
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Resultados secado 2.2.1**

MUESTRA 2.2.1			
Tiempo	Peso	Volumen	Densidad
Secado	Seco		
min	g	cm ³	g/cm ³
30	81,62	94,01	0,86
60	81,37	94,13	0,86
90	81,02	93,71	0,86
120	80,92	93,72	0,86
150	80,79	93,53	0,86
180	80,76	94,12	0,85

Fuente: elaboración propia.

Figura 76. **Secado muestra 2.2.1**



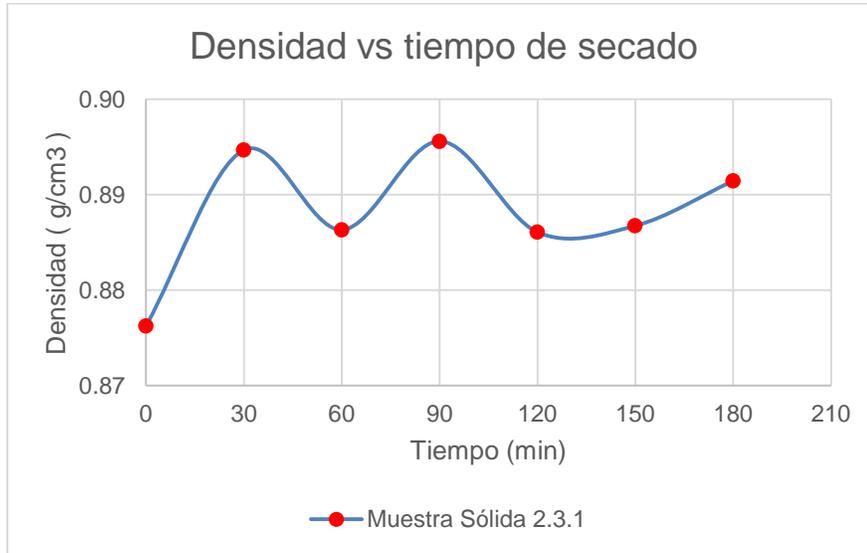
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Resultados secado 2.3.1**

MUESTRA 2.3.1			
Tiempo	Peso	Volumen	Densidad
Secado	Seco		
min	g	cm ³	g/cm ³
30	86,99	93,48	0,89
60	86,9	94,26	0,89
90	86,83	93,21	0,90
120	86,79	94,17	0,89
150	86,77	94,08	0,89
180	86,75	93,56	0,89

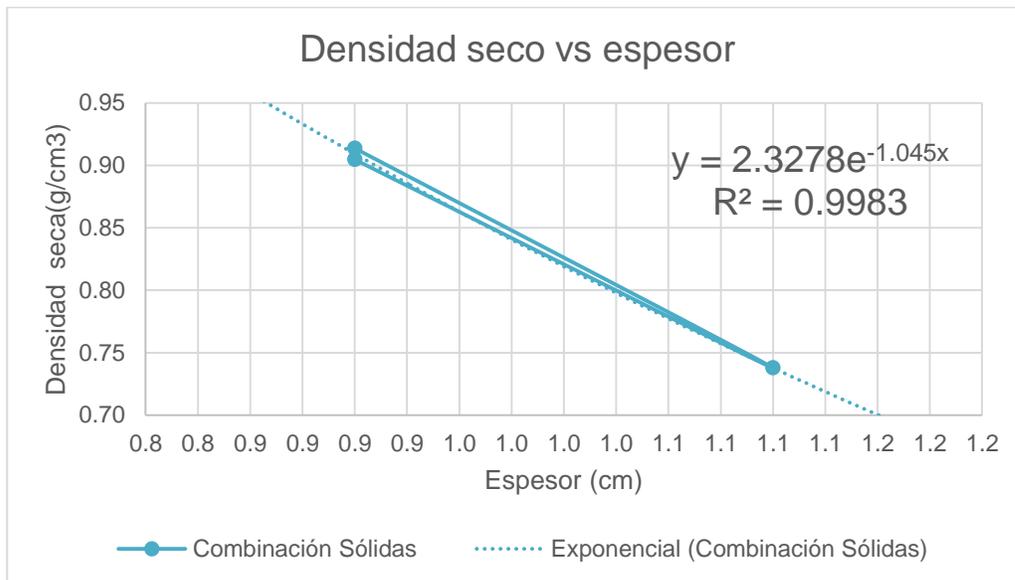
Fuente: elaboración propia.

Figura 77. **Secado muestra 2.3.1**



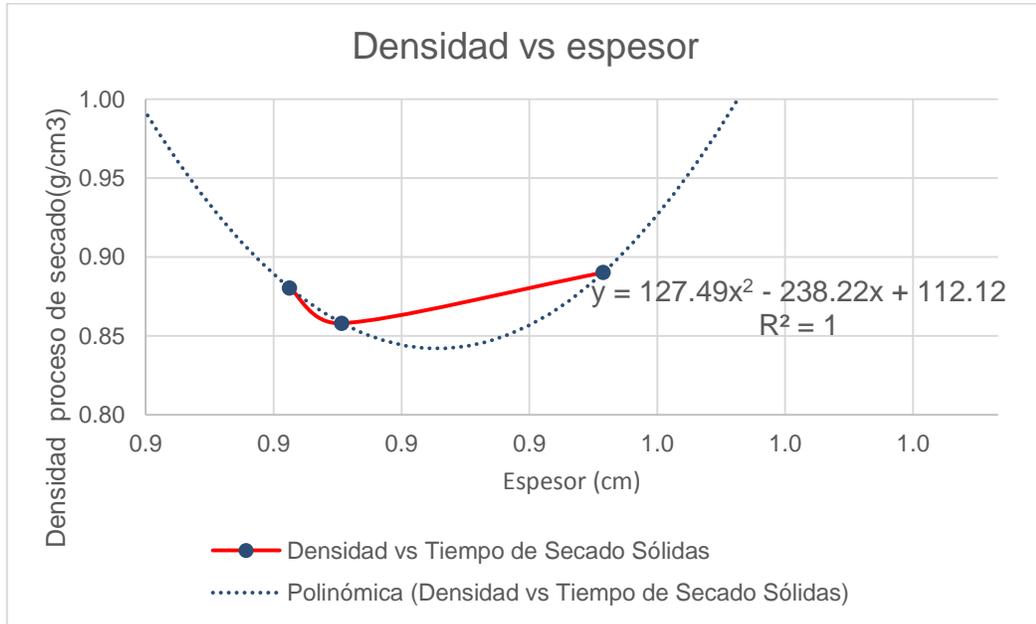
Fuente: elaboración propia.

Figura 78. **Densidad seca vs espesor**



Fuente: elaboración propia.

Figura 79. **Densidad proceso de secado vs espesor**



Fuente: elaboración propia.

9.5.5. Ensayo de erosión acelerada

Los resultados del ensayo se obtuvieron del análisis de los datos obtenidos de cada ensayo.

Tabla XXVII. **Erosión muestra 2.1**

MUESTRA 2.1				
VOLUMEN		Porcentaje de absorción (%)	DENSIDAD	
SECO cm3	HÚMEDO cm3		SECO g/cm3	HÚMEDO g/cm3
820,83	820,83	0,00	0,91	2,13

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Erosión muestra 2.2**

MUESTRA 2.2				
VOLUMEN		Porcentaje de absorción	DENSIDAD	
SECO	HÚMEDO		SECO	HÚMEDO
cm ³	cm ³	(%)	g/cm ³	g/cm ³
1016,57	1016,57	0,00	0,74	1,72

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Erosión muestra 2.3**

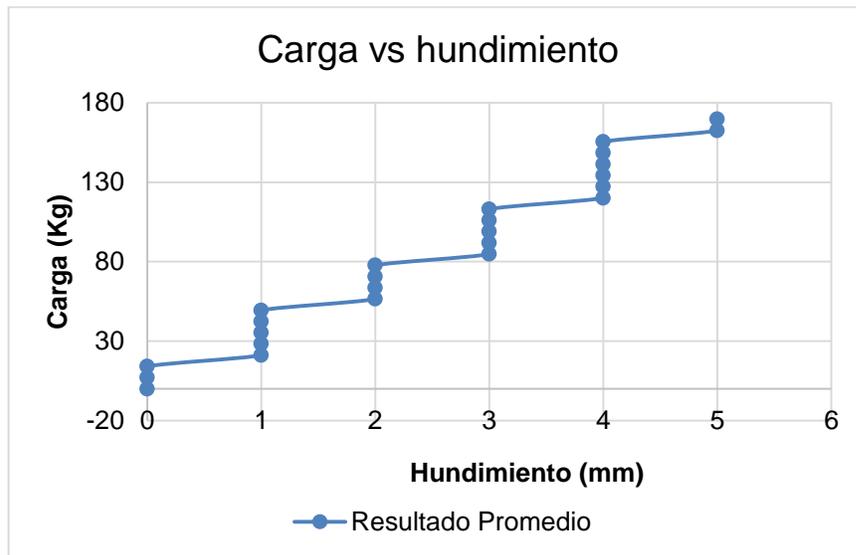
MUESTRA 2.3				
VOLUMEN		Porcentaje de absorción	DENSIDAD	
SECO	HÚMEDO		SECO	HÚMEDO
cm ³	cm ³	(%)	g/cm ³	g/cm ³
829,01	829,01	0,00	0,90	2,11

Fuente: elaboración propia.

9.5.6. Ensayo de penetración

Los resultados del ensayo se obtuvieron del análisis de los datos obtenidos de cada ensayo.

Figura 80. Resultados de dureza



Fuente: elaboración propia.

9.5.7. Ensayo de desgarro al tornillo

Los resultados del ensayo se obtuvieron del análisis de los datos obtenidos de cada ensayo.

Tabla XXX. Desgarro al tornillo

Tensión al tornillo	
Muestra	Carga (kg)
2.1 S	341
2.2 S	330

Fuente: elaboración propia.

9.5.8. Ensayo de temperatura

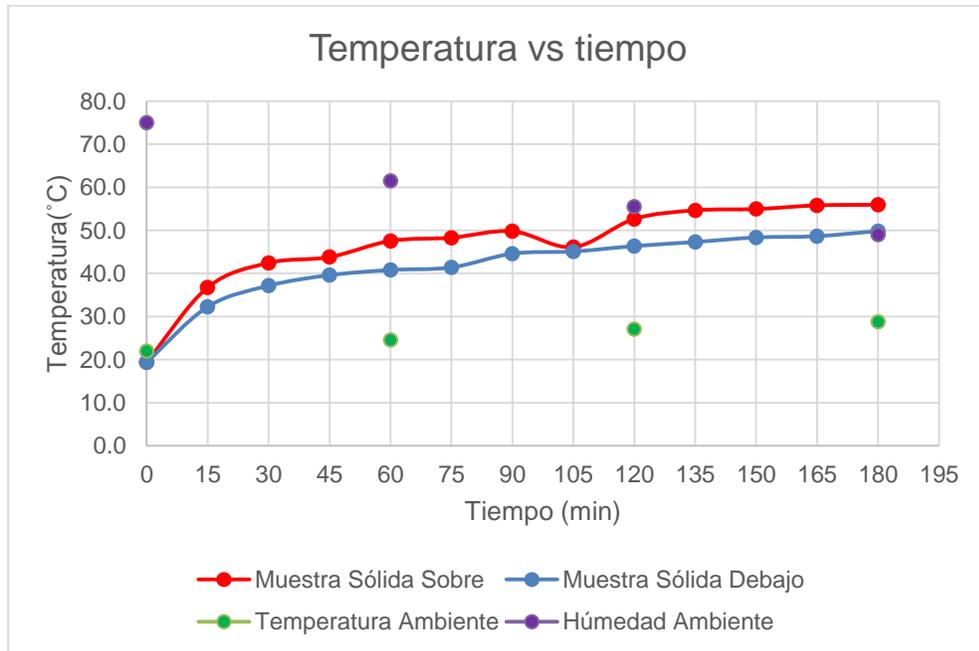
Los resultados del ensayo se obtuvieron del análisis de los datos obtenidos de cada ensayo.

Tabla XXXI. **Temperaturas promedio**

Tiempo (min)	Temperatura en la muestra		Datos del ambiente	
	Encima (°C)	Debajo (°C)	Humedad (%)	Temperatura (°C)
0	19,4	19,4	75,0	22,0
15	36,8	32,3		
30	42,5	37,2		
45	43,8	39,6		
60	47,6	40,8	61,5	24,6
75	48,3	41,4		
90	49,8	44,6		
105	46,1	45,1		
120	52,7	46,4	55,5	27,1
135	54,7	47,3		
150	55,0	48,4		
165	55,8	48,7		
180	56,0	49,9	49,0	28,8

Fuente: elaboración propia.

Figura 81. Temperatura vs tiempo



Fuente: elaboración propia.

9.5.9. Ensayo de ruido

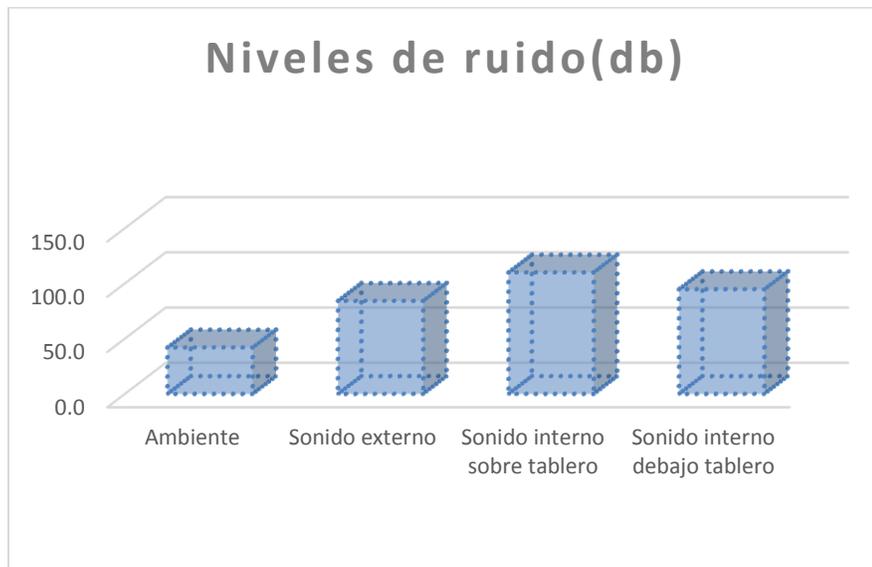
Los resultados del ensayo se obtuvieron del análisis de los datos obtenidos de cada ensayo.

Tabla XXXII. Medidas promedio de ruido

Ubicación de la medida de ruido	Ruido
	(Db)
Ambiente	42,0
Sonido externo	84,3
Sonido interno sobre tablero	110,0
Sonido interno debajo tablero	94,8

Fuente: elaboración propia.

Figura 82. **Niveles de ruido**



Fuente: elaboración propia.

9.6. **Análisis de resultados**

El análisis de los resultados permite determinar las características físicas y propiedades mecánicas del material a ensayar.

9.6.1. **Ensayo de desgaste**

La muestra no presentó ningún hundimiento en su superficie, a pesar de recibir la carga mediante el rodillo dentado. Lo que indica una buena resistencia ante cargas en movimiento.

9.6.2. **Ensayo de flexión**

El material presenta un buen comportamiento elástico, y gran capacidad de recuperación después de ser sometido a una carga. El bagazo y la cachaza de caña le brindan características especiales para la resiliencia del material.

9.6.3. Ensayo de impacto

En el ensayo se instaló la muestra simulando una instalación en techo, debido a que se tenía que evaluar la capacidad del polipropileno a tensión, las propiedades que el bagazo y la cachaza de caña le brindan a la muestra, para absorber la energía de impacto. Se realizó el ensayo con la mayor altura posible en el aparato de impacto y el material fue capaz de absorber la energía de impacto y devolver dicha energía a la bala que le impactó. Ya que en la muestras no se observó ningún daño ocasionado por el impacto de la bala.

9.6.4. Ensayo de pesos volumétricos

Las muestras del prototipo mostraron un porcentaje de absorción en promedio no supera el 1,58% y su porcentaje de humedad en promedio no supera el 0,06%. Esto debido a que la muestra está prácticamente confinada por el polipropileno, que tiene la propiedad de ser impermeable.

Luego del ensayo de secado la muestra estabiliza su densidad en estado natural, siendo aproximadamente de $0,86 \text{ g/cm}^3$. El resultado gráfico muestra que el rango de espesores puede variar entre 9 - 11 milímetros. Considerando que el equipo utilizado en estos ensayos es algo limitado, pero debido a las virtudes del polipropileno, pueden trabajarse espesores menores a los 9 milímetros.

9.6.5. Ensayo de erosión acelerada

La muestra no presentó ninguna variación significativa en sus dimensiones y tampoco en su peso, es decir, no se produjo un hinchamiento ni erosión del material. En la inspección visual se determinó que no existe desgaste alguno.

9.6.6. Ensayo de penetración

En cada milímetro de penetración se evidencia que la dureza del material aumenta de manera gradual y a mayor profundidad de penetración mayor dureza presenta el material. Lo que indica que es un prototipo que tiene una distribución idónea de los materiales que lo componen y puede comportarse de manera estable, ante la presencia de una carga de puntual.

9.6.7. Ensayo de desgarró al tornillo

El prototipo tiene una gran capacidad a la tensión debido al polipropileno, una de sus virtudes es su capacidad de rigidizarse ante la presencia de fuerzas laterales. Y es debido al espesor de la muestra, que la sección que fue perforada por el tornillo tiende a rigidizarse y soportar grandes cargas laterales.

9.6.8. Ensayo de temperatura

La temperatura sobre el prototipo y debajo del mismo, registra una diferencia de hasta 7°C, es decir, este material permite ese valor de aislamiento térmico.

9.6.9. Ensayo de ruido

El ruido sobre el prototipo y debajo del mismo, registra una diferencia de hasta 16 *Db*, es decir, este material permite ese valor de aislamiento acústico. Esto se debe a los finos dentro del material y el bagazo de caña.

CONCLUSIONES

1. La combinación de los materiales sintéticos y orgánicos pueden ser utilizados en forma estructural.
2. La densidad del material oscila entre los 0,84 y 0,91 g/cm^3 , debido a que se encuentra compuesto mayormente de polipropileno de baja densidad, que permite ser un elemento liviano.
3. Las características hidrofóbicas del polipropileno, permite ser un elemento con una estabilidad dimensional, incluso en ambientes altamente húmedos.
4. La unión entre un material sintético y uno orgánico, se debe a la incorporación de la anhidrita tipo II, cuya estructura cristalina permite el enlace molecular entre ambos materiales.
5. El prototipo es capaz de resistir los efectos de los distintos meteoros atmosféricos, debido a su alta resistencia al impacto y su capacidad para absorber la energía cinética transmitida por el cuerpo de impacto.
6. La distribución del bagazo y la cachaza de caña, sirven como un amortiguamiento ante las distintas sollicitaciones de esfuerzo, como se muestra en los ensayos de flexión e impacto.

7. El desgaste del material debido a la acción abrasiva de los elementos sólidos transportados por el viento, es mínimo gracias a la impermeabilidad del polipropileno y su resistencia al impacto.
8. La inclinación del material al ser utilizado como techo, permite drenar el agua de lluvia.
9. El prototipo permite un aislamiento térmico tal que reduce la temperatura en un equivalente de 7°C respecto a las dos caras del mismo y un aislamiento acústico con reducción de hasta 16 Db .
10. La incorporación en techos inclinados permite la acción del aislamiento térmico, acústico y evitar la erosión, debido a que los meteoros no actúan de forma perpendicular a dichos techos.
11. Las aplicaciones del material pueden ser diversas, esto se comprueba con el ensayo de desgaste ante cargas móviles ya que las marcas en el material no tienen profundidad alguna, a pesar de las cincuenta repeticiones de ida y vuelta, teniendo una carga equivalente a los 90kg .
12. El ensayo de penetración indica que el prototipo puede utilizarse en ambientes expuestos a cargas que producen fatiga en el material, siempre en cuanto este trabaje como una alternativa de protección para otros materiales de construcción civil.

13. El valor correspondiente a la elasticidad del material reporta 90 kg/cm^2 para una deflexión de 8,5 mm, que trabaja en su zona elástica, que le permite recuperar su forma original cesada la excitación que provoca esta carga. Lo que se considera un elemento con buen comportamiento elástico.

14. La dosificación del material se determinó de manera experimental, siendo la más idónea aquella que contenga el 5,66% de cachaza de caña molida, 5,66% de anhidrita tipo II, 9,43% de bagazo y 79,25% de polipropileno. Con esta proporción se logra reutilizar estos residuos y darles un uso constructivo.

RECOMENDACIONES

1. Para prolongar la vida útil del material es necesario agregar absorbedores de luz ultravioleta y así reforzar las características físicas y propiedades mecánicas del polipropileno.
2. Para reducir la densidad del material, puede aumentarse la cantidad de bagazo en la mezcla, siempre en cuanto se reduzca el tamaño de las fibras de bagazo y así pueda obtenerse una mezcla que permita la introducción de polipropileno entre los materiales.
3. Debe tenerse el cuidado de manejar el espesor adecuado en las capas de polipropileno lo suficientemente para resistir el desgaste producido por los meteoros climáticos.
4. La anhidrita tipo II debe mezclarse con la cachaza de caña molida, en estado seco, este último depende de la anhidrita para poder adherirse al bagazo de caña, logrando así una combinación que permita el enlace interno entre los materiales componentes del prototipo.
5. Para resistir los meteoros atmosféricos, debe tenerse polipropileno en las caras externas del prototipo, para aprovechar las características físicas y propiedades mecánicas del mismo.

6. El bagazo y la cachaza de caña, deben distribuirse en la parte central del prototipo, que sirven como un amortiguamiento ante las distintas sollicitaciones de esfuerzo.
7. Las propiedades mecánicas del polipropileno permite resistir el impacto y rodamiento de cada uno de los elementos sólidos transportados por el viento.
8. La inclinación del prototipo debe tener como mínimo un 10% de pendiente, para lograr que el desgaste del material sea casi nulo ante el desplazamiento del agua sobre la superficie del prototipo.
9. Se debe utilizar absorbedores de luz ultravioleta para prolongar el tiempo de vida útil del material, el polipropileno tiende a fragilizarse conforme el tiempo de exposición ante los rayos ultravioletas, por lo que debe realizarse un estudio del comportamiento del material al ser expuesto a la radiación del sol durante un largo periodo de tiempo.
10. Para aumentar la capacidad de aislamiento térmico y acústico, debe realizarse una distribución de los materiales de tal manera de que puedan formarse capas de polipropileno que sean independientes a las capas de bagazo y cachaza de caña, para cumplir con el concepto de termodinámica en espacios encerrados.
11. Para que el material sea resistente al desgaste provocado por cargas móviles, debe proveerse de suficiente polipropileno en la cara de contacto con dichas cargas.

12. El prototipo puede ser utilizado como un recubrimiento para otros materiales en el ámbito de construcción civil, siempre en cuanto cumpla con el objetivo de brindar protección a dichos materiales. Siendo el área predilecta, aquella que esté en constante contacto con el agua.
13. Para lograr que el material sea lo suficientemente elástico, se tiene que realizar una distribución de materiales de tal manera que el polipropileno sea el material predominante, cuya capacidad de recuperación se complemente con el amortiguamiento que le brinda el bagazo y la cachaza de caña. Separando por capas independientes a cada uno de los materiales.
14. En la dosificación debe procurarse que la cantidad utilizada de anhidrita tipo II y la cachaza de caña molida, sean iguales para que al sumarse, estas no superen a la cantidad utilizada de bagazo de caña en un porcentaje equivalente al 20% del mismo. Y así lograr que esta mezcla se adhiera de manera correcta al polipropileno.
15. Las piezas de plástico reforzado expuestas a la intemperie, deben someterse a un mantenimiento periódico, consistente en limpieza y encerado.

BIBLIOGRAFÍA

1. AC, Gerson. *Propuesta de techo de bambú con ferrocemento para viviendas unifamiliares*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2016. 111 p.
2. CENGICAÑA. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. Guatemala. Litografías Modernas S.A., 2014. 512 p.
3. ————. *Eventos históricos y logros*. Guatemala, 1992-2017. 105 p.
4. ————. *Guía de Buenas Prácticas Agrícolas en Caña de Azúcar*. Guatemala, 2017. 84 p.
5. ————. *Guía para determinar y reducir pérdidas de energía en generadores de vapor*. Guatemala, 2015. 76 p.
6. ————. *Informe Anual 2015-2016*. Guatemala, 2017. 178 p.
7. ————. *Informe Anual 2016-2017*. Guatemala, 2018. 197 p.
8. ————. *Presentación de resultados de investigación. Zafra 2016-2017*. Guatemala, 2017. 658 p.

9. COYOY, Ana. *Formulación de un material fibroreforzado a base de mezcla cáscara de coco y polímero reciclado*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 84 p.
10. GARCÍA, Alfonso. *Comportamiento Mecánico de Yeso Reforzado con Polímeros Sintéticos*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, 1988. 506 p.
11. GARCÍA, Juan. *Vivienda Bioclimática en San José Pinula*. Trabajo de graduación de Arquitectura. Universidad del Istmo, Facultad de Arquitectura y Diseño, 2010. 212 p.
12. Instituto Mexicano del Plástico Industrial. *El Mundo de Los Plásticos*. México: MPI, 1997. 486 p.
13. MORALES, Erwin. *Evaluación del efecto de cachaza, nitrógeno y fósforo en caña de azúcar (Sacharumm officinarum L.), en el conjunto de suelos tonquín (Lithic Hpludands), Finca Pantaleón, Siquinala, Escuintla*. Trabajo de graduación de Ing. Agrónomo. Universidad de San Carlos de Guatemala, 1999. 49 p.
14. PARRILLA, Felipe. 1998. Resinas Poliéster, *Plásticos Reforzados*. México. 1998, 359 p.
15. PUAC, Octavio. *Opciones de Techos Para Vivienda en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1996. 139 p.

16. REIN, Peter. *Ingeniería de la Caña de Azúcar*. Berlin: Lückhoffstr, 2012.
879 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Clarificador de meladura



Fuente: Ingenio azucarero de Guatemala.

Apéndice 2. Melador



Fuente: Ingenio azucarero de Guatemala.

Apéndice 3. Mezcladores



Fuente: Ingenio azucarero de Guatemala.

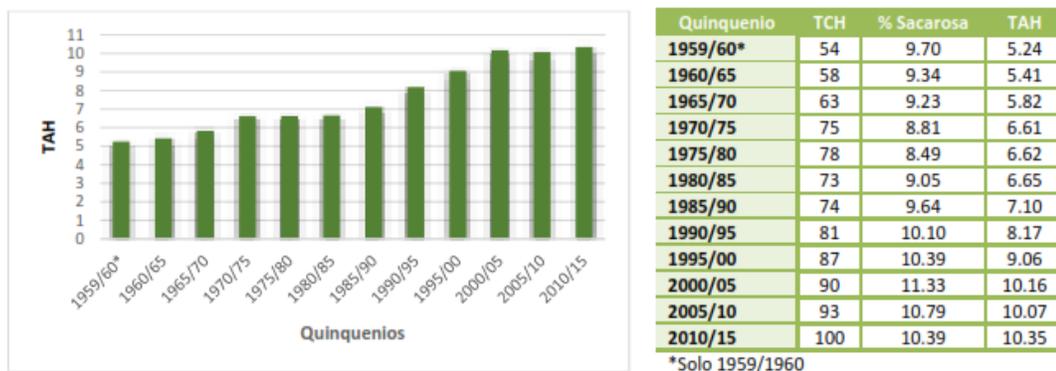
Apéndice 4. Filtro rotativo para lodos (cachaza de caña)



Fuente: Ingenio azucarero de Guatemala.

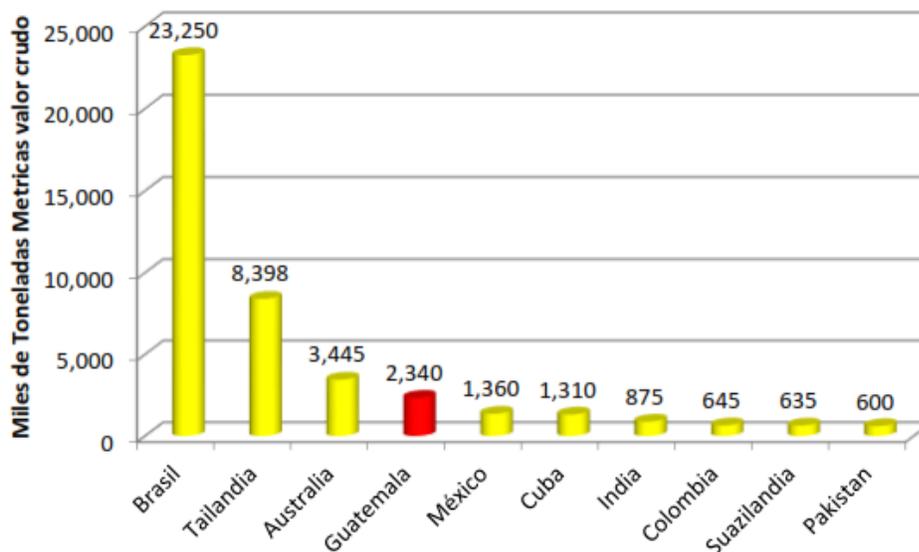
ANEXOS

Anexo 1. Rendimiento de azúcar/TAH 1960-2015



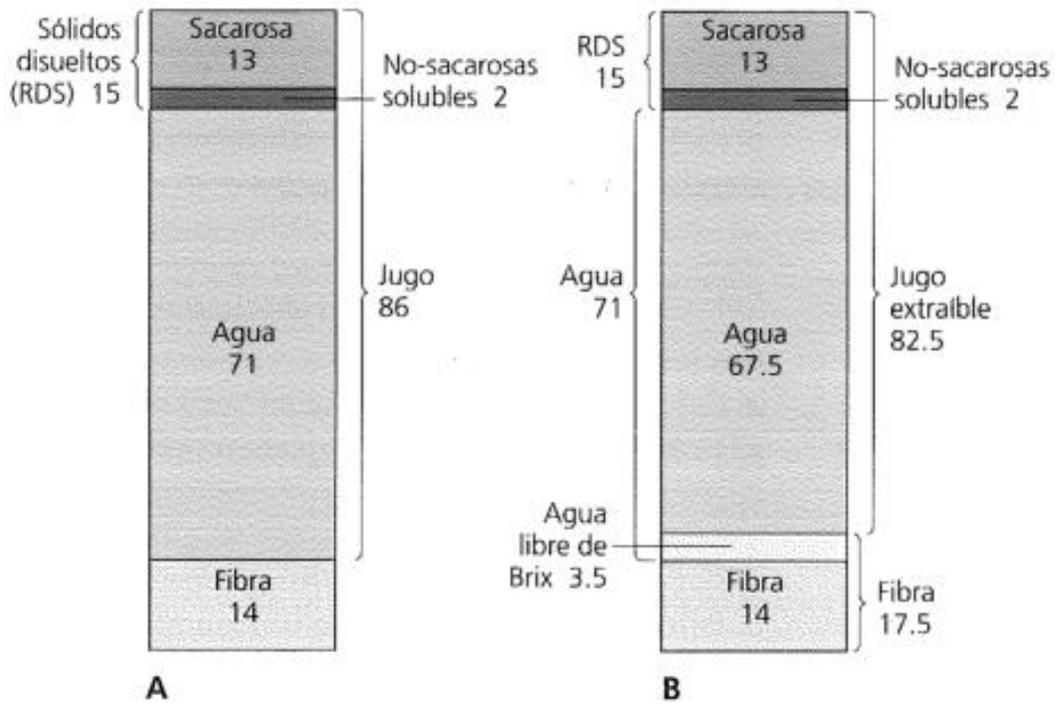
Fuente: CENGICAÑA. *Eventos históricos y logros*. p. 12.

Anexo 2. Principales exportadores (10) de azúcar a nivel mundial zafra 2014/15



Fuente: CENGICAÑA. *Eventos históricos y logros*. p. 15.

Anexo 3. Representación de la caña. A) Por componentes; B) Con agua libre de Brix ilustrada, los números representan fracciones de masa $g/100g$ de caña



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 44.

Anexo 4. Desmedulado de bagazo

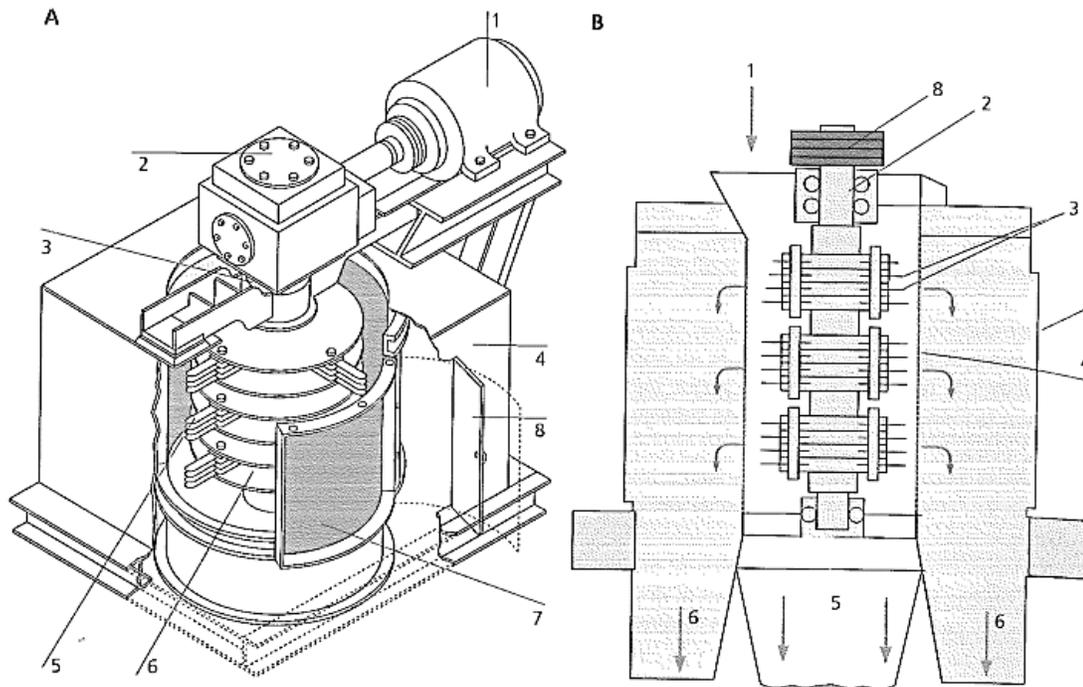


Figura 26.10: Máquinas desmeduladoras de bagazo

A Peadco: 1 Motor con soporte inferior estándar; 2 Transmisión de engranaje cónico espiral; 3 Sistema de lubricación; 4 Carcasa y base de montaje; 5 Martillos con filo endurecido; 6 Rotor balanceado; 7 Malla cilíndrica perforada; 8 Compuerta de acceso

B Pallman: 1 Alimentación de bagazo; 2 Rotor; 3 Martillos; 4 Malla cilíndrica perforada; 5 Descarga de fibra; 6 Descarga de médula; 7 Carcasa; 8 Polea de accionamiento

Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 706.

