



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: DISEÑO Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA
MODULAR PARA CONFORMACIÓN DE MUEBLES DE
OFICINA A BASE DE CARTÓN CORRUGADO**

AUTORES: EGAS CASTILLO RENATO MARTIN

PEREZ IPIALES CARLOS JOSE

DIRECTOR: ING. NARVAEZ MUÑOZ CHRISTIAN PATRICIO

SANGOLQUI

2016



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACION

Certifico que el trabajo de titulación "**DISEÑO Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA MODULAR PARA CONFORMACIÓN DE MUEBLES DE OFICINA A BASE DE CARTÓN CORRUGADO**" realizado por los señores **EGAS CASTILLO RENATO MARTIN** y **PEREZ IPIALES CARLOS JOSE**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **EGAS CASTILLO RENATO MARTIN** y **PEREZ IPIALES CARLOS JOSE** para que lo sustenten públicamente

Sangolquí, 22 de julio del 2016

Atentamente

Ing. Christian Narváez



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **RENATO MARTIN EGAS CASTILLO**, con cédula de identidad N°1717473225 y yo, **JOSE CARLOS PEREZ IPIALES**, con cédula de identidad N° 1714004858, declaramos que este trabajo de titulación "**DISEÑO Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA MODULAR PARA CONFORMACIÓN DE MUEBLES DE OFICINA A BASE DE CARTÓN CORRUGADO**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 22 de Julio del 2016

Sangolquí, 22 de Julio del 2016

JOSE CARLOS PEREZ IPIALES

CC: 1714004858

RENATO MARTIN EGAS CASTILLO

CC: 1717473225

DEDICATORIA

**ESPE**
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA****CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA****AUTORIZACIÓN**

Yo, **RENATO MARTIN EGAS CASTILLO**, con cédula de identidad N°1717473225 y yo, **JOSE CARLOS PEREZ IPIALES**, con cédula de identidad N° 1714004858, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "**DISEÑO Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA MODULAR PARA CONFORMACIÓN DE MUEBLES DE OFICINA A BASE DE CARTÓN CORRUGADO**" cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad

Sangolquí, 22 de Julio del 2016

RENATOMARTIN EGAS CASTILLO**JOSE CARLOS PEREZ IPIALES**

CC: 1717473225

CC: 1714004858

DEDICATORIA

``Cuando pones la proa visionaria hacia una estrella y tiendes el ala hacia tal excelsitud inasible, afanoso de perfección y rebelde a la mediocridad, llevas en ti el resorte misterioso de un ideal``

José Ingenieros

Con el fin de mostrar reciprocidad a los entes que me brindan su insondable amor celestial, y lograr que su orgullo hacia mi palpita como Aldebarán en una noche estrellada, este proyecto de titulación dedico a mis padres Mario Egas y Mary Castillo que nunca alejaron de mí su meliflua presencia de diáfano ejemplo, aun cuando el camino pudo haber sido áspero y vericuetos. Este día les pertenece porque soy el reflejo de sus ideales plasmado en su herencia a la sociedad, no me alcanzara la misma eternidad para mostrar mi agradecimiento hacia ellos.

Permítaseme dedicar este modesto proyecto de titulación a mis hermanos Emilio y Jonathan que en su majestuoso torbellino de conocimiento mi ideal se siente resguardo, este logro también es suyo.

Renato Martin Egas Castillo

AGRADECIMIENTOS

“ Solamente aquel que construye el futuro tiene derecho a juzgar el pasado.
”

Friedrich Nietzsche

Este proyecto no pudo ser, sin la ayuda de la virtud de hombres idealistas, de hombres cualitativos más o no cuantitativos, hombres con afán de liberarnos de las pesadas cadenas de la ignorancia, entes que conocen que el hombre vale por su saber y no por su parecer, a ellos les agradezco infinitamente, a ellos, mis maestros gestores de mi profesión, especialmente al ingeniero Christian Narváez por brindarnos su paciencia y conocimiento en este proyecto.

A mis amigos de vida y de aula que colmaron mi tiempo y espacio de momentos tan suntuosos de aventura y aprendizaje, ellos que empiezan junto a mi otra etapa de vida, les agradezco por la amistad anclada en la transparencia.

A mis tíos Ramiro Egas y Mario Lasso que su ejemplo y consejos cimentaron mis alas de Ícaro, que me impulsaron siempre a mantener mi mirada en el estrecho horizonte, los agradezco infinitamente.

Agradezco a mi tía Blanca Castillo que nunca seso su extensa preocupación por el bienestar de mi familia, a su corazón colmado de mucha bondad, gracias.

Renato Martin Egas Castillo

DEDICATORIA

Por haberme enseñado a jamás rendirme, por haberme demostrado que lo último que se pierde es el deseo de luchar y la fuerza de la determinación, este trabajo va dedicado a mi madre cuya verdad, cuyo corazón ha sido el más grande que he conocido y cuyas palabras resuenan aún en mi alma y lo harán hasta el día en el que mi alma haya recorrido su camino y mis ojos hayan de cerrarse. La pasión, que mi madre en mi niñez y mi hermano durante mi adolescencia me enseñaron, es aquello que mueve mi corazón hasta quedar sin fuerzas y tener que volverse a levantar sin remordimientos. Este trabajo se lo dedico también a mi padre que a pesar de todo su calvario y sus errores ha tenido la fuerza suficiente para ayudarme en mi trayecto y cuyo apoyo jamás se ha desvanecido. Mis palabras no bastan para agradecerle a mi hermano por su gran cariño y guía intelectual y espiritual, propio de una persona sabia que ha surgido desde el fuego más doloroso. Una especial dedicación al amor, ese sentimiento que es capaz de abrir ventanas en el cielo y que impulsa a un corazón a conquistar todo lo que se proponga.

José Carlos Pérez Ipiales

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre, mi padre y mi hermano por todos los momentos que me han brindado, por todo sacrificio, por toda enseñanza en el arduo camino de la vida, por haberme levantado cuando ya no tenía fuerzas y por haberme dado la ayuda suficiente para concluir ésta, la primera de mis metas.

José Carlos Pérez Ipiales

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMIENTOS..... | vi |
| DEDICATORIA | vii |
| RESUMEN..... | xx |
| ABSTRACT | xxi |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| 1.1 Introducción | 1 |
| 1.2 Antecedentes..... | 2 |
| 1.3 Definición del Proyecto | 3 |
| 1.4 OBJETIVOS | 4 |
| 1.4.1 Objetivo General | 4 |
| 1.4.2. Objetivos Específicos | 4 |
| 1.5 Justificación e Importancia..... | 5 |
| 1.6 ALCANCE DEL PROYECTO | 5 |
| CAPÍTULO II..... | 7 |
| 2.1. Generalidades | 7 |
| 2.1.1. Definición | 7 |
| 2.1.2. Componentes del cartón corrugado | 7 |
| 2.1.3. Tipos de cartón corrugado..... | 10 |
| 2.1.5. Aplicaciones | 13 |
| 2.1.6. Cartón Corrugado y Medio Ambiente | 15 |
| 2.2. Propiedades del Cartón Corrugado | 18 |
| 2.2.1. Propiedades físicas | 18 |
| 2.2.2. Propiedades Mecánicas | 23 |
| 2.3. Adhesivos para cartón | 30 |
| 2.4. Estudios sobre comportamiento del cartón | 32 |
| 2.4.1. Carga Crítica del Primer Modo de Pandeo | 32 |
| 2.5. Diseño Modular..... | 35 |
| 2.5.2. Categorías de Modularidad | 37 |
| 2.5.3. Desarrollo de Sistemas de Tipo Modular..... | 39 |
| 2.5.4. Metodología de Diseño Modular..... | 40 |

| | | |
|---|---|-----|
| 2.5.5. | Análisis de Descomposición y Diseño Modular | 40 |
| 2.5.6. | Diseño enfocado en el ensamble | 42 |
| 2.5.7. | Diseño para la Manufactura | 43 |
| 2.6. | Muebles | 44 |
| 2.6.1. | Generalidades y Clasificación | 44 |
| 2.6.2. | Tipos de muebles de cartón corrugado | 48 |
| 2.6.3. | Tubos de cartón | 54 |
| 2.6.5. | Antropometría | 57 |
| 2.6.6. | Normativa INEN para muebles | 57 |
| 2.6.7. | Diseño de una silla de oficina | 58 |
| 2.6.8. | Diseño de un escritorio de oficina..... | 60 |
| 2.6.9. | Diseño de un estante de almacenamiento..... | 63 |
| CAPÍTULO III..... | | 66 |
| ENSAYOS MECÁNICOS AL CARTÓN CORRUGADO | | 66 |
| 3.2 | Aplastamiento plano | 67 |
| 3.2.1 | Equipamiento | 68 |
| 3.2.2 | Procedimiento | 69 |
| 3.2.3 | Toma de datos | 69 |
| 3.3 | Ensayo de compresión de borde | 71 |
| 3.3.1 | Equipamiento | 71 |
| 3.3.2 | Procedimiento | 72 |
| 3.3.3 | Toma de Datos..... | 73 |
| 3.4 | Ensayo de tracción | 75 |
| 3.4.1 | Equipamiento | 76 |
| 3.4.2 | Toma de Datos..... | 77 |
| 3.5 | Ensayos de Flexión | 93 |
| 3.5.1 | Introducción..... | 93 |
| 3.5.2 | Diseño del aplicador de fuerza | 95 |
| 3.5.3. | Realización de ensayos | 99 |
| 3.5.4. | Equipamiento | 101 |
| 3.5.5 | Procedimiento. | 102 |
| 3.5.6 | Toma de datos | 103 |

| | | |
|--------------------------------------|--|-----|
| 3.5.7 | Resultados | 126 |
| 3.5.8 | Validación de ensayo de flexión. | 126 |
| CAPÍTULO IV | | 128 |
| DISEÑO MODULAR | | 128 |
| 4.1 | Descomposición Modular..... | 128 |
| 4.2 | Módulos a Utilizar | 130 |
| 4.2.1 | Material | 130 |
| 4.2.2 | Silla | 131 |
| 4.2.3 | Estante..... | 135 |
| 4.2.4 | Tubos de Cartón | 137 |
| 4.2.5 | Vigas | 137 |
| 4.3 | Ensayos a Módulos | 138 |
| 4.3.1 | Experimentación en módulos de estante..... | 138 |
| 4.3.2 | Ensayos a módulos de silla | 142 |
| 4.3.3 | Ensayos a los tubos de cartón | 145 |
| 4.3.4 | Ensayo de flexión a módulos de vigas..... | 147 |
| 4.4 | Diseño de Muebles | 149 |
| 4.4.1 | Silla | 149 |
| 4.4.2 | Estante de Almacenamiento..... | 152 |
| 4.4.3 | Escritorio | 154 |
| 4.4.4 | Zona de aplastamiento de la viga..... | 157 |
| 4.4.5 | Selección del tablero | 158 |
| 4.4.6 | Unión entre viga y tablón..... | 159 |
| CAPITULO V | | 165 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 165 |
| 5.1. | Conclusiones | 165 |
| 5.2. | Recomendaciones | 167 |
| Bibliografía..... | | 168 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|------------|
| TABLA 1: Clasificación de las flautas en el cartón corrugado | 9 |
| TABLA 2: Clasificación del cartón corrugado de acuerdo a su estructura | 11 |
| TABLA 3: Costo energético de diversas materias primas..... | 17 |
| TABLA 4 : Propiedades mecánicas de tubos de cartón | 55 |
| TABLA 5: Requisitos dimensionales de sillas fijas y móviles | 60 |
| TABLA 6: Medidas para el dimensionamiento de escritorios | 63 |
| TABLA 7: Medidas para el dimensionamiento de repisas | 65 |
| TABLA 8 Características de tipos de cartones escogidos (proveedor) | 67 |
| TABLA 9 Valores obtenidos en los ensayos de aplastamiento plano | 70 |
| TABLA 10 Resultados de las pruebas de aplastamiento plano | 71 |
| TABLA 11 Datos obtenidos en la prueba de compresión de borde | 73 |
| TABLA 12 Resultados obtenidos prueba de compresión de borde | 73 |
| TABLA 13 Características de la probeta de tracción | 77 |
| TABLA 14 Ensayo de tracción del material b125 en el sentido transversal | 78 |
| TABLA 15 Resultados ensayo de tracción del material b215 en el sentido transversal | 79 |
| TABLA 16 Fuerza vs deformación con un incremento de 0,2 mm del material b125 en el sentido transversal..... | 85 |
| TABLA 17 Valores obtenidos ensayo de tracción - sentido de maquina b125..... | 87 |
| TABLA 18 Resultados ensayo de tracción- sentido de máquina b125 | 88 |
| TABLA 19 Variación de fuerza de tracción con un incremento de 0,2 mm – sentido de máquina b125 | 91 |
| TABLA 20 Ensayo de flexión dp350 sentido transversal - 2 puntos | 104 |
| TABLA 21 . Ensayo de flexión dp350 sentido de máquina-2 puntos | 105 |
| TABLA 22 . Ensayo de flexión dp350 sentido de máquina-1 puntos | 106 |
| TABLA 23 . Ensayo de flexión dp350 sentido transversal-1 puntos.... | 107 |

| | |
|--|------------|
| TABLA 24 Ensayo de flexión c250 sentido transversal - 2 puntos..... | 110 |
| TABLA 25 Ensayo de flexión c250 sentido de máquina-2 puntos | 111 |
| TABLA 26 Ensayo de flexión c250 en sentido de máquina - 1 punto | 112 |
| TABLA 27 Ensayo de flexión c250 en sentido transversal - 1 punto | 113 |
| TABLA 28 ensayo de flexión c200 sentido transversal - 2 puntos | 115 |
| TABLA 29 Ensayo de flexión c200 sentido transversal - 1 punto | 116 |
| TABLA 30 Ensayo de flexión c200 en sentido de máquina - 2 puntos | 117 |
| TABLA 31 Ensayo de flexión c200 en sentido máquina - 1 punto | 118 |
| TABLA 32 Ensayo de flexión b125 sentido transversal – 2 puntos..... | 120 |
| TABLA 33 Ensayo de flexión b125 en el sentido de máquina - 2 puntos | 121 |
| TABLA 34 Ensayo de flexión b125 en el sentido de máquina – 1 punto.. | 122 |
| TABLA 35 Ensayo de flexión b125 sentido transversal – 1 punto | 123 |
| TABLA 36 Rigidez a la flexión de los materiales ensayados | 126 |
| TABLA 37 Valores de rigidez por estudioinvestigativo | 127 |
| TABLA 38 Espesor de los tipos de cartón corrugado | 131 |
| TABLA 39 Designación de los módulos de acuerdo al espesor de la pared vertical | 136 |
| TABLA 40 Datos de ensayo de compresión a módulos de estantes | 141 |
| TABLA 41 Datos obtenidos en los ensayos a módulos de sillas | 144 |
| TABLA 42 Resistencia a compresión tubo de módulo soporte de escritorio | 146 |
| TABLA 43 Datos obtenidos de la prueba de resistencia a flexión de vigas | 148 |
| TABLA 44 Características del tablero de aglomerado del escritorio | 158 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 Estructura cartón corrugado | 7 |
| FIGURA 2 Características geométricas de las flautas | 8 |
| FIGURA 3 Proceso de elaboración cartón corrugado | 12 |
| FIGURA 4 Aplicaciones en cartón corrugado | 14 |
| FIGURA 5 Muebles de cartón corrugado..... | 15 |
| FIGURA 6 Principales direcciones del material (cartón corrugado) | 19 |
| FIGURA 7 Variación del módulo de elasticidad con respecto a la humedad relativa | 22 |
| FIGURA 8 Máquina y probeta de aplastamiento plano en cartón corrugado | 24 |
| FIGURA 9 Ensayo de resistencia a la compresión de borde | 25 |
| FIGURA 10 Curva típica del comportamiento del cartón corrugado ante tensión | 26 |
| FIGURA 11 Curvaturas de carga-deflexión para diferentes diámetros del rodillo que aplica la fuerza en el ensayo de flexión. | 28 |
| FIGURA 12 Coeficiente de pandeo versus la relación b/a | 34 |
| FIGURA 13 Tipos de módulos y sus funciones..... | 36 |
| FIGURA 14 : Módulos con intercambio de componentes | 37 |
| FIGURA 15 Módulos que pueden compartir componentes | 38 |
| FIGURA 16 Módulos diseñados para la adaptabilidad..... | 38 |
| FIGURA 17 : Modularidad tipo bus..... | 39 |
| FIGURA 18 Diagrama función-componente..... | 41 |
| FIGURA 19 Mueblería para sentarse y descansar..... | 45 |
| FIGURA 20 Mueblería para trabajar y comer..... | 45 |
| FIGURA 21 Mueblería para almacenamiento | 46 |

| | |
|--|-----------|
| FIGURA 22 Muebles según la organización espacial de su forma: a) con estructura espacial abierta, b) con estructura espacial parcialmente abierta y, c) estructura espacial volumétrica | 47 |
| FIGURA 23 Mueblería modular | 47 |
| FIGURA 24 Ejemplares de la línea de muebles de cartón otto | 49 |
| FIGURA 25 Wiggle side chair de frank gehry | 49 |
| FIGURA 26 Clasificación de muebles de cartón | 50 |
| FIGURA 27 Ejemplares de la línea de muebles de cartón otto | 51 |
| FIGURA 28 Diseños de muebles con láminas de cartón corrugado: a) de sección distinta (diseño de real-made) y, b) de sección igual (diseñado por alex hellum)..... | 51 |
| FIGURA 29 : Muebles diseñados por rienhard dienes: a) estantería de libros modelo dickens y, b) aparador modelo georgia..... | 52 |
| FIGURA 30 Muebles con cartón corrugado ranurado hechos por david graas..... | 53 |
| FIGURA 31 Muebles hechos con tubos de cartón | 53 |
| FIGURA 32 Tubos de cartón | 54 |
| FIGURA 33 Diseño de un estante con cajones utilizando a) dimensionamientos regulares y b) dimensionamientos con la proporción áurea..... | 56 |
| FIGURA 34 requisitos dimensionales de sillas fijas y móviles | 59 |
| FIGURA 35 Escritorio tipo C..... | 61 |
| FIGURA 36 : Medidas para escritorios basados en criterios antropométricos y ergonómicos para el ecuador | 62 |
| FIGURA 37 Medidas para dimensionamiento de espacios libres en escritorios basados en criterios antropométricos y ergonómicos para el ecuador | 62 |
| FIGURA 38 Ejemplo de una repisa..... | 64 |
| FIGURA 39 Altura máxima de un estante..... | 64 |
| FIGURA 40 Máquina universal de ensayos instron 1130..... | 68 |
| FIGURA 41 Probeta de aplastamiento plano | 68 |

| | |
|--|-----------|
| FIGURA 42 Probeta de aplastamiento ensayándose..... | 69 |
| FIGURA 43 Diagrama de probeta de compresión de borde..... | 72 |
| FIGURA 44 Probeta c250 en ensayo de compresión de borde | 72 |
| FIGURA 45 Probeta dp350 ensayada vista frontal | 75 |
| FIGURA 46 Probeta c250 y dp350 ensayada vista superior | 75 |
| FIGURA 47 Diagrama probeta de tracción | 76 |
| FIGURA 48 Distancia entre mordazas de tracción (100 mm) | 77 |
| FIGURA 49 Parámetros de gráfica fuerza vs deformación | 81 |
| FIGURA 50 Fuerza vs deformación ensayo tracción 6 (sentido transversal) | 82 |
| FIGURA 51 Análisis de la curva autocad..... | 83 |
| FIGURA 52 Fuerza vs deformación con un incremento de 0,2 mm del material b125 en el sentido transversal..... | 85 |
| FIGURA 53 Fuerza vs deformación tracción sentido de máquina b215..... | 89 |
| FIGURA 54 Análisis fuerza vs deformación (sentido de máquina)..... | 90 |
| FIGURA 55 Variación de fuerza de tracción con un incremento de 0,2 mm – sentido de máquina b125..... | 91 |
| FIGURA 56 Falla por tracción (sentido de máquina)..... | 92 |
| FIGURA 57 Ensayo de flexión con una carga central y puntual..... | 93 |
| FIGURA 58 Diagrama de ensayo con carga puntual en el centro..... | 94 |
| FIGURA 59 Ensayo de flexión con 2 cargas uniformes | 94 |
| FIGURA 60 Diagrama de ensayo de flexión con 2 cargas uniformes | 94 |
| FIGURA 61 Diagrama de probeta de flexión..... | 95 |
| FIGURA 62 Diagrama de pieza aplicador de fuerza simultánea vista frontal..... | 96 |
| FIGURA 63 Diagrama de pieza aplicador de fuerza simultánea vista superior..... | 96 |
| FIGURA 64 Diagrama de pieza aplicador de fuerza simultánea vista isométrico | 97 |

| | |
|---|------------|
| FIGURA 65 Análisis de desplazamiento resultante con solidworks del aplicador de fuerza de 2 puntos | 98 |
| FIGURA 66 Análisis de deformación unitaria con solidworks del aplicador de fuerza de 2 puntos | 99 |
| FIGURA 67 Máquina de ensayos universal mts tk/t5002..... | 100 |
| FIGURA 68 Hora – temperatura - humedad relativa del ambiente en ensayos de flexión | 101 |
| FIGURA 69 Medidor de fuerza digital | 102 |
| FIGURA 70 Ensayo de flexión dos puntos uniformes | 103 |
| FIGURA 71 Ensayo de flexión carga puntual en el centro | 103 |
| FIGURA 72 Fuerza vs deformación dp350 sentido transversal - 2 puntos | 105 |
| FIGURA 73 Fuerza vs deformación dp350 sentido de máquina - 2 puntos..... | 106 |
| FIGURA 74 Fuerza vs deformación dp350 sentido de máquina - 1 punto | 107 |
| FIGURA 75 Fuerza vs deformación dp350 sentido transversal - 1 punto... | 108 |
| FIGURA 76 fuerza vs deformación en sentido transversal - 2 puntos..... | 111 |
| FIGURA 77 Fuerza vs deformación en sentido de máquina - 2 puntos..... | 111 |
| FIGURA 78 Fuerza vs deformación en sentido de máquina - 1 punto | 112 |
| FIGURA 79 Fuerza vs deformación c250 en sentido transversal - 1 punto | 113 |
| FIGURA 80 Fuerza vs deformación c200 en sentido transversal - 2 puntos..... | 115 |
| FIGURA 81 Fuerza vs deformación c200 en sentido transversal - 1 punto | 116 |
| FIGURA 82 Fuerza vs deformación c200 en sentido de máquina - 2 puntos | 117 |
| FIGURA 83 Fuerza vs deformación c200 en sentido de máquina - 1 punto..... | 118 |
| FIGURA 84 Fuerza vs deformación b125 en sentido transversal - 2 puntos..... | 121 |
| FIGURA 85 Fuerza vs deformación b125 en el sentido de máquina - 2 puntos | 122 |

| | | |
|-------------------|---|------------|
| FIGURA 86 | Fuerza vs deformación b125 sentido de máquina-1 punto | 123 |
| FIGURA 87 | Fuerza vs deformación b125 en sentido transversal - 1 punto | 124 |
| FIGURA 88 | Material dp350 cede por flexión..... | 125 |
| FIGURA 89 | Silla de oficina fija sin apoyaduras para los brazos..... | 128 |
| FIGURA 90 | Escritorio de oficina tipo c..... | 129 |
| FIGURA 91 | Silla hecha con láminas de cartón corrugado ranuradas | 131 |
| FIGURA 92 | Zona de asiento de silla hecha con 2 láminas ranuradas por cada pared..... | 132 |
| FIGURA 93 | Zona de asiento de silla hecha con 2 láminas ranuradas por cada pared y reforzada con tubos de cartón | 133 |
| FIGURA 94 | Medidas de la zona de asiento de la silla de doble lámina ranurada | 133 |
| FIGURA 95 | Medidas de la zona de asiento de la silla de doble lámina ranurada reforzada con tubos de cartón | 134 |
| FIGURA 96 | medidas de la zona de asiento de la silla de triple lámina ranurada | 134 |
| FIGURA 97 | Estante de almacenamiento | 135 |
| FIGURA 98 | Medidas del estante de almacenamiento | 136 |
| FIGURA 99 | Viga de cartón corrugado | 138 |
| FIGURA 100 | Máquina de compresión co702d – tester sangyo de los laboratorios del inen | 139 |
| FIGURA 101 | Prueba de compresión realizada sobre el módulo del estante..... | 140 |
| FIGURA 102 | Balanza digital de los laboratorios del inen..... | 140 |
| FIGURA 103 | Gráfica de relación resistencia – peso existente en los módulos de estante ensayados | 142 |
| FIGURA 104 | Módulo del asiento ensayado en compresión..... | 143 |
| FIGURA 105 | Gráfica de relación resistencia – peso existente en los módulos de silla ensayados | 145 |
| FIGURA 106 | Prueba de compresión de tubos..... | 146 |

| | | |
|-------------------|--|------------|
| FIGURA 107 | Prueba de flexión de vigas de cartón..... | 147 |
| FIGURA 108 | Viga que ha fallado con una carga de flexión | 148 |
| FIGURA 109 | Espesor de viga vs resistencia en a la flexión de las vigas analizadas | 149 |
| FIGURA 110 | Silla de cartón corrugado-diseño | 150 |
| FIGURA 111 | Silla de cartón corrugado- final | 151 |
| FIGURA 112 | Estante de almacenamiento-diseño | 153 |
| FIGURA 113 | Estante de almacenamiento- ensamblado..... | 153 |
| FIGURA 114 | Estructura del escritorio completa | 156 |
| FIGURA 115 | Pieza de unión tubo-vigas en el escritorio de oficina | 156 |
| FIGURA 116 | Pieza de unión | 160 |
| FIGURA 117 | Pieza de unión | 160 |
| FIGURA 118 | | 161 |
| FIGURA 119 | Catalogo tornillos para madera cymisa..... | 162 |
| FIGURA 120 | Escritorio en proceso de ensamble | 163 |
| FIGURA 121 | Escritorio finalizado | 163 |
| FIGURA 122 | Conjunto finalizado..... | 164 |

RESUMEN

La presente tesis es una investigación acerca de las propiedades del cartón corrugado como una alternativa a usarse en el desarrollo y construcción de estructuras mobiliarias de oficina siendo una opción para reemplazar a la madera, los polímeros y metales que, hasta ahora, se han utilizado para dicho fin. El cartón, en términos generales, es un material que podría resultar siendo más amigable con el medio ambiente debido a sus propiedades de biodegradabilidad y reciclabilidad, además puede ser lo suficientemente resistente, bajo ciertas disposiciones geométricas y cuidados, como para desarrollar este tipo de estructuras. Este trabajo contempla también, una vez evaluadas las propiedades de este material, proceder a realizar el diseño y construcción de módulos y elementos que permitan, en conjunto o individualmente, conformar 3 tipos de muebles de uso común como lo son: un estante de almacenamiento, un escritorio y una silla de oficina. Una vez concebidos y desarrollados los prototipos, se procederán a efectuar las pruebas mecánicas sobre ellos con el fin de cuantificar su resistencia mecánica ante los diversos esfuerzos a los que, de acuerdo a su función, estarían sometidos. Finalmente se deberá realizar el diseño definitivo de los muebles mediante la selección de los módulos y elementos idóneos para su funcionamiento adecuado y seguro.

Palabras claves

- **MUEBLE**
- **CARTÓN CORRUGADO**
- **RECICLABILIDAD**
- **AMBIENTE**
- **ESFUERZO**

ABSTRACT

The principal objective of this research project is to investigate the properties of the corrugated fiberboard, which is an alternative to be used in the development and construction of furniture structures for office applications. The corrugated fiberboard is an interesting option to replace wood, polymers, and steel, which have been used for furniture applications. The corrugated cardboard is definitely friendlier with the environment because of its properties such as degradability and recyclability; furthermore, it also shows good mechanical resistance for furniture structures under different geometric designs. This research project also includes the evaluation of the different mechanic properties of the corrugated fiberboard in order to include the design and construction of modules and elements able to be shaped in three different kinds of furniture including and storage shelf, a desk, and an office chair. Once the prototypes are developed and constructed, mechanical tests will be applied in order to quantify and determine their mechanical resistance to the different mechanical stresses. Finally, the ultimate design must be developed through the selection of different modules and elements for its correct and secure operation.

Keywords

- **FURNITURE**
- **CORRUGATED FIBERBOARD**
- **STRESS**
- **RECYCLABILITY**
- **ENVIRONMENT**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALIDADES

1.1 Introducción

En 1856 se desarrolló el conocido, por aquel entonces, papel corrugado que consistía, tan solo, en un tipo de papel de forma ondulada cuyo aspecto resultó ser bastante llamativo para la época y que se obtenía al hacer pasar el material por dos rodillos de geometría especial. Tiempo después, Oliver Long en el año de 1874, al añadirle a dicho producto primeramente una cara de papel liso y luego otra más, formando una estructura “sánduche”, obtuvo la patente por la invención de lo que hoy conocemos como cartón corrugado. Ya para inicios del siglo XX se empezaron a producir planchas de este nuevo material en un proceso continuo y su comercialización, en particular para fines de embalaje, se volvió masiva con el pasar de los años.

De esta manera y gracias a una época de auge industrial, el cartón corrugado pasó a liderar la industria del embalaje por sus características ventajosas, su resistencia y su costo relativamente bajo. Además, en los últimos años su utilización en diferentes aplicaciones se ha visto intensificada ya que es también un material relativamente amigable con el medio ambiente. Así, dentro de los nuevos enfoques que se le ha dado al cartón corrugado se encuentra su uso, como material base, en estructuras de índole mobiliaria, iniciativa que vio su inicio en el año de 1968 y que ha repercutido en países de primer mundo pero que no ha tenido mayor atención en países en vías de desarrollo como el nuestro.

1.2 Antecedentes

En los estudios realizados sobre el cartón corrugado no se contempla la posibilidad de que éste sea un material utilizado en mueblería o en estructuras de índole similar, por lo cual no existe mayor información sobre la viabilidad de su construcción ni de la resistencia que pudiesen presentar; sin embargo, si existen estudios enfocados en determinar y analizar algunas de sus propiedades y otros en examinar ciertos parámetros de su manufactura así como también de la utilización de diferentes combinaciones de materias primas para desarrollarlos.

En el ámbito internacional, el cartón fue introducido al mundo del diseño de componentes de mueblería por Peter Raacke en el año de 1968, posterior a ello, la empresa Vytra puso a la venta la línea de productos Easy Edges, inclusive aún hoy comercializada y cuyo diseñador fue Frank Gehry, que comprende sillas y mesas de estilo moderno. La silla Wiggle es uno de los ejemplos icónicos de esta línea de productos y ha sido galardonada con una numerosa cantidad de premios internacionales, además de que contó con gran aceptación popular e incluso ha llegado a museos de diseño como el de Londres y a variadas exposiciones.

Actualmente la utilización del cartón corrugado en este tipo de aplicaciones ha ganado fuerza y existen compañías en Estados Unidos, como Chairigami, y otras en Europa, como CartonLab de España y Kurtl de Austria, que se encargan de vender muebles hechos a base de este material, por ello podemos encontrar numerosas patentes y una variedad de productos en el mercado pero poca información acerca de sus propiedades mecánicas, forma de manufactura y otras características.

En Quito funcionan algunas fábricas y tiendas que manufacturan y comercializan muebles de cartón, entre las cuales podemos citar a Corrucart que vende mobiliario de oficina y de vivienda, el cual se caracteriza por su simpleza y gran utilidad funcional. Otras empresas ubicadas en este entorno

son Caliu, otro productor de muebles utilitarios y, Nueva Imagen que utiliza tubos de cartón prensado para fabricar camas, sofás, taburetes, etc.

1.3 Definición del Proyecto

El presente proyecto plantea la posibilidad de utilizar al cartón corrugado con el fin de crear muebles de oficina que tengan características satisfactorias y adecuadas para su normal funcionamiento, como lo son un escritorio de oficina, una silla y un estante de almacenamiento.

El cartón corrugado puede tener varios tipos de estructura en los que se realizan combinaciones con el número de capas lisas o liners y flautas o secciones onduladas, de manera que cada una de ellas poseerá distintas propiedades mecánicas en base a las cuales se tendrá que seleccionar la más adecuada para realizar los diseños de los módulos.

Primeramente se deben realizar pruebas mecánicas sobre los diferentes tipos de cartón corrugado con el fin de determinar sus propiedades. Dichas pruebas, tanto de tracción, de compresión plana como de compresión de borde, serán realizadas de acuerdo a las normas INEN y además se efectuará una prueba adicional de flexión.

Para determinar las formas geométricas más idóneas que podrán tener los módulos se deberá proceder primeramente a realizar un análisis de la forma, tamaño y función que tienen las distintas secciones de los muebles de oficina, luego se propondrán, de acuerdo a ello, una variedad de tipos de módulos que puedan ser tanto funcional como estéticamente satisfactorios y posteriormente se realizará una experimentación que someterá a cada uno de ellos a distintos tipos de cargas:

- Una carga compresiva estática para determinar la capacidad de soportar fuerzas compresivas por parte de los módulos que estén diseñados especialmente para dicho fin.

- Pruebas de flexión en módulos cuyas partes estén sometidas a este tipo de esfuerzos.

Con los resultados obtenidos, se procederán a seleccionar los diseños más adecuados y a optimizarlos de ser necesario, todo ello basándose en dos aspectos cruciales de un producto como los son la cantidad de uso de material y la resistencia mecánica presentada.

Posteriormente se deberá analizar la mejor manera de realizar el diseño de los muebles y la unión de los elementos escogidos para esta finalidad en función de obtener un mueble con suficiente resistencia mecánica, una estética adecuada, y cuyas dimensiones sean apropiadas de acuerdo a lo que dicta la antropometría para este tipo de productos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Realizar un estudio experimental sobre las propiedades del cartón corrugado y efectuar el diseño de módulos y elementos que puedan conformar muebles de oficina como una silla, un escritorio y un estante de almacenamiento con las características adecuadas para su normal funcionamiento y posteriormente construirlos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades mecánicas más importantes del cartón corrugado que se comercializa en el país bajo las normas INEN que rigen nuestro territorio.
- Diseñar y determinar experimentalmente la mejor geometría de los módulos y elementos que conformarán los muebles.

- Diseñar y construir muebles de oficina mediante los módulos y elementos seleccionados.

1.5 Justificación e Importancia

El desarrollo del presente proyecto encuentra su importancia en la problemática ambiental del mundo actual ocasionada por una gran cantidad de causas entre las cuales destaca la deforestación y la utilización de un recurso limitado como la madera, cuya obtención puede llegar a ser bastante invasiva y perjudicial para la naturaleza, en la manufactura de una gran variedad de productos entre los cuales podemos subrayar como muy común a la mueblería.

De esta manera, este proyecto se enfoca en mostrar si podemos disminuir el impacto ambiental generado por la producción de muebles al encontrar la posibilidad de utilizar materiales alternativos más livianos como lo es el cartón corrugado, que además puede ser reciclado al 100% y que es asimismo 100% biodegradable, el cual debido a su forma y composición posee propiedades mecánicas que pueden ser aprovechadas para desarrollar este tipo de estructuras, además de que su manufactura es bastante sencilla y es un material relativamente barato.

1.6 ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto a realizarse primeramente se enfocará en un estudio que determine las propiedades mecánicas más relevantes de los tipos de cartón corrugado que se van a utilizar, es decir, se tendrá que definir tanto su comportamiento ante cargas de tensión, compresión en forma de aplastamiento, compresión cuando las probetas están dispuestas en forma de columna y además también ante cargas de flexión. Todo esto con el fin de

entender de una mejor manera como se pueden utilizar en los diseños que van a ser efectuados posteriormente.

Una vez definidas dichas propiedades, se procederá a realizar un diseño de módulos con distintas formas geométricas y dimensiones que puedan conformar muebles de oficina como un escritorio, estante de almacenamiento y silla, todo ello bajo formas y medidas acordes tanto a ergonomía como a estética y funcionalidad apropiada.

El proyecto planteado entregará como resultado el diseño y construcción de un escritorio de oficina, un estante de almacenamiento y una silla a partir de módulos que previamente han sido estudiados y cuya resistencia mecánica se ha cuantificado a través de las pruebas adecuadas y similares a su funcionamiento. Dichos productos resultantes deberán poder satisfacer las necesidades funcionales del tipo de estructura a la que representen, de esta manera, deberán poder soportar cargas y condiciones comunes a su normal vida útil.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades

2.1.1. Definición

El cartón corrugado es un tipo de material cuya estructura está formada por capas exteriores de papel liso (liners) adheridas a las crestas de un nervio central hecho de papel ondulado también llamado flauta. Este es un material liviano, hueco y no macizo basado en la celulosa, cuya resistencia se basa en la disposición y trabajo en conjunto de sus componentes, así como también en las propiedades inherentes a su geometría y materia prima.

2.1.2. Componentes del cartón corrugado

Las propiedades del cartón corrugado vienen determinadas por las características de sus constituyentes: la flauta, los liners, los cuales se pueden apreciar en la figura 1, y además el adhesivo que los une.

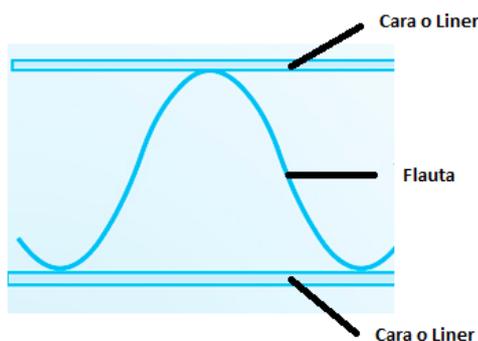


Figura 1 Estructura Cartón Corrugado

Fuente: (ACCCSA, 2008)

- **Flauta u Ondulado**

Es la geometría sinusoidal hecha de papel previamente ondulado que se encuentra ubicada entre dos caras de papel liso (o adherido a una sola de ellas en el tipo de cartón corrugado más simple).

En teoría la forma ideal de las flautas debería ser triangular para así obtener la mayor resistencia y un menor gasto de material en el producto final, sin embargo, el daño que conseguir esta geometría causaría en el papel hace que en la práctica sea imposible y por ello se opta por el perfil de la forma que comúnmente encontramos.

Las funciones de la flauta en el cartón corrugado son:

- Dar un calibre o espesor adecuado a las planchas
- Aumentar la rigidez a la flexión del cartón corrugado
- Aportar con capacidad de amortiguación
- Mejorar la resistencia a la compresión de borde

Como se puede ver en la Tabla 1 existen diferentes tipos de flautas cuyas características geométricas determinan en gran medida el comportamiento que el cartón corrugado tenga ante la presencia de diferentes tipos de cargas y situaciones relacionadas con su uso.

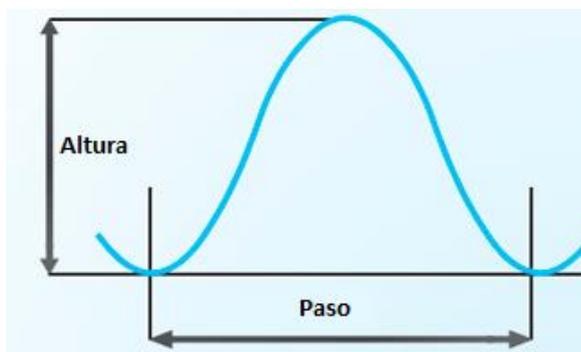


Figura 2 Características Geométricas de las Flautas

Fuente: (ACCCSA, 2008)

Las características geométricas principales de las flautas, las cuales se pueden apreciar en la figura 2, son las siguientes:

- **Altura:** Es la longitud vertical existente entre los vértices o crestas superior e inferior.
- **Paso:** Es la distancia existente entre dos crestas del ondulado.
- **Coefficiente de Ondulación:** Es la relación existente entre el largo real del papel ondulado en comparación con el largo de la cara.

Tabla 1

Clasificación de las Flautas en el Cartón Corrugado

| Perfil del Ondulado | Calibre (mm) | Altura de la Onda (mm) | Paso (mm) | Número de Ondas por metro | Coefficiente de Ondulación teórico |
|---------------------|--------------|------------------------|-----------|---------------------------|------------------------------------|
| Onda muy grande (K) | 6,1 a 7 | 6 | 11,7 | 90 | 1,5 |
| Onda grande (A) | 4,5 a 5,8 | 4,4 a 4,8 | 8,1 a 9,5 | 123 a 105 | 1,48 a 1,6 |
| Onda mediana (C) | 3,6 a 5 | 3,5 a 4 | 7 a 8,1 | 143 a 123 | 1,39 a 1,5 |
| Onda pequeña (B) | 2,6 a 3,8 | 2,4 a 2,8 | 6 a 6,8 | 167 a 147 | 1,3 a 1,51 |
| Microcanal (E) | 1,2 a 2 | 1,1 a 1,4 | 3 a 4,2 | 333 a 238 | 1,17 a 1,43 |
| Minimicro canal F | 0,9 a 1,4 | 0,75 | 2,4 a 2,7 | 416 a 370 | 1,2 a 1,4 |
| Canal G | 1 a 1,1 | 0,5 a 0,65 | 1,8 | 555 | 1,24 a 1,26 |
| Canal N | 0,5 a 0,8 | 0,42 | 1,8 | 555 | 1,13 a 1,15 |

Fuente: (ACCCSA, 2008)

De esta manera se pueden mencionar ciertas características generales acerca de cada tipo:

- **Tipo E:** Su superficie es más lisa, en comparación con los otros tipos de cartón corrugado, debido a un número mayor de ondulaciones por longitud. Esta característica permite que el material tenga buena imprimibilidad.
- **Tipo B:** Posee una conveniente resistencia al aplastamiento plano pero escasa rigidez debido a su bajo calibre.
- **Tipo C:** Posee de una buena resistencia al aplastamiento en plano y a la compresión vertical.
- **Tipo A y K:** Son más rígidas y poseen un mejor poder de amortiguación y una elevada resistencia a la compresión de borde.

- **Liners o Caras**

Son los elementos de papel planos sobre los cuales se encuentra adherida la flauta y que le brindan soporte a su estructura. El liner mejora la rigidez a la flexión del cartón corrugado, además lo hace más fuerte y resistente ante desgarres u otro tipo de agresiones mecánicas. Es la parte del cartón corrugado que interactuará con el medio ambiente y se opondrá al paso de líquidos como agua o aceites hacia el interior de su estructura.

- **Adhesivo**

Es el material que permite la unión de las caras con la flauta de forma que este conjunto tenga estabilidad y que su estructura sea duradera y se encuentre bien definida a lo largo del tiempo.

2.1.3. Tipos de cartón corrugado

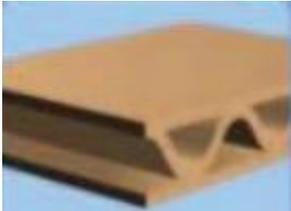
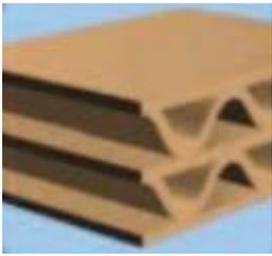
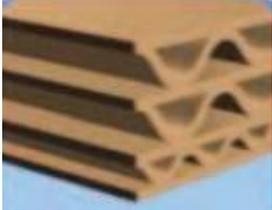
El cartón corrugado tiene variadas clasificaciones en las que se juega con el número de caras y flautas como se puede observar en la tabla 2, lo que

genera estructuras cuyas propiedades mecánicas difieren en gran medida de acuerdo a su combinación.

En este sentido y como se ha mencionado previamente las flautas pueden ser de diferentes tipos y su influencia en las propiedades físicas y mecánicas del conjunto serán de igual manera determinantes.

Tabla 2

Clasificación del Cartón Corrugado de acuerdo a su estructura

| Tipo | Definición | Gráfico |
|-------------------------------|--|---|
| Simple Cara SF | Formado por la unión de una capa de liner con una de ondulado unidos entre sí con un adhesivo. |  |
| Doble cara (Simple Wall) | Se utilizan dos láminas de papel liner y una de papel ondulado pegado entre sí. |  |
| Doble-Doble cara (Doble Wall) | Es el resultado de la unión entre 3 liners con 2 láminas onduladas intercaladas en el medio de las 3 primeras. |  |
| Triple cara (Triple Wall) | Es el resultado de la unión entre 4 liners con 3 láminas onduladas intercaladas en el medio de las 4 primeras. |  |

Fuente: (Pérez & Valencia, 2013)

2.1.4. Manufactura del cartón

El cartón corrugado, como ya se lo ha definido, es una estructura fundamentalmente formada por una superposición de papeles, ergo, su manufactura empieza con la producción de este material que principalmente se basa en el aprovechamiento de las propiedades de la celulosa. El proceso empieza por la tala de árboles generalmente de crecimiento rápido, como lo es el pino o el eucalipto, para continuar y ser descortezados por técnicas químicas o mecánicas y ser convertidos en pedazos muy pequeños de madera cuyo tratamiento mediante diversos procedimientos permitirá obtener pulpas de diferentes composiciones y propiedades que, al pasar por rodillos, se convertirán en el papel que utilizan las corrugadoras.

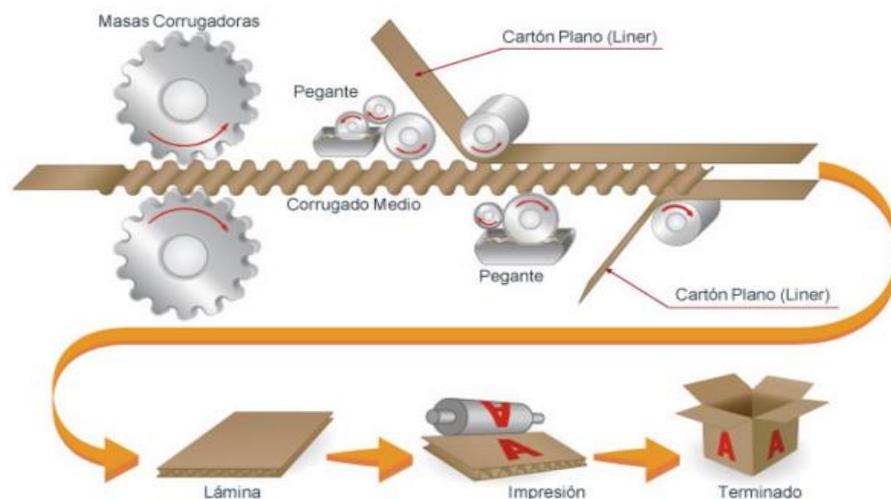


Figura 3 Proceso de Elaboración Cartón Corrugado

Fuente: (Cartones América, s. f.)

Para fabricar el médium se hace pasar el papel escogido por medio de los denominados rodillos onduladores cuya forma externa tiene dientes semejantes a un engranaje recto y que, mediante la aplicación de una presión regulable (generalmente entre 30 y 50 kg/cm lineal) y la aplicación previa de

vapor a una temperatura de alrededor de 190 °C, permite dar el perfil de onda al papel. El tamaño de los dientes que los rodillos onduladores posean determinará el tipo de onda obtenida en este proceso.

El cartón plano utilizado en los liners, por otro lado, debe ser calentado a una temperatura adecuada para que sus propiedades mecánicas no se vean afectadas y para que la adhesión con el corrugado sea instantánea. Para la aplicación del adhesivo se utilizan rodillos que suministran una cantidad adecuada de esta sustancia en las crestas del corrugado, las cuales pasarán a tener contacto con las láminas de cartón plano y permitirán su unión en una sola estructura. Para la unión de la segunda cara o liner, después del encolado, se hace pasar a la estructura de cartón por las denominadas mesas calientes que transmiten una cantidad de calor adecuada para que el adhesivo se seque rápidamente.

Finalmente se dan los cortes tanto longitudinales como transversales a las láminas finales de cartón corrugado de acuerdo a su forma de almacenamiento o especificaciones necesarias.

La figura 3 muestra, de forma simplificada, un esquema del proceso de manufactura del cartón corrugado.

2.1.5. Aplicaciones

El cartón corrugado encuentra su principal aplicación en la industria del envasado y embalado de productos de diferentes índoles debido a que sus características favorecen la manipulación, el almacenamiento y una estilizada presentación de lo que lleven en su interior.

Desde productos agrícolas como hortalizas y frutas, hasta máquinas y herramientas industriales e inclusive cristales y elementos frágiles son empacados y guardados en cajas de cartón.

Las cajas hechas de cartón corrugado brindan una protección ante vibraciones, golpes, luz e incluso en contra de la humedad si son tratadas

previamente; además se adaptan a las necesidades de los usuarios ya que es un material relativamente fácil de trabajar, debido a esto, al bajo coste de su producción y a su gran flexibilidad, se ha convertido en el material número uno para aplicaciones de embalaje en el mundo.

Este material es utilizado además en una multitud de diferentes aplicaciones entre las que podemos mencionar el área ornamental con una variedad de productos que aprovechan su facilidad de impresión, de manufactura y su versatilidad, un ejemplo de ello son las lámparas mostradas en la figura 4.



Figura 4 Aplicaciones en Cartón Corrugado

Fuente: (Creado en Chile, s.f.)

El cartón corrugado es utilizado también en otras aplicaciones entre las que podemos citar a la elaboración de juguetes para niños, la construcción de stands para puestos de marketing y pequeñas estructuras para la exposición de productos, etc. sin embargo en los últimos años, y a partir de los trabajos de Frank Gehry como por ejemplo las líneas de muebles Easy Edges (1969-1972) o Experimental Edges series (1983) vendidas por Vytra, se ha iniciado la utilización de este material en la elaboración de estructuras mobiliarias de

diferente índole; a partir de allí se han construido diferentes modelos artesanales o que han sido manufacturados por grandes empresas europeas y norteamericanas principalmente. La figura 5 muestra un sillón fabricado a base de este material.

También, en los últimos años, el cartón de diferentes tipos, incluido el corrugado, se ha utilizado en el diseño de interiores por sus cualidades visuales y su resistencia a ser apilado y facilidad para dar formas complejas sin mayores esfuerzos.



Figura 5 Muebles de Cartón Corrugado

Fuente: (Pinterest, s.f.)

2.1.6. Cartón Corrugado y Medio Ambiente

El cartón corrugado es un material 100% reciclable y 100% biodegradable, de manera que su utilización como material amigable con el medio ambiente se encuentra en auge.

Al aire libre el papel y el cartón, esencialmente constituidos por celulosa, pueden tardar hasta un año en degradarse, tiempo que puede disminuir o aumentar de acuerdo a las condiciones a las que se encuentre expuesto y a su composición exacta. Si hablamos de plásticos, podemos mencionar que tan solo una funda hecha de polietileno de baja densidad tarda más de 150 años en lograr lo mismo y por otro lado una botella de PET puede llegar a demorar su transformación de 100 a 1000 años; tan solo recientemente se

encuentran en investigación microorganismos que puedan ayudar a degradarlo en un periodo de tiempo más corto.

El Polipropileno, material usado en el conformado de una gran variedad de elementos que incluye muebles y componentes automotrices, tampoco es un material fácil de absorber para la naturaleza pues tan solo un corcho hecho de este material tarda alrededor de 100 años en descomponerse. El poliestireno, de aplicaciones innumerables, tiene un período de degradación similar a los plásticos previamente expuestos. Además, si hablamos de metales como el acero y el aluminio, de igual manera utilizados en la fabricación de muebles y otros artefactos, al ser desechados, su presencia en el medio ambiente será muy prolongada.

En cuanto a la utilización de plástico en la sociedad moderna, cabe mencionar las estadísticas generadas en el trabajo *The New Plastics Economy* (2016) basadas en el trabajo de J. R. Jambeck et al. (2015), en donde se señala que, en el mundo, al menos 8 millones de toneladas de plástico son arrojadas al océano anualmente, lo que equivale al desecho de un camión de basura lleno cada minuto.

Cuantifica además que 150 millones de toneladas de plástico se encuentran depositadas en el océano y que bajo proyecciones conservadoras para el año 2025 habrá 1 tonelada de plástico por cada 3 toneladas de peces en el océano, sin embargo el aumento llegará a tal punto que en el año 2050 habrá más plástico que peces (en peso), esto nos da una clara idea de que la utilización del plástico y su masiva producción y consumo son problemas de gran envergadura en nuestros días.

Según Gutowski (2004), se han tabulado los valores correspondientes a la cantidad de energía que requiere la producción de ciertas materias primas como la madera, el papel, ciertos tipos de plásticos y el aluminio (tabla 3).

Tabla 3

Costo Energético de Diversas Materias Primas

| Material | Costo Energético MJ/Kg | Extraído de: |
|----------------------|------------------------|-------------------|
| Aluminio | 227-342 | Bauxita |
| Hierro | 20-25 | Mineral de hierro |
| Acero | 20-50 | Hierro |
| Polietileno | 87-115 | Petróleo |
| Poliestireno | 62-108 | Petróleo |
| Polivinilcloruro PVC | 85-107 | Petróleo |
| Madera | 3-7 | Madera en pie |
| Papel | 25-50 | Madera en pie |

Fuente: (Gutowski, 2004)

En aras de obtener una mejor precisión acerca del costo energético que involucra la producción del cartón se puede mencionar que, de acuerdo a estimaciones realizadas por D.W. Francis et al. (2002), para la producción de la pulpa utilizada en el papel Kraft, comúnmente utilizado en la fabricación del cartón corrugado, se utilizan cerca de 15 MJ/kg como costo energético involucrando tanto energía eléctrica requerida por las instalaciones y sus máquinas como energía térmica gastada en la generación del vapor necesario para el proceso.

Otro estudio realizado por la empresa llamada **Schweizerische Industrie Gesellschaft o SIG** (2008) puede darnos una idea acerca de la diferencia de impacto ambiental existente entre los distintos materiales referidos. Aquí se menciona que “los envases de cartón generan un 54% menos de CO₂, utilizan un 41% menos de recursos fósiles, y consumen un 28% menos de energía primaria que las latas de metal de alimentos; cuando se comparan con el cristal, estas cifras son del 60% para CO₂, 60% para recursos fósiles, y 45%

para energía primaria, mientras que para bolsas de plástico el ahorro es del 36% para CO₂, 45% para recursos fósiles y 26% para energía primaria”.

En este sentido y como las estadísticas lo demuestran, el principal rival del cartón, en su uso para fines como estructuras mobiliarias u otros similares, será la madera debido a que gasta incluso menos de la tercera parte de energía en su obtención, sin embargo se debe tomar en cuenta la gran deforestación que a lo largo de los años ha venido causando.

Por otro lado, a pesar de que la fabricación del cartón también requiere la tala de árboles, tiene la ventaja de que se puede reciclar al 100 % y de esta manera puede producir material nuevo con propiedades semejantes a las que tuvo en un inicio, esto hace que sea sustentable su uso en diferentes productos. Además debido a que el papel utilizado en la producción de cartón corrugado se lo manufactura principalmente a través de pulpas obtenidas de especies de árboles de crecimiento rápido como el pino, se puede tener una producción sostenible y respetuosa con el medio ambiente si se aplica una gestión forestal responsable con cultivos propios u otras metodologías.

En el caso del Ecuador, el uso de material reciclado utilizado para la elaboración del cartón corrugado alcanza aproximadamente el 90% del total necesario para lograr el producto final y tan solo se usa un 10% de pulpas vírgenes que se añaden, sobre todo, para garantizar que no exista una pérdida de propiedades considerable; las cifras han sido obtenidas del trabajo de titulación realizado por C. Pita et al. (2014).

2.2. Propiedades del Cartón Corrugado

2.2.1. Propiedades físicas

Al cartón corrugado se lo considera como un material ortotrópico pues sus propiedades dependen de la dirección en que son medidas y, a que en el

mismo, encontramos al menos 3 ejes principales en los que varía su comportamiento. De esta manera, tenemos el eje cuya dirección es la del sentido de la manufactura del cartón denominado MD, el eje transversal CD y el eje z, perpendicular al plano formado por los dos anteriores, esto se lo puede apreciar claramente en la figura 6.

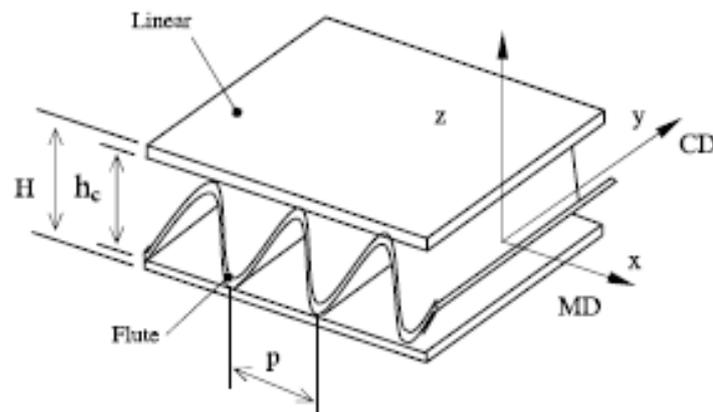


Figura 6 Principales Direcciones del Material (Cartón Corrugado)

Fuente: (Z.Aboura et al., 2004)

2.2.1.1. Gramaje

Es la característica que define el peso por unidad de área del cartón corrugado, y es muy relevante a pesar de que por lo general se lo comercializa por unidades de longitud (ya que su ancho se encuentra definido por limitaciones en la manufactura).

Mientras se acrecienta el gramaje del cartón, éste ofrecerá una mayor resistencia y rigidez, además brinda una forma de clasificación útil. Cabe mencionar que, generalmente, dentro de la nomenclatura nacional al cartón corrugado se lo designa por la denominación de su flauta y su gramaje.

La unidad en la que se mide comúnmente a esta propiedad física es de gramos sobre metro cuadrado (gr/m^2).

2.2.1.2. Calibre

Es una propiedad de vital funcionamiento ya que proporciona, al igual que el gramaje, resistencia mecánica al material. Se entiende por calibre al espesor total que el cartón corrugado tiene y se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$Calibre = L1 + L2 + M + 0,9 AF$$

En donde:

L1 es el calibre del liner 1

L2 es el calibre del liner 2

M representa la magnitud del calibre de la flauta

AF define la altura de la flauta

Al momento de la manufactura del cartón corrugado pueden darse daños y distorsiones que alteren la medida del calibre, algunas de sus causas son:

- Falta de calor y vapor al momento de procesar el medium
- Exceso de presión en los rodillos formadores de las flautas
- Aplastamiento de las puntas por corte mal realizado

2.2.1.4. Resistencia a la Humedad

La humedad en el cartón corrugado y en el papel se expresa en porcentajes, y es la relación que existe entre la cantidad de agua que

contienen con relación a su peso total (base húmeda) o con relación a la cantidad de material pero completamente seco (base seca). Una variación considerable de la humedad en el cartón afectará su resistencia mecánica y además generará cambios dimensionales y la formación de pliegues y arrugas en la superficie de los liners.

En el proceso de fabricación del cartón, el agua cumple una función vital ya que es el medio de unión de sus fibras y, cuando es eliminada, las uniones adquieren propiedades de sujeción altas y culminantes. La temperatura también cumple un papel importante ya que al excederse su magnitud genera que el material se reblandezca y pierda su rigidez a la tracción lo que disminuye las propiedades de flexión del material.

Es importante mencionar que siempre que sea necesario forzar al cartón corrugado en usos que exigen sus propiedades mecánicas al máximo, es trascendental controlar las condiciones de humedad relativa y temperaturas a las que está sometido.

En el trabajo de S. Allaoui et al. (2009), realizado con corrugados de flauta tipo C, al exponer al material inicialmente en equilibrio, en un medio de 50% de humedad relativa, a una atmósfera controlada con una humedad relativa de 95%, las muestras alcanzan un 15% de humedad calculado en base seca a tan solo 100 minutos de su exposición a estas condiciones.

Además en dicho estudio se realizan pruebas al cartón corrugado variando la humedad relativa en el acondicionamiento de sus especímenes y en las condiciones de prueba desde un valor de 35 % hasta 90 %.

Como se puede observar en la figura 7, si se toman como referencia las características elásticas del material a la humedad indicada por el procedimiento realizado por Z. Aboura et. al. (2004) (50%); al exponer los especímenes a una humedad relativa de 35 % se observó que el módulo de Young prácticamente no cambia en la dirección de máquina pero aumenta un 13% en la dirección transversal. A una humedad relativa de 70 % el módulo de Young varía negativamente un valor aproximado de 10% en la dirección

transversal; sin embargo cuando la humedad llega a 90% se observan cambios considerables en la magnitud del módulo de Young ya que en dirección de la máquina se aprecia una disminución del 30% y en la dirección transversal llega a un decremento de hasta un 50% de sus propiedades iniciales.

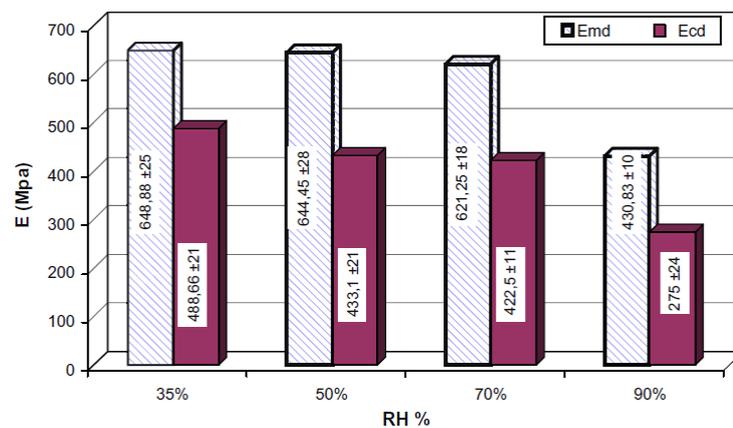


Figura 7 Variación del Módulo de Elasticidad con respecto a la Humedad Relativa

Fuente: (Allaoui, 2009)

Según Blanca Amores et al. (2008), la mayoría de las ciudades del Ecuador presentan una humedad relativa media que oscila entre 77 y 80% tanto en periodos lluviosos como de sequía; en vista de ello, se debe proceder a tomar en cuenta de manera significativa la influencia de este parámetro ambiental en las propiedades del cartón corrugado.

Por otro lado, la resistencia a la compresión de borde también es una propiedad que se ve bastante afectada por las condiciones atmosféricas. Empíricamente se dice que por cada 1% de humedad que el cartón adquiera (lo que se asocia con un aumento de 50 a 60% de HR), la resistencia a la compresión disminuye en un 8%, pero esta regla tan solo es válida cuando el material se encuentra en equilibrio en condiciones de 50% de humedad relativa.

2.2.1.5. Permeabilidad al aire y líquidos

Es la medida de la cantidad de fluido líquido o gaseoso que logra atravesar al cartón corrugado sin dañarlo; esta propiedad nos da un índice de que tan poroso es el material. De acuerdo al tipo de fluido tenemos:

- **Permeabilidad al aire:** Teóricamente esta propiedad se mide como el volumen de una masa de aire que es capaz de atravesar 1 cm² de cartón en un segundo, bajo una presión de 1 cm de agua. Sin embargo, en la práctica esta propiedad es medida por el tiempo en segundos que un volumen de 100 ml de aire se demora en atravesar el material.
- **Permeabilidad al agua:** Para cuantificar cuan permeable al agua es el cartón corrugado se pueden utilizar dos metodologías:
 - **Cobb:** mide la masa de agua en g/m² que puede absorber el papel en 30 minutos.
 - **Droptest:** El propósito de esta técnica de medición es cuantificar el tiempo en segundos que una gota de líquido previamente calibrada y depositada en la superficie demora en ser absorbida por el cartón, sin embargo, su falta de precisión hace que actualmente ya no se utilice esta metodología.

2.2.2. Propiedades Mecánicas

2.2.2.4. Resistencia al Aplastamiento Plano

Esta propiedad mecánica hace referencia a la capacidad del cartón corrugado para soportar una fuerza compresiva, aplicada en un área determinada y en dirección perpendicular al plano en el que se encuentra dispuesto, sin que su estructura sufra el colapso; esto sucede cuando las flautas se inclinan o, en su defecto, sufren una deformación plástica que no les permite volver a su estado inicial.

Para cuantificar esta propiedad se realiza un ensayo sobre el material de la forma y con equipo similar al mostrado en la figura 8. Este procedimiento tan solo es efectivo para ejemplares de cartón corrugado que cuentan con una sola flauta, no así para los tipos de doble pared o triple pared debido al movimiento lateral de la cara central existente en su estructura.

Esta propiedad mecánica es relevante en un diseño realizado con este material, ya que dentro del mismo podrían hallarse elementos que se encuentren directamente sometidos a aplastamiento. La norma que nos ayudará a encontrar los valores de esta propiedad correspondientes a los distintos tipos de cartón corrugado es la NTE INEN-ISO 3035:2013 vigente en el país.



Figura 8 Máquina y Probeta de Aplastamiento Plano en Cartón Corrugado

Fuente: (Zwick, s.f.)

2.2.2.5. Resistencia a la Compresión de Borde

Esta propiedad del cartón corrugado determina la máxima fuerza por unidad de longitud que es capaz de soportar, sin que se provoque su colapso, cuando es sometido a cargas de compresión que son paralelas a la dirección de las flautas. Un ejemplo de la forma en que se realiza este ensayo se lo puede apreciar en la figura 9.

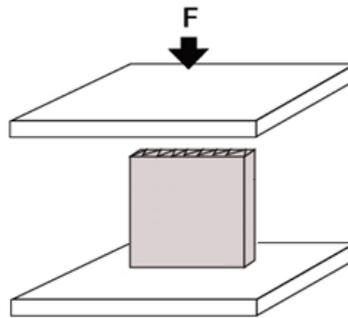


Figura 9 Ensayo de Resistencia a la Compresión de Borde

Fuente: (ACCCSA, 2013)

La resistencia a la compresión de borde es una de las propiedades más importantes del cartón corrugado y cabe mencionar que su estructura geométrica está diseñada para aumentar su magnitud de manera que se la pueda aprovechar en los distintos tipos de aplicaciones. Se encuentra relacionada intrínsecamente con la capacidad de apilamiento que pueda tener una caja hecha de este material.

Para determinar la resistencia a la compresión en los bordes del cartón corrugado basándose en la normativa técnica ecuatoriana se puede utilizar el método denominado sin impregnación de parafina descrito en la norma NTE INEN – ISO – 3037:2013.

2.2.2.6. Resistencia a la tracción y otras propiedades elásticas

El cartón corrugado si es sometido a esfuerzos de tracción presenta un comportamiento distinto en las dos direcciones principales, es decir tanto en la dirección de la máquina MD como en la transversal CD.

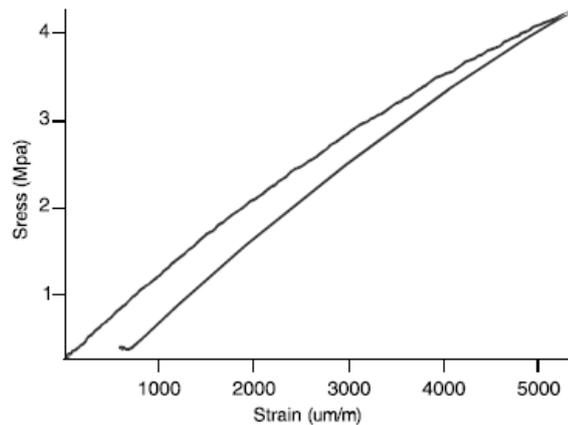


Figura 10 Curva típica del comportamiento del cartón corrugado ante tensión

Fuente: (Z.Aboura, 2004)

Para cuantificar las propiedades de este material ante esfuerzos de tracción se utilizará la norma NTE INEN ISO 1924 - Parte 3, que nos permitirá obtener, mediante el análisis de las gráficas correspondientes a su comportamiento (ver figura 10), los valores correspondientes a:

- **Resistencia a la tracción:** Definida como la fuerza de tracción máxima que puede soportar el cartón corrugado, antes de su rotura, por cada unidad de longitud de su ancho.
- **Rigidez a la tracción:** Es la pendiente máxima de la curva que relaciona la deformación con la fuerza de tracción por unidad de ancho.
- **Módulo de Elasticidad:** Es la magnitud que relaciona la deformación existente en un material, cuando éste ha sido sometido a una tensión y en el caso del cartón corrugado simplemente se la puede obtener dividiendo la rigidez a la tracción para el calibre.
- **Elongación:** Es el incremento de longitud ante el esfuerzo, en este caso, de tracción.
- **Energía Absorbida por Tracción:** Se define como la cantidad de energía que puede absorber una unidad de superficie de una probeta cuando se somete a la máxima fuerza que es capaz de soportar.

También es importante señalar que las propiedades que este material presenta ante esfuerzos de flexión son relevantes, y para cuantificarlas se lo puede considerar como una estructura sándwich compuesta con el fin de utilizar la norma ASTM C393 que describe 3 tipos de ensayos: De carga en un solo punto en el centro del claro, y de carga en dos puntos tanto a un cuarto de distancia del apoyo como a un tercio de la misma.

Esta prueba nos permitirá obtener los valores correspondientes a la rigidez a la flexión en los diferentes sentidos del cartón corrugado y cuya determinación es relevante en muchas de las fórmulas que tratan de predecir su comportamiento; también permite cuantificar el valor de otras propiedades como la resistencia al cizallamiento del núcleo (flauta) y las resistencias de compresión y tracción de las caras exteriores (en este caso los liners).

Para minimizar el efecto del cizallamiento en la prueba realizada con cargas a un cuarto de la longitud entre apoyos, la norma recomienda que exista una relación entre la longitud de claro con el que se realiza la misma y el espesor de la probeta de al menos 20:1, en este sentido cabe mencionar que en un estudio sobre este material Z. Aboura et al. (2004), utilizan, con el mismo fin, una relación de aproximadamente 39 obteniendo resultados satisfactorios. Z. Aboura et al. (2004) en su estudio también analizan la importancia del tamaño del radio del rodillo que va a ejercer la fuerza vertical en las probetas de cartón corrugado (en este caso de flauta tipo C) en la prueba de flexión obteniendo un comportamiento como el que se puede apreciar en la figura 11.

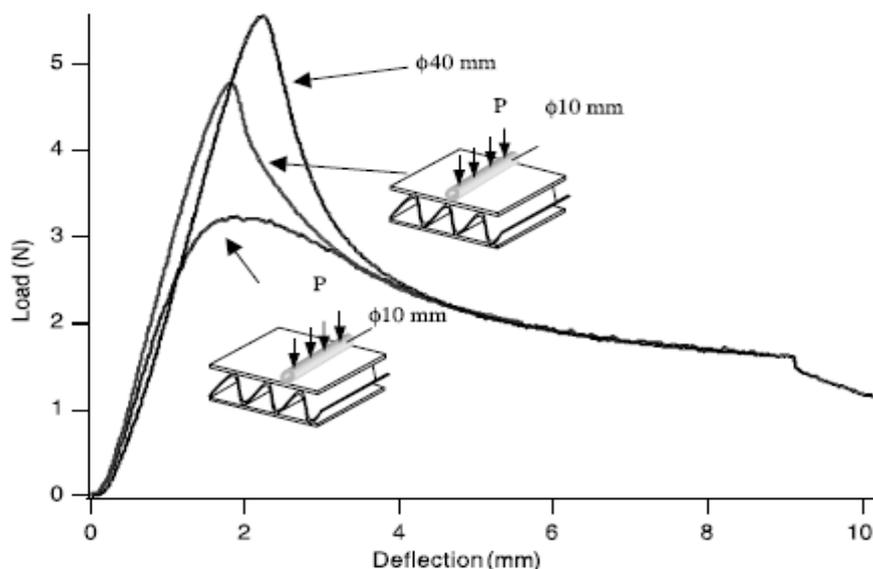


Figura 11 Curvaturas de carga-deflexión para diferentes diámetros del rodillo que aplica la fuerza en el ensayo de flexión.

Fuente: (Z.Abouira, 2004)

En la figura 11, previamente expuesta, también se considera, además del diámetro del rodillo, la posición en la que la fuerza es aplicada en el cartón corrugado; de esta manera se puede ver que cuando ésta se posiciona en la cresta de la flauta los valores obtenidos para la carga máxima aumentan considerablemente al compararla con aquellos que se obtuvieron cuando se aplicó en un sector intermedio entre dos crestas.

La falla del cartón corrugado comienza con una distorsión local en el liner superior del mismo, fenómeno que explica la diferencia de resultados obtenidos en las condiciones de las pruebas realizadas por este estudio. Para minimizar dicho fenómeno el diámetro del rodillo se aumentó de 10 a 40 mm con el fin de evitar la concentración de esfuerzos en un solo punto, lo que logra aumentar la carga máxima que el material puede soportar en este ensayo sin cambiar de manera significativa la pendiente de la curva generada.

Basándonos en este estudio, y para obtener resultados confiables en las pruebas de flexión a realizarse en las probetas de los distintos tipos de cartón corrugado empleados en el presente trabajo, se procederá a construir rodillos

de aplicación de fuerza con un diámetro de 40 mm que permitan minimizar los efectos previamente descritos.

La prueba de flexión puede permitir obtener una curva que relacione la magnitud de la carga aplicada con la deflexión en el espécimen, la cual es útil para realizar cálculos de parámetros como la rigidez y el módulo de flexión.

- **Rigidez a la Flexión**

La rigidez a la flexión será obtenida mediante la aplicación de la fórmula que se encuentra descrita en la norma ASTM C393:

$$D = \frac{P_1 L_1^2 \left[1 - \left(\frac{11 L_2^2}{8 L_1^2} \right) \right]}{48 \Delta_1 \left[1 - \left(\frac{2 P_1 L_1 \Delta_2}{P_2 L_2 \Delta_1} \right) \right]}$$

En donde:

D es la rigidez a la flexión

L es longitud entre apoyos del ensayo

Δ es la deflexión medida en la mitad de la distancia entre apoyos

P es la carga efectuada

El subíndice 1 indica los valores correspondientes a la prueba de flexión realizada con la carga en la mitad de la distancia entre apoyos.

El subíndice 2 indica los valores correspondientes a la prueba de flexión realizada con la carga a un cuarto de la distancia entre apoyos desde los extremos.

La rigidez a la flexión se deberá obtener para las dos direcciones principales del cartón corrugado, es decir en la dirección de la máquina MD y en la transversal CD, y su denominación por lo general es D_{11} y D_{22} respectivamente.

2.2.2.7. Otras Propiedades del Cartón Corrugado

- **Resistencia al estallido**

Es la capacidad que tiene el cartón o el papel para soportar una presión local que se ejerce de un modo paulatinamente creciente. Su unidad de medida generalmente se expresa en kilo pascales. Un índice relacionado con esta propiedad es el denominado Müllen que expresa la relación existente entre la resistencia al estallido y el gramaje del papel.

- **Resistencia al plegado**

Se refiere a la capacidad que tiene el cartón corrugado de soportar un cierto número de dobleces consecutivos sin romperse y en la misma zona.

- **Resistencia al desgarro**

Caracteriza la capacidad que tiene el papel, o en este caso el cartón, de resistir un rasgado iniciado como consecuencia de dos fuerzas opuestas, es decir, ante un esfuerzo cortante.

El índice de desgarro, comúnmente utilizado para describir esta propiedad en el material, es la relación existente entre la resistencia al desgarro medida en unidades de fuerza y el gramaje del papel.

2.3. Adhesivos para cartón

En la producción de bienes y artículos, cuya materia prima principal es el cartón y el papel, se utilizan comúnmente una gran variedad de adhesivos

cuyas características dependen de muchas variables como costos, condiciones ambientales u otros.

En la actualidad, un parámetro a analizar en cuanto a la utilización de adhesivos en la manufactura de cualquier producto hecho a base de papel, cartón, plásticos o metales, es el de su capacidad para no impedir o no dificultar demasiado el que estos materiales se puedan reciclar.

Primeramente se debe mencionar que la película del adhesivo que se colocará en los materiales a unir deberá tener una resistencia más alta que estos y deberá ser lo más fácilmente descartable, mediante las diversas técnicas existentes para dicho fin, de manera que se facilite su reciclaje.

A los adhesivos se los puede dividir en 2 clasificaciones principales:

- **Adhesivos de curado químico**, que son aquellos que requieren de reacciones químicas diversas, también llamadas polireacciones, para permitir la formación de las cadenas poliméricas y su unión, lo que conformará la estructura del adhesivo como tal.
- **Adhesivos de curado físico**, son aquellos adhesivos que contienen el polímero base disuelto y que requieren ciertos efectos físicos como la aplicación de temperatura o presión para lograr la unión de los materiales con los que se desea trabajar.

De estas dos clasificaciones, los denominados de curado físico son los que se utilizan en la unión de papel y cartón, y por lo general, encontramos que pueden ser de tipo termofusible como el pegamento de poliéster comúnmente llamado, de forma errática, como silicona; por otro lado, para la unión de estos materiales también se utilizan los adhesivos en base solvente (se disuelven o dispersan en algún solvente) o base acuosa (se disuelven o dispersan en agua). Cabe mencionar que también existen otros tipos de adhesivos de curado físico pero que, por lo general, son utilizados en diferentes aplicaciones industriales no asociadas al papel y al cartón, como por ejemplo los adhesivos de dispersión, de presión, de poliacrilatos o plastisoles.

El reciclaje del cartón y del papel incluye procesos de centrifugado o el uso de ciclones para separar pequeños trozos de metales y plásticos entre los que puede haber parte de adhesivos que si fuesen de tamaños muy pequeños no serían separados adecuadamente de las pulpas; por este motivo es importante y recomendable que muchos de estos aditivos sean completamente solubles o redispersables en el agua.

Según Onusseit (2003), adhesivos basados en polímeros como el polivinil alcohol, la polivinilpirrolidona y sus copolímeros, la polietiloxazolina, el poliuretano hidrófilo y el óxido de polietileno, y otros adhesivos basados en dextrina, celulosa y almidón muestran buena solubilidad o son fácilmente dispersados en agua. Sin embargo, cabe mencionar que la disolución o dispersión de los adhesivos en el agua mientras se recicla el papel y el cartón puede conllevar a la contaminación de este recurso y, con el tiempo, a la aglomeración de estos aditivos dentro del proceso.

2.4. Estudios sobre comportamiento del cartón

2.4.1. Carga Crítica del Primer Modo de Pandeo

Si se considera al cartón corrugado como una placa especial ortotrópica simplemente apoyada, como lo hizo E. Hahn et al. (1992), para efectuar un análisis de pandeo a causa de cargas cuya dirección sean paralelas a las flautas, entonces mediante la siguiente ecuación se puede conocer la carga crítica de pandeo en el primer modo de fallo:

$$N_{cr} = \pi^2 \left[\frac{D_{11}b^2}{a^4} + \frac{2(D_{12}+2D_{66})}{a^2} + \frac{D_{22}}{b^2} \right]$$

En donde:

N_{cr} Es la carga crítica del primer modo de pandeo por unidad de longitud del material

D_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$) Son elementos de la matriz de rigidez a la flexión

a Es el ancho de la placa

b Es el alto de la placa

Los valores de D_{11} y de D_{22} son aquellos que se pueden obtener mediante el ensayo de flexión y que corresponden a la rigidez a la flexión en las dos direcciones principales del cartón.

Por otro lado, para obtener los valores que corresponden a D_{12} y D_{66} recurriremos a ecuaciones encontradas empíricamente (Baum et al, citado en Hahn et al, 1992), que son:

$$D_{12} = 0.293 (D_{11}D_{22})^{1/2}$$

Y la rigidez a la torsión D_{66} :

$$D_{66} = 0.354 (D_{11}D_{22})^{1/2}$$

Para obtener el coeficiente de pandeo se recurre a la siguiente ecuación:

$$k = \frac{N_{cr}a^2}{\pi^2 D_{11}}$$

Para la utilización de la ecuación descrita por E. Hahn et al. (1992) Se tiene la restricción geométrica de que la relación $\frac{b}{a}$ debe ser igual o menor a 1 para que se asegure el primer modo de pandeo; para ello también se asume una relación $\frac{D_{11}}{D_{22}} = 2.5$, que es típica para el cartón corrugado y se utiliza la figura 12 que muestra al coeficiente de pandeo versus la relación geométrica para placas ortotrópicas a través de los 3 primeros modos de pandeo.

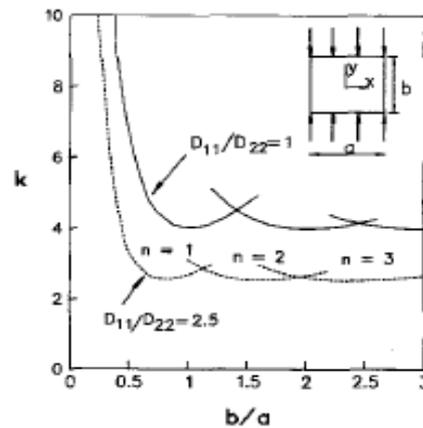


Figura 12 Coeficiente de pandeo versus la relación b/a

Fuente: (Hahn, Carlsson, & Westerlind, 1992)

Sin embargo para una ecuación más generalizada podemos recurrir a las ecuaciones planteadas por Robert Jones (2006) en las que se describen los valores de la carga crítica por unidad de longitud para los diferentes modos de pandeo en placas especiales ortotrópicas:

$$N_{cr} = \pi^2 \left[D_{11} \left(\frac{n}{b} \right)^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left(\frac{m}{a} \right)^2 + D_{22} \left(\frac{m}{b} \right)^4 \left(\frac{a}{n} \right)^2 \right]$$

En donde:

n es el número de curvaturas ocasionadas por pandeo en la dirección y

m es el número de curvaturas ocasionada por pandeo en la dirección x

El menor valor de esta carga obviamente va a ocurrir cuando m sea igual a 1, por lo que la expresión se puede reducir a:

$$N_{cr} = \pi^2 \left[D_{11} \left(\frac{n}{b} \right)^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left(\frac{1}{a} \right)^2 + D_{22} \left(\frac{1}{b} \right)^4 \left(\frac{a}{n} \right)^2 \right]$$

2.5. Diseño Modular

Es una técnica de diseño utilizada para desarrollar productos complejos empleando componentes más pequeños. En este sentido, se puede decir que los componentes a desarrollar pueden tener una o más funciones, además debe ser factible su unión, que al ser realizada, permitirá formar un conjunto con una funcionalidad más amplia que es la que satisfará las necesidades del usuario.

Para efectuar un diseño modular adecuado es importante el análisis que se debe llevar a cabo sobre la función del producto en aras de descomponerla en otras sub funciones para las que cada módulo deba ser diseñado.

El criterio de diseño modular puede ser aprovechado en 3 áreas, tanto de manera singular como unificada, y son:

- Diseño de productos en donde los módulos al ser combinados cumplen una función unificada como estructura. En el diseño de productos modulares comúnmente se desarrolla una estructura núcleo a la cual se juntan otras partes más pequeñas que la complementarán funcionalmente.
- Diseño de problemas, en donde la modularidad se enfoca en descomponer a un problema general sobre cualquier temática en otros sub problemas funcionalmente independientes, pudiendo de esta manera brindar soluciones que lleven a solventar al problema general de una forma más estructurada.
- Diseño de sistemas de producción

2.5.1. Categorías Modulares

Se pueden distinguir dos categorías para los módulos: los denominados funcionales que se encargan de cumplir una función determinada ya sea individual o colectiva cuando se unen con otros módulos, y además los

módulos de producción que no son diseñados para cumplir una función específica y que se los concibe bajo criterios productivos de las líneas implementadas existentes o a implementar.

Los módulos funcionales pueden, a su vez, ser clasificados de acuerdo a las funciones que van a desempeñar, lo que se muestra claramente en la figura 13 y a continuación se detalla:

- Básicos, que se encargan de cumplir la función principal de forma parcial o completa.

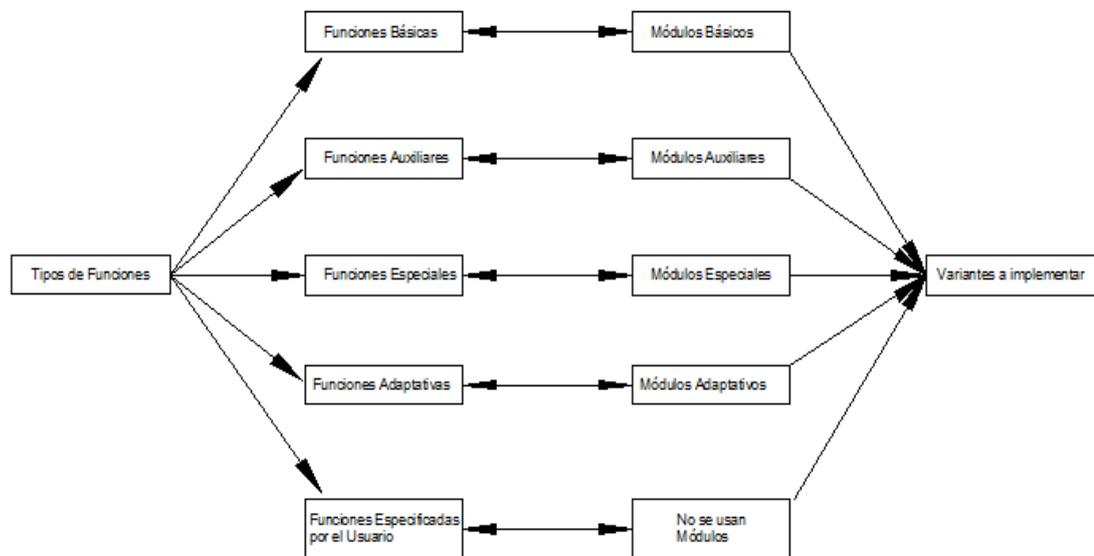


Figura 13 Tipos de módulos y sus funciones

Fuente: (Kamrani & Salhieh, 2000, pág. 21)

- Auxiliares, que se encargan de complementar a los básicos.
- Especiales, con sub funciones específicas que no son contempladas por los módulos básicos ni auxiliares.
- Adaptativas, que permiten la adaptación de un sistema o producto con otro.

- En el caso de funciones especificadas por el cliente, no se contemplan módulos ya que se los diseña individualmente aunque esto no excluye que en su estructura puedan llevar una combinación con partes modulares.

2.5.2. Categorías de Modularidad

De acuerdo al tipo de combinación e interacción que los módulos puedan tener en un producto, se pueden definir 4 categorías de modularidad:

- **Modularidad con intercambio de componentes:** Implica la combinación de varios tipos y alternativas de elementos auxiliares o complementarios con un mismo componente básico como se muestra en la figura 14.

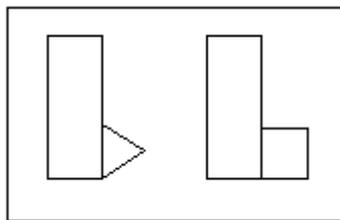


Figura 14 : Módulos con intercambio de componentes

Fuente: (Kamrani & Salhieh, 2000, pág. 23)

- **Modularidad en la que se pueden compartir componentes:** Este tipo de modularidad incluye el caso en el que diferentes componentes básicos pueden ser asociados o combinados con un mismo tipo de elementos; la figura 15 nos muestra un esquema simplificado de esto.

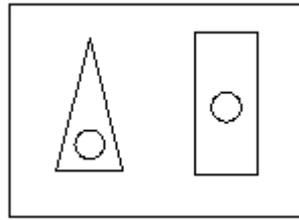


Figura 15 Módulos que pueden compartir componentes

Fuente: (Kamrani & Salhieh, 2000, pág 23)

- **Modularidad para adaptabilidad:** En este tipo de modularidad, como se puede apreciar en la figura 16, se puede decir que se fabrican componentes con formas o tamaños estándar, de manera que se los puede asociar con una cantidad indefinida de elementos adicionales.

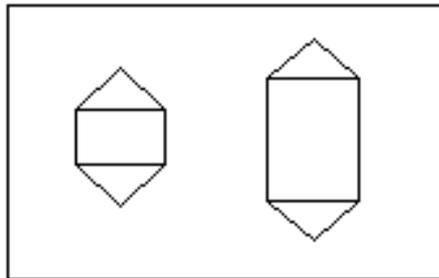


Figura 16 Módulos diseñados para la adaptabilidad

Fuente: (Kamrani & Salhieh, 2000, pág. 24)

- **Modularidad tipo bus:** En este tipo de modularidad, un módulo puede ser empatado con una diversa cantidad de componentes básicos cuyas dimensiones y forma puede diferir, y además la ubicación de los mismos puede ser variada acorde a las necesidades del usuario; un ejemplo esquemático como el de la figura 17 nos puede ayudar a entender cómo se maneja.

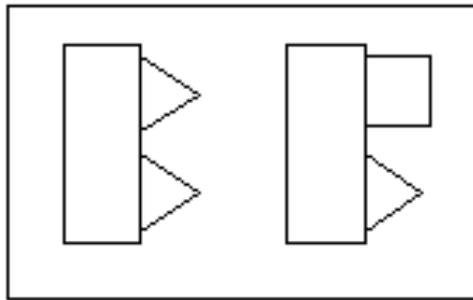


Figura 17 : Modularidad tipo bus

Fuente: (Kamrani & Salhieh, 2000, pág. 24)

2.5.3. Desarrollo de Sistemas de Tipo Modular

Un sistema modular se concibe mediante 2 pasos importantes que deberán ser sorteados satisfactoriamente para obtener un diseño adecuado. El primer paso implica la descomposición del sistema en sus elementos o subsistemas físicos funcionales más básicos, y el segundo paso implica la integración de estos para conformar un sistema capaz de cumplir con la función general para la que se ha concebido inicialmente.

La descomposición de los sistemas trae dos ventajas prácticas que son la simplificación y la velocidad con la que se pueden enfrentar los problemas relacionados con el cumplimiento de la funcionalidad del producto final. Esta descomposición se puede realizar mediante 2 metodologías:

- *Modularidad del Producto*, que enfatiza en la independencia de sus componentes y en donde estos pueden ser diseñados o reemplazados por otros prediseñados que posean características físicas y funcionales análogas.
- *Descomposición Estructural*, que enfatiza la dependencia de cada mínima parte en el producto, aquí los sistemas se descomponen en subsistemas y, estos a su vez en componentes; al realizarlo, el análisis y el diseño se harán desde la jerarquía más baja a la más alta.

2.5.4. Metodología de Diseño Modular

Kamrani (2000) propone una metodología enfocada en el cumplimiento de los criterios de diseño para funcionalidad, ensamblaje y manufactura en cuanto a productos modulares.

Las fases mencionadas por el autor mencionado son 3:

- a) Análisis de Descomposición, enfocado al diseño para modularidad
- b) Análisis de Producto, enfocado el ensamble y el análisis funcional.
- c) Análisis del Proceso, enfocado en el diseño para la manufactura.

2.5.5. Análisis de Descomposición y Diseño Modular

En la primera fase, enfocada en el diseño modular, Kamrani plantea 4 pasos fundamentales como son:

1. Análisis de Necesidades: Aquí se deberá primeramente entender y luego describir al producto de forma íntegra tomando en cuenta las necesidades funcionales para las que se desarrollará y las limitaciones físicas a las que se regirá. En este paso se deberá recopilar la información de aquello que el usuario necesita y lo que espera del producto final para su completa satisfacción.

2. Análisis de los Requerimientos: Los requerimientos que tiene el cliente pueden ser divididos en tres tipos para poder analizar de mejor manera su importancia:

- Objetivos funcionales, son los requerimientos básicos por los que el usuario adquirirá los bienes y productos.
- Requerimientos funcionales-operacionales, que constituyen información detallada y específica acerca de las restricciones que debe tener el producto para satisfacer al cliente.

- Requerimientos funcionales generales, que cumplen con las necesidades secundarias de los clientes y que pueden influenciar de forma crítica en la decisión de los mismos ante varios productos de índole similar.

3. Análisis de la Concepción del Producto: Aquí se da la reducción del producto en elementos físicos y funcionales básicos. Los elementos funcionales representan a toda operación, transformación, o función que se deriva del desempeño general del producto; mientras que los elementos físicos son toda parte, componente o sub ensamble concebido dentro del sistema y con una función específica que contribuye al funcionamiento general del mismo.

Los elementos funcionales y físicos pueden ser relacionados mediante un diagrama funciones-componentes como el de la figura 18.

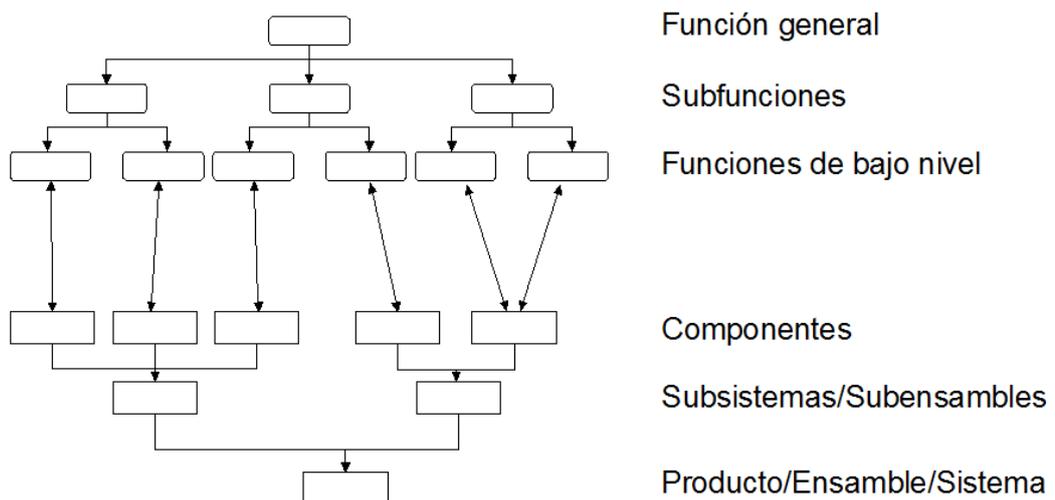


Figura 18 Diagrama Función-Componente

Fuente: (Kamrani & Salhieh, 2000, pág. 66)

En la descomposición física, el producto deberá ser analizado de manera que se pueda dividir en todos los subsistemas que cumplen diversas subfunciones, y que a su vez, se encuentran conformados por componentes hasta lograr llegar a la unidad más básica dentro de todo el sistema.

Por otro lado, en la descomposición funcional se analizará el comportamiento y las funciones que debe tener y cumplir el producto final y sus partes constitutivas; en este sentido se debe decir que el sistema deberá ser sub dividido en cuantas funciones mínimas sean necesarias hasta que estas puedan ser desempeñadas por un componente o por la combinación de algunos de ellos.

4. Integración: Luego de descomponer al producto en diferentes elementos, estos deben ser agrupados, bajo ciertos criterios, en módulos para posteriormente ser ubicados y ensamblados de forma adecuada en aras de producir un sistema funcional satisfactorio.

De ser necesario, para concebir la agrupación de varios componentes en un solo módulo, se pueden utilizar metodologías como el índice de similitud que muestra cuanto se asemeja un componente a otro (física y/o funcionalmente) gracias a la utilización de una matriz. Los componentes con un alto nivel de asociación pueden ser agrupados en una sola idea que derive en la concepción de uno o varios tipos de módulos que deberán ser optimizados posteriormente.

2.5.6. Diseño enfocado en el ensamble

Este tipo de diseño tiene como principal propósito el de concebir a cada parte y subsistema de un producto de manera que éste sea fácil de ensamblar, logrando así una reducción de tiempo y costos totales en su manufactura.

Un método para realizar el diseño enfocado en el ensamble final del producto es el propuesto por Boothroyd y Dewhurst, mencionado por Kamrani (2000), que tiene 3 lineamientos principales:

- Determinar el método de ensamblaje más adecuado ya sea manual, mecánico o incluso automatizado.
- Reducir el número de partes individuales que conformarán el producto.

- Asegurarse que todas las partes sean fáciles de ensamblar en la continuidad del proceso de manufactura.

2.5.6.4. Ensamble Manual

Generalmente el tipo de ensamble menos costoso es el manual en el cual se utilizan herramientas simples y operarios capacitados, sin embargo ciertas situaciones y condiciones especiales de las partes de ciertos productos requieren de precisión, fuerza u otras particularidades que solo pueden ser suplidas por el uso de máquinas que incluso pueden requerir ser automatizadas.

Existen cierto número de recomendaciones para los diseños que van a ser desarrollados mediante ensambles manuales:

- En lo posible reducir el número y tipo de partes
- Diseñar cada parte para que sea auto-alineable
- Diseñar partes que no puedan ser ubicadas de forma incorrecta
- Maximizar la simetría o por el contrario desarrollar partes muy asimétricas
- Asegurar un fácil manejo de las partes a ensamblar

2.5.7. Diseño para la Manufactura

En este enfoque de diseño se analiza el desarrollo del producto tomando en cuenta tanto su funcionalidad como su manufacturabilidad; para ello se hace uso de cierta información que comprende especificaciones de maquinaria, costos, características y disponibilidad de materiales, variaciones en los diseños, etc.

Este enfoque de diseño tiene como lineamientos a 4 criterios:

1. Compatibilidad entre las características del producto, su material y el proceso de manufactura que lo desarrollará.
2. Complejidad, que se verá influenciada por características como el tamaño, acabados, niveles de detalle del producto, etc.
3. Eficiencia del proceso y del uso del material
4. Evaluación del impacto de las decisiones tomadas guiándose tanto en la manufacturabilidad como en la funcionalidad del producto.

2.6. Muebles

2.6.1. Generalidades y Clasificación

Un mueble es una estructura concebida para facilitar la ejecución de ciertas actividades humanas habituales y que decora el interior de lugares como casas, oficinas u otros.

A los muebles se los puede clasificar bajo diferentes criterios que consideren su propósito, funcionalidad, forma de construcción, tecnología y el material con el que se lo manufacturó, etc.

Tomando en cuenta una visión muy general, las estructuras mobiliarias, de acuerdo a su propósito, pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Para oficinas y edificios públicos (en donde se incluyen cines, hospitales, hoteles, escuelas, cantinas, etc.)
- Para casas, cuartos y lugares residenciales
- Para transporte (aviones, trenes, autos, etc.)

Por otro lado, tomando en cuenta la funcionalidad para la que es concebida cada tipo de muebles, se los puede clasificar así:

- Para sentarse y descansar (ver figura 19)
- Para reclinarse

- Para trabajar y comer (ver figura 20)
- Para aprendizaje
- Para almacenamiento (ver figura 21)
- Mueblería multifuncional
- Mueblería complementaria

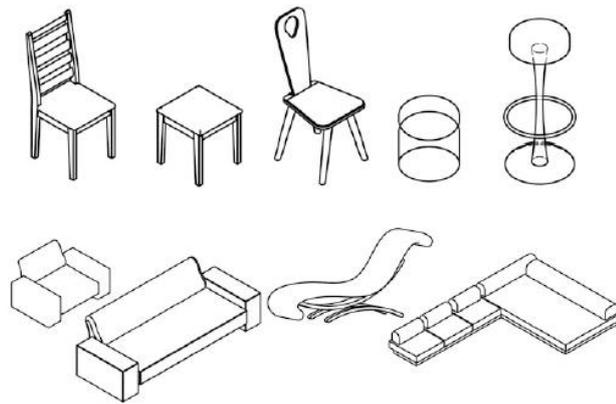


Figura 19 Mueblería para sentarse y descansar

Fuente: (Smardzewski, 2015, pág. 51)

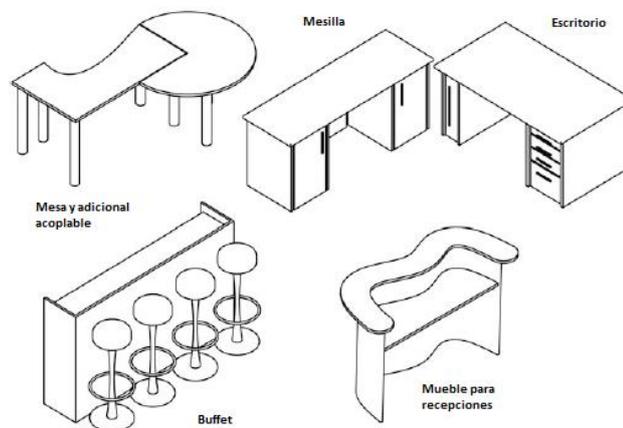


Figura 20 Mueblería para trabajar y comer

Fuente: (Smardzewski, 2015, pág. 53)

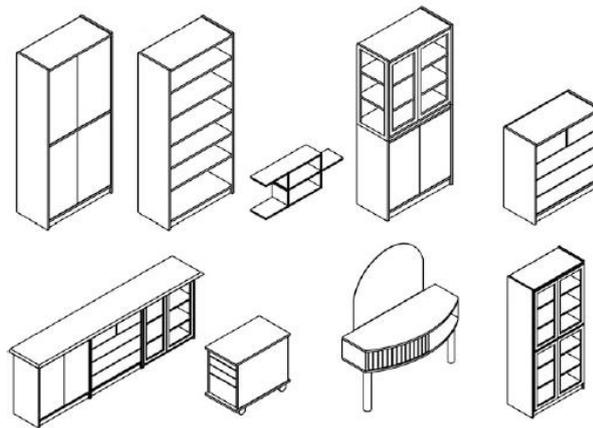


Figura 21 Mueblería para almacenamiento

Fuente: (Smardzewski, 2015, pág. 54)

Para el propósito del presente trabajo es también importante mencionar la clasificación que se realiza para las estructuras mobiliarias de acuerdo a su forma y construcción; en este ámbito existen 3 parámetros distinguibles que son la organización espacial de la forma, la manera en que se interconectan los componentes principales de la estructura y su arquitectura.

Al analizar la organización espacial de la forma que tenga el mueble y sus partes, se pueden distinguir 3 esquemas básicos, que también se los puede visualizar en la figura 22, y son:

- Estructura espacial abierta, en donde predominan los elementos lineales y superficiales.
- Estructura parcialmente abierta, en donde se distinguen y coexisten tanto elementos volumétricos como superficiales y lineales, sin predominar ninguno de forma amplia.
- Estructura volumétrica, en donde predominan los elementos volumétricos, aunque puede existir una pequeña participación de elementos lineales o superficiales de acuerdo al diseño.

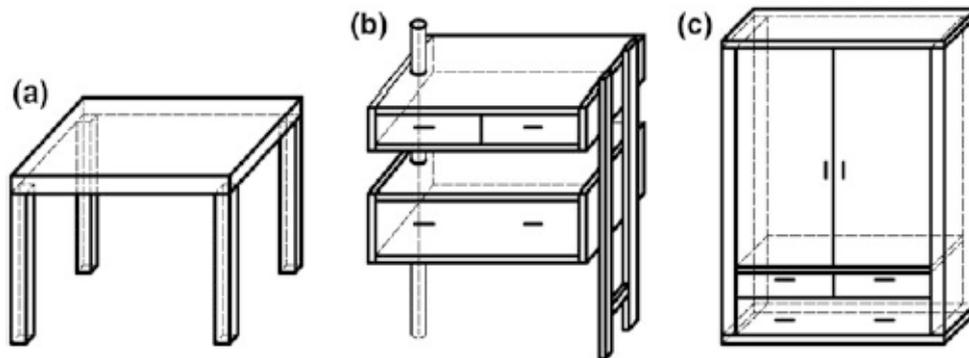


Figura 22 Muebles según la organización espacial de su forma: a) con estructura espacial abierta, b) con estructura espacial parcialmente abierta y, c) estructura espacial volumétrica

Fuente: (Smardzewski, 2015, pág. 55)

Dentro de los muebles con estructura espacial volumétrica podemos distinguir una subclasificación que es la de tipo modular.

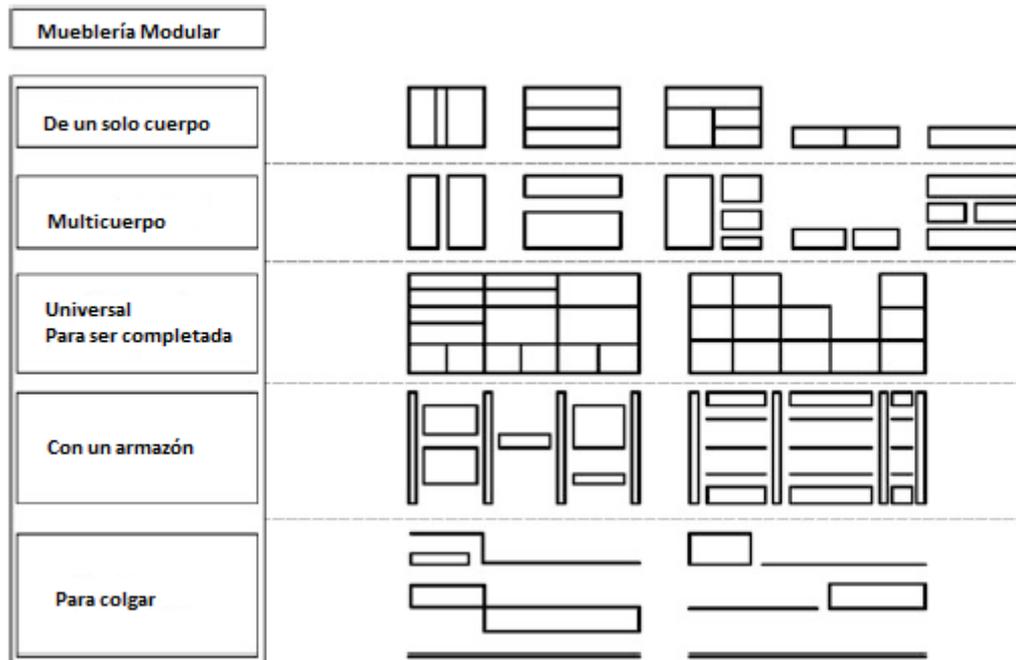


Figura 23 Mueblería Modular

Fuente: (Smardzewski, 2015, pág 56)

La mueblería de tipo modular es concebida de forma que se pueda crear una estructura funcional con elementos, cuya forma y dimensiones deben ser de carácter universal o unificado, que posibiliten una combinación adecuada en aras de desarrollar un sistema de características satisfactorias. Dicho sistema, de acuerdo al diseño, podrá ser completado o armado y desarmado. Existen varios tipos de diseños distintos para mueblería modular (ver figura 23) y son:

- De un solo cuerpo
- Multicuerpo
- Universal para ser completada
- Con un armazón
- Para colgar

En cuanto a la forma de interconexión que tengan los componentes, ensambles y subensambles, se pueden distinguir los siguientes tipos de mobiliaria:

- No desmontable, cuya estructura es compacta y no permite el desmontaje de sus partes individuales.
- Desmontable, formado por sólidos que pueden ser desmontados y reensamblados.
- Para ensamble personalizado o individual

2.6.2. Tipos de muebles de cartón corrugado

Peter Raacke fue el primer diseñador trascendental que concibió la idea de utilizar cartón, como alternativa económica y como sustituto de otros materiales, en la fabricación de muebles al lanzar la línea de productos mobiliarios Otto en el año de 1968 (ver figura 24).



Figura 24 Ejemplares de la línea de muebles de cartón Otto

Fuente: (Czerwinski & Pérez, 2010, pág. 143)

Posteriormente y tan solo alrededor de un año después, el arquitecto Frank Gehry también incursionó en el uso de este material con la línea de muebles Easy Edges de la empresa Vitra y en la cual se encontraban sillas laterales, mesas de comedores, mesas bajas y otros artículos similares. En la figura 25 podemos apreciar uno de los principales trabajos de Gehry, que consiste en una silla lateral conocida como Wiggle chair que incluso es exhibida en el Museo de Diseño de Londres y, que consiste en 60 capas de cartón corrugado cortadas con la misma forma y apiladas una a lado de otra.



Figura 25 Wiggle Side Chair de Frank Gehry

Fuente: (Vitra, s.f.)

Con el paso del tiempo, numerosos diseñadores y compañías importantes han construido muebles a base de los diferentes tipos de cartón; sin embargo, en el presente trabajo se recurrirá a la clasificación efectuada por David Durance (2009), presentada en la figura 26, para lograr describir de forma más precisa lo que hasta ahora se ha realizado en la industria.

En cuanto a muebles de cartón corrugado se tienen 3 subclasificaciones principales que describen la forma de uso y disposición del material en la estructura:

- Con dobleces
- A base de apilamiento de láminas
- Con ranuras en las láminas de cartón

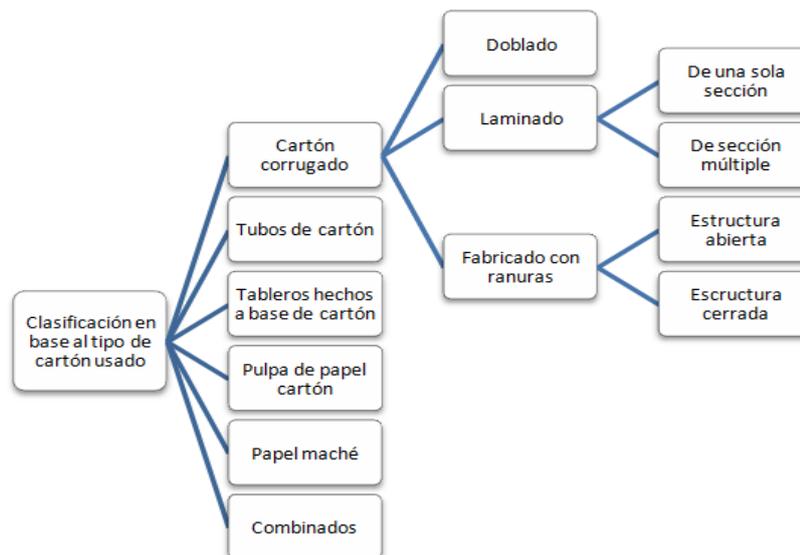


Figura 26 Clasificación de Muebles de Cartón

Fuente: (Durance, 2009)

La silla denominada “folded chair”, creada por David Wilson para el establecimiento comercial Habitat, de gran resistencia debido al diseño en forma de estrella inspirado en el arte del origami y que se muestra en la figura

27, es un ejemplo de muebles de cartón corrugado en el cual se utilizan dobleces para dar forma a la estructura.

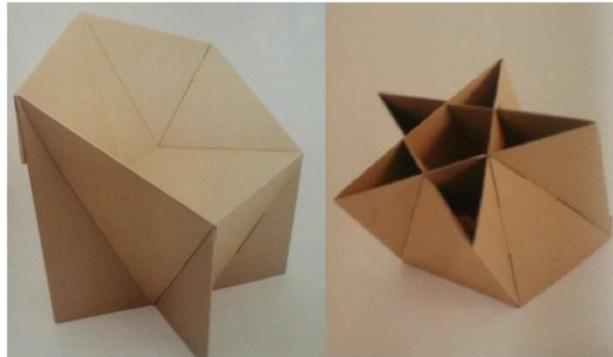


Figura 27 Ejemplares de la línea de muebles de cartón Otto

Fuente: (Czerwinski & Pérez, 2010, pág. 128)

Otro tipo de muebles de cartón corrugado se puede construir cuando las láminas de este material son unidas de forma sucesiva hasta formar la estructura completa; en este caso, ciertos diseños pueden utilizar láminas cuya sección sea distinta o que sea exactamente la misma en todos los casos (ver figura 28).

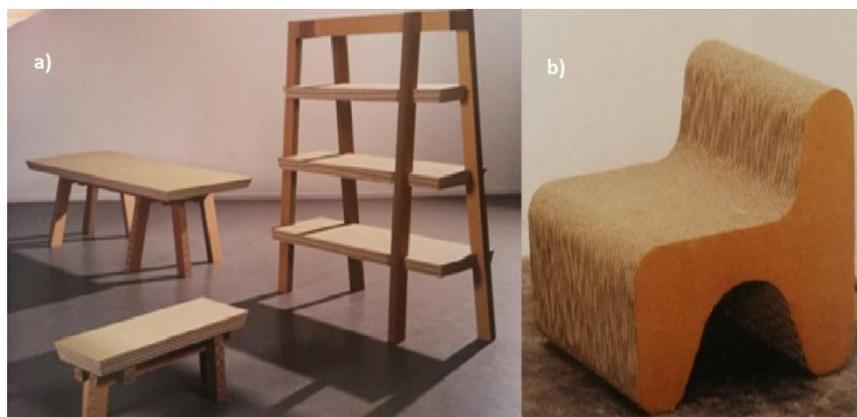


Figura 28 Diseños de muebles con láminas de cartón corrugado: a) De sección distinta (diseño de Real-Made) y, b) de sección igual (diseñado por Alex Hellum)

Fuente: (Czerwinski & Pérez, 2010, pág. 130 y 145)

Muebles de cartón en los que se utiliza esta misma técnica son aquellos diseñados por Rienhard Dienes que han sido internacionalmente aclamados por la comunidad de diseñadores, entre los cuales podemos ver estantes para libros y aparadores como se muestra en la figura 29.

Por otro lado, otra técnica utilizada para construir muebles de cartón corrugado es abrir ranuras en las diferentes láminas con la finalidad de acoplarlas unas con otras a un cierto espaciamiento y en una dirección determinada, logrando de esta manera formar una estructura en forma de malla. En este tipo de muebles de cartón se pueden diferenciar tanto aquellos en los que se ha recubierto la malla generada mediante capas de diversos materiales (estructura cerrada) o aquellos en los que no se ha utilizado recubrimiento alguno (de estructura abierta).

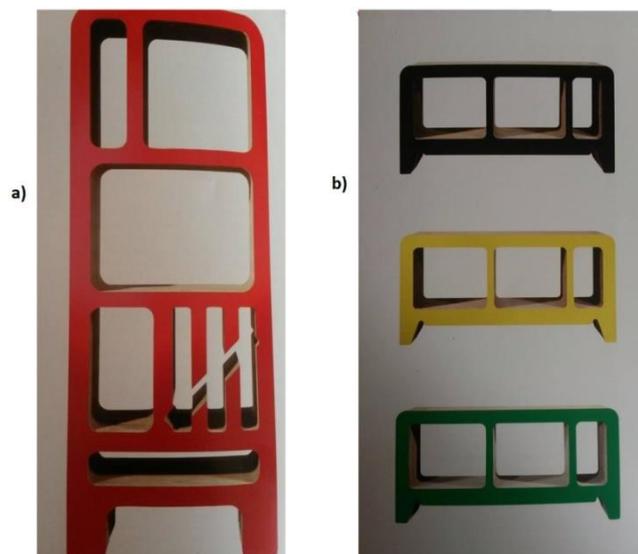


Figura 29 : Muebles diseñados por Rienhard Dienes: a) Estantería de libros modelo Dickens y, b) Aparador modelo Georgia

Fuente: (Czerwinski & Pérez, 2010, pág. 114 - 115)

David Graas es un diseñador que ha incursionado en esta técnica y un ejemplo de sus trabajos, en los que prepondera la simpleza, son la silla y el sillón de estructura abierta mostrados en la figura 30.

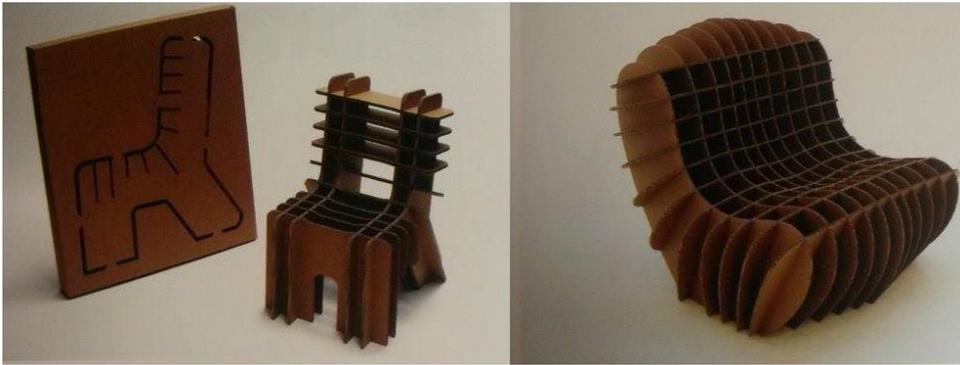


Figura 30 Muebles con cartón corrugado ranurado hechos por David Graas

Fuente: (Czerwinski & Pérez, 2010, pág. 127)

Se debe mencionar que también existen muebles que utilizan la bondad de la resistencia mecánica presentada por los tubos de cartón; dentro de los diseñadores que han utilizado este material se encuentra Shigeru Ban quien ha extendido su uso inclusive a la construcción de casas para refugiados de **desastres naturales y desplazados por la guerra. En la figura 31 podemos apreciar** sillas y una mesa de centro que utilizan este mismo material.



Figura 31 Muebles hechos con tubos de cartón

Fuente: (wb form, s.f.)

2.6.3. Tubos de cartón

Los tubos de cartón son elementos que, por su gran resistencia, se han utilizado en una diversidad de aplicaciones que no solo se limitan a la industria y al embalaje sino que también incluyen áreas como la arquitectura, el diseño de interiores y también la construcción de muebles; de esta manera, en el presente trabajo se tomará en cuenta su utilización en los diseños a realizar.

Estos tubos (ver figura 32) se obtienen mediante el enrollado, en forma espiral, de múltiples capas de cartón alrededor de un eje y que son unidas, por lo general, mediante adhesivos hechos a base de almidones o PVA.



Figura 32 Tubos de cartón

Fuente: (Industrias Omega, s.f.)

En el estudio de Gribbon et al. (2008) Encontramos estimaciones de las propiedades mecánicas presentadas por tubos de cartón que han sido utilizados en sus trabajos previos, las cuales se citan en la tabla 4; cabe mencionar que dichas propiedades varían de acuerdo al material, a los adhesivos utilizados y la manera en que fue manufacturado el producto.

Para utilizar los tubos de cartón se deberá, primeramente, evaluar la resistencia mecánica de los mismos, así como también es necesario contemplar un análisis de fallo por pandeo.

Tabla 4

Propiedades mecánicas de tubos de cartón

| Propiedad | Valores |
|---|-------------------------------|
| Resistencia a la tracción/compresión | 8.1 N/mm ² |
| Resistencia a la tracción/compresión de diseño a largo plazo tomando en cuenta efectos de creep | 0.8 – 2.2 N/mm ² |
| Módulo de Young | 1000 – 1500 N/mm ² |

Fuente: (Gribbon & Foerster, 2008)

Como se puede observar en la tabla 4, los valores correspondientes a la resistencia a la tracción y compresión se disminuyen a valores comprendidos entre el 10 % y el 27 %, en comparación a su resistencia original, para tomar en cuenta los efectos causados por el creep causado por esfuerzos a los que pudiese estar sometido el material por un largo periodo de tiempo.

2.6.4. Ergonomía

La ergonomía es una ciencia basada en estudios biológicos y tecnológicos, cuyo fin es lograr una mejor adaptabilidad de la máquina y objetos al operador mediante diseños amigables a la constitución del ser humano.

Para desarrollar un diseño ergonómico es importante mantener una armonía y equilibrio entre el objeto a diseñar y el hombre, por ende esta ciencia trata de evitar al máximo lesiones y enfermedades permanentes o

temporales ocasionadas por la utilización de maquinaria, tecnología o en cualquier actividad relacionada con la manufactura manual de productos y otras actividades.

Un diseño ergonómico brinda comodidad al mayor número de personas posibles, pues, su propósito esencial es mejorar la calidad de vida del usuario y mantenerlo fuera de cualquier problema de salud y conceder comodidad en su lugar de trabajo.

En el análisis de ergonomía también se recurre al número denominado áureo, el cual ha sido utilizado para el dimensionamiento en diversas obras de arte de grandes artistas como Miguel Ángel o Leonardo Da Vinci, inclusive podemos encontrar en la Gran Pirámide de Gizah vestigios de dimensionamientos en los que fue utilizada la misma concepción.

De esta manera, se pueden dimensionar ciertos parámetros de los muebles en función de este número, lo cual nos llevará a diseños que se ajusten de mejor manera a los usos para los que se encuentren destinados, un ejemplo de ello es el estante mostrado en la figura 33.

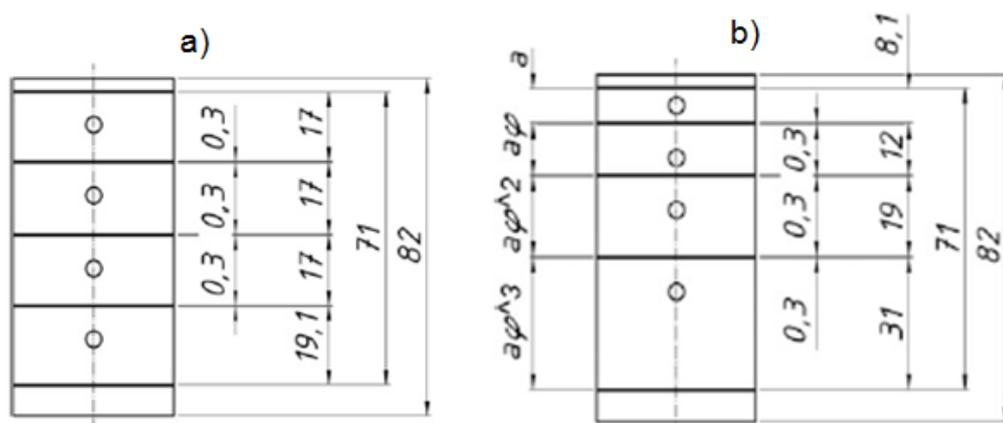


Figura 33 Diseño de un estante con cajones utilizando a) dimensionamientos regulares y b) dimensionamientos con la proporción áurea

Fuente: (Smardzewski, 2015, pág 116 y 117)

2.6.5. Antropometría

La antropometría es el estudio dimensional del cuerpo humano y sus características físicas basándose en la situación geográfica y en las condiciones del medio en el que vive. Esta ciencia permite medir longitudes, anchos, grosores, circunferencias, volúmenes, centros de gravedad y masas de varias partes del cuerpo, las cuales tienen diversas aplicaciones en muchos ámbitos.

El estudio antropométrico es fundamental y de importancia decisiva en el diseño de sistemas de manejo humano debido a que, si las máquinas o elementos de uso común no respetan las normas establecidas en este ámbito, se generan esfuerzos innecesarios en los músculos de ciertas zonas, como las piernas y la espalda, provocando cansancio muscular que culminará en fatiga; dicho malestar se desarrolla también sobre la cabeza, el cuello y los brazos originando en el usuario incluso defectos musculares, ocio y síndromes adquiridos por mal posicionamiento del cuerpo.

2.6.6. Normativa INEN para muebles

Para lograr un diseño óptimo y de características adecuadas que posibiliten el uso sin problemas de un mueble de oficina, es necesario conocer los aspectos técnicos, ergonómicos y estéticos que su normal funcionamiento requieren. Para ello, dentro de la normativa del país, regida por el INEN, se especifican tres tipos diferentes de mobiliaria:

- Muebles para uso en oficinas
- Muebles para uso en el hogar
- Muebles para uso escolar

Ya que el presente proyecto contempla tan solo el diseño mobiliario de oficina, se puede mencionar que las normas afines a la construcción, ergonomía, antropometría y calidad de este tipo de muebles son:

- Norma técnica Ecuatoriana 1556 muebles de oficina. Definición y clasificación
- Norma Técnica Ecuatoriana 1642 Muebles de oficina. Unidad de Almacenamiento. Requisitos
- Norma Técnica Ecuatoriana 1641 Muebles de oficina. Escritorio y mesas. Requisitos
- Norma Técnica Ecuatoriana 1647 Muebles de oficina. Asientos. Requisitos
- Norma Técnica Ecuatoriana 1649 Muebles de oficina. Escritorio y mesas. Requisitos físicos de Calidad.
- Norma Técnica Ecuatoriana 2002. Muebles de oficina. Método de ensayo para asientos
- Norma Técnica Ecuatoriana 1648. Muebles de oficina. Método de ensayo para escritorios y mesas.

2.6.7. Diseño de una silla de oficina

Previo a la realización del diseño de una silla de oficina, es necesario adquirir conocimientos de antropometría y ergonomía vinculados con este artefacto para posteriormente realizar un análisis que nos permita lograr un producto de buena calidad y propiedades mecánicas satisfactorias.

Entiéndase por silla de oficina al artículo mobiliario independiente que cuenta con una superficie para sentarse y un espaldar que da alojamiento a una sola persona; este artefacto puede disponer de apoyaduras para los brazos y acolchonamiento en la superficie del asiento si el diseñador así lo precisa.

El asiento escogido para el presente trabajo es una silla de oficina fija, la misma que posee una superficie estable para sentarse, espaldar, base estructural y una apoyadura en los brazos opcional.

2.6.7.4. Normativa dimensional de una silla de oficina

Las medidas recomendadas para un diseño que garantice un producto de alta calidad y totalmente amigable con la constitución humana son las que se muestran en la tabla 5 cuya nomenclatura está basada en la figura 34, mostrada a continuación:

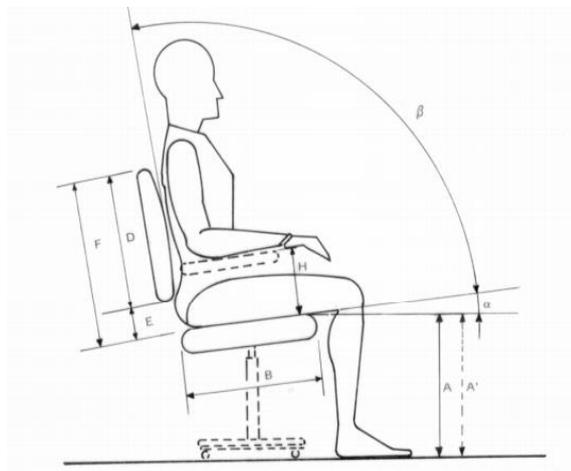


Figura 34 Requisitos dimensionales de sillas fijas y móviles

Fuente: Norma NTE INEN 1647

Tabla 5

Requisitos dimensionales de sillas fijas y móviles

| Denominación | Gráfico | Rango(mm) |
|---|----------|---------------|
| Altura del asiento comprimido | A | 420-490 |
| Límite mínimo y máximo del asiento comprimido con regulación de altura | A` | 400-510 |
| Profundidad útil del asiento | B | 380-450 |
| Ancho del asiento | C | 400 mínimo |
| Altura del espaldar | D | 160 mínimo |
| Altura libre entre asiento comprimido y espaldar | E | 180 máximo |
| Altura del punto más alto del espaldar con relación al asiento comprimido | F | 300-420 |
| Ancho del espaldar | G | 320 mínimo |
| Altura del brazo con respecto al asiento comprimido | H | 175-255 |
| Distancia interior en los brazos | I | 450 mínimo |
| Inclinación del asiento con relación al plano Horizontal | α | 0-5 Grados |
| Inclinación del espaldar con relación al asiento | β | 95-105 Grados |

Fuente: Norma NTE INEN 1647

2.6.8. Diseño de un escritorio de oficina

Se define a una mesa de escritorio mobiliario como un artículo independiente de oficina con una superficie lisa y plana, para escritura y otras aplicaciones, que debe tener como mínimo una gaveta para almacenamiento, sin importar el proceso de conformado o los materiales de los cuales este fabricado.

Dentro de la gran variedad de escritorios de oficina se ha optado por un diseño de una mesa de escritorio fijo tipo C con un bloque de gavetas (ver figura 35) que puede estar ubicado en cualquier parte del mueble pero no debe interrumpir el paso de las piernas ni molestar la postura del usuario en su silla.

El diseño del escritorio va a respetar dimensionamiento que exigen las normas del país, en este caso la NTE INEN-1641. Entre las principales medidas que se pueden mencionar, no se debe tener una superficie plana y lisa de menos de 600 mm x 900mm y el mobiliario no puede tener una altura inferior a los 710 mm.

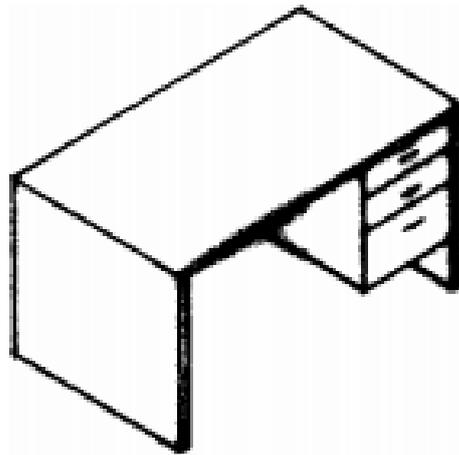


Figura 35 Escritorio tipo C

Fuente: Norma NTE INEN 1641

2.6.8.4. Normativa Dimensional

Las medidas recomendadas para el diseño de un escritorio, tomando en cuenta aspectos antropométricos y de ergonomía, se encuentran tabuladas en la tabla 6 y su nomenclatura se basa en la designada en las figuras 36 y 37:

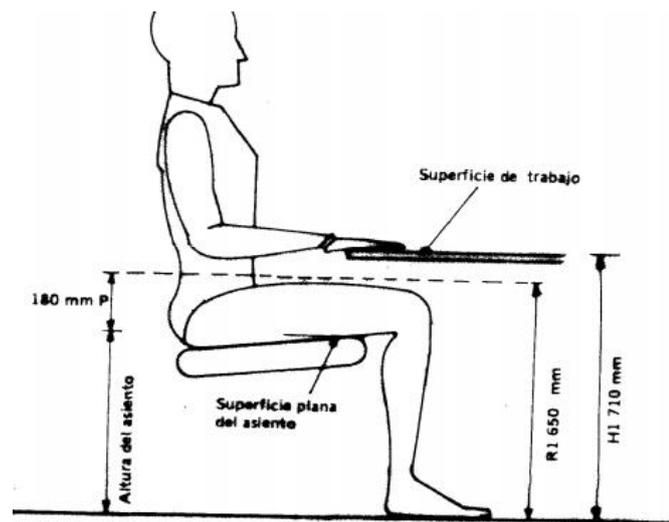


Figura 36 : Medidas para escritorios basados en criterios antropométricos y ergonómicos para el Ecuador

Fuente: Norma NTE INEN 1641

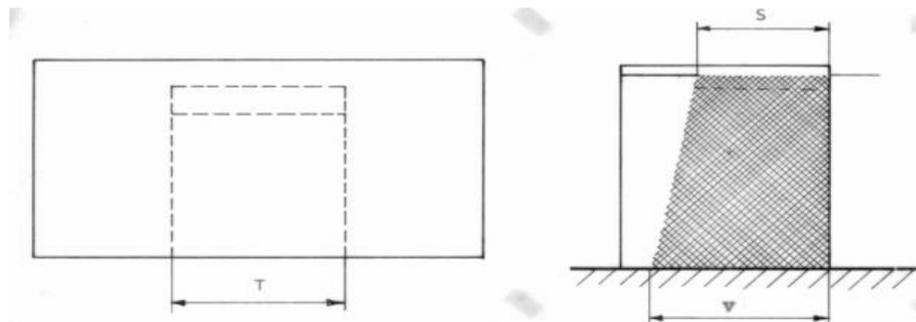


Figura 37 Medidas para dimensionamiento de espacios libres en escritorios basados en criterios antropométricos y ergonómicos para el Ecuador

Fuente: Norma NTE INEN 1641

Tabla 6**Medidas para el dimensionamiento de escritorios**

| Denominación | Nomenclatura | Figura | Rango (mm) |
|---|--------------------------|--------|------------|
| Altura libre bajo el tablero | R1 | 1 | min |
| Altura libre entre asiento y superficie | Inferior bajo el tablero | P | 1 min |
| | Ancho libre | T | 3 min |
| Espacio libre en profanidad | Al nivel de las rodillas | S | 3 min |
| | Al nivel de los pies | V | 3 min |

Fuente: Norma NTE INEN 1641

2.6.9. Diseño de un estante de almacenamiento

Dentro de los elementos estructurales de almacenamiento de mobiliario en oficina, de acuerdo a la norma NTE INEN 1642, tenemos: el estante (ver figura 38), credencias y además archivadores laterales y frontales.

El estante de almacenamiento en oficina es un artículo mobiliario independiente que consta de un cuerpo estructural, repisas y si es necesario puertas o clasificadores de documentos.

El diseño de las proporciones de las repisas dependerá del dimensionamiento máximo de los documentos que se puedan alojar en estos, medidas dadas en las normas para papel INEN 72. La identificación y clasificación de un estante de oficina dependerá de sus características físicas: dimensionamiento general y servicios (número y tipo de repisas que las constituyen).

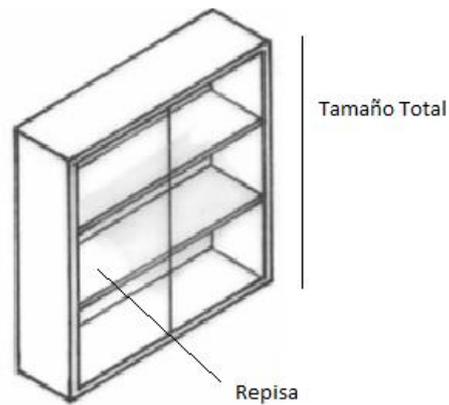


Figura 38 Ejemplo de una Repisa

Fuente: Norma NTE INEN 1642

2.6.9.4. Normativa dimensional

El tamaño final de un estante es el resultado de la suma de las repisas que conforman el mueble, pero este a su vez según la normativa, no debe superar el tamaño de un ser humano promedio que es de 1750 mm como se puede apreciar en la figura 39.

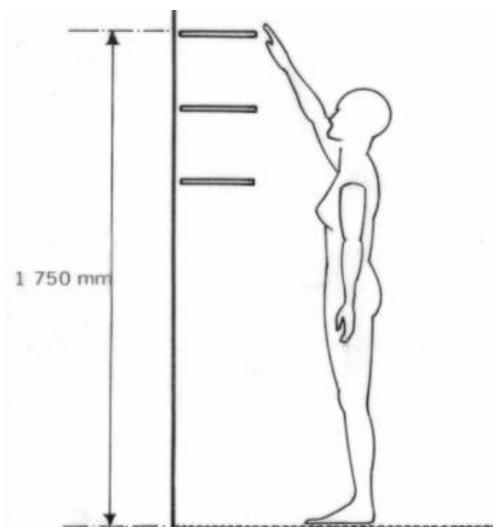


Figura 39 Altura máxima de un estante

Fuente: Norma NTE INEN 1642

Las repisas deberán basar su dimensionamiento en los valores que se indican en la tabla 7.

Tabla 7

Medidas para el dimensionamiento de repisas

| Dimensión | Rango mm |
|--|---------------|
| Profundidad útil | 290 mm mínimo |
| Altura útil de repisa a repisa (fijas) | 330 mínimo |

Fuente: Norma NTE INEN 1642

CAPÍTULO III

ENSAYOS MECÁNICOS AL CARTÓN CORRUGADO

3.1. Introducción

En el presente capítulo se llevará a cabo el proceso de experimentación necesario para encontrar las diferentes características de resistencia mecánica en diferentes tipos de cartón corrugado con el propósito de comprender, de una mejor manera, cuál es su comportamiento ante diferentes esfuerzos y condiciones para, posteriormente, realizar cálculos predictivos que sean usados como una guía en el proceso del diseño de módulos. El cartón corrugado escogido para realizar estos ensayos fue el que se comercializa por la Cartonera Pichincha.

Cabe señalar que todos los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente, la cual ha sido especificada en cada estudio experimental, además las probetas no tuvieron acondicionamiento previo. El análisis experimental de tracción, aplastamiento plano y compresión de borde fueron hechos en los laboratorios del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) mientras que los ensayos de flexión fueron realizados en las instalaciones del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Es de vital importancia tener un conocimiento experimental para realizar un diseño modular ya que con ello se logra conocer la manera en que el material reacciona ante cargas de flexión, aplastamiento plano, compresión de borde, tracción y obtener una comprensión intuitiva del comportamiento del producto final.

Para el estudio experimental se ha escogido 4 tipos de cartón corrugado, basándonos en las características señaladas por el proveedor (Cartonera Pichincha) y escogiendo los 4 tipos de cartón corrugado que presente las mejores características mecánicas, seleccionando ejemplares por cada tipo de flauta, descartando cartones de tipo A, E, F, debido a que su constitución

es de tipo micro corrugado por lo tanto sus características mecánicas son muy bajas y no aptas para la construcción de sistemas mobiliarios. En la tabla 8 observamos las características de los tipos de cartón escogidos.

Tabla 8

Características De tipos de cartones escogidos (proveedor)

| Tipo de cartón | Espesor mm | Gramaje gr/m ² | Compresión Borde (Lb/in) | KN/m |
|----------------|------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| BP350 | 6,87 | 350 | 55 | 9,646 |
| C250 | 4,57 | 250 | 53 | 9,295 |
| C200 | 4,25 | 200 | 50 | 8,769 |
| B125 | 2,83 | 125 | 32 | 5,612 |

3.2 Aplastamiento plano

Para el ensayo de aplastamiento plano (descrito en el capítulo 2) el equipo utilizado fue la “Máquina Universal de Ensayos INSTRON 1130” que se puede observar en la figura 40; el estudio experimental se realizó bajo una temperatura de 21° C y a una humedad relativa de 56% teniendo como referencia normativa a NTE INEN-ISO 3035. Es fundamental mencionar que este estudio solo aplica para cartón corrugado de pared simple, es decir, se excluyen los tipos de cartón corrugado de doble o triple pared.



Figura 40 Máquina Universal de Ensayos INSTRON 1130

Las probetas fueron realizadas bajo la norma mencionada, como se las puede observar en las figuras 41, obteniendo un área de aplastamiento equivalente a 6450 mm^2 y un diámetro de 90.6 mm.



Figura 41 Probeta de aplastamiento plano

3.2.1 Equipamiento

- Máquina Universal de Ensayos INSTRON 1130 (Figura 40)
- Probeta de cartón corrugado tipo C200, C250, B125 (Figura 41)
- Pie de Rey

3.2.2 Procedimiento

- Se calibra la máquina a un rango de carga entre 100 y 200 kg mediante el acople de engranes.
- Se adaptan mordazas circulares a la máquina
- Se calibra la velocidad de avance a 12.5 mm/min
- Se coloca la probeta en forma horizontal de tal forma que la carga sea uniforme en toda su superficie, como se muestra en la figura 42.



Figura 42 Probeta de aplastamiento ensayándose

3.2.3 Toma de datos

A continuación, en la tabla 9, se muestran los resultados experimentales correspondientes al comportamiento observado en el cartón corrugado C250, C200 y B125.

Tabla 9**Valores obtenidos en los ensayos de aplastamiento plano**

| Número de Probeta | Fuerza de Falla (kgf) | | |
|-------------------|-----------------------|------|------|
| | C250 | C200 | B125 |
| 1 | 146 | 128 | 112 |
| 2 | 148 | 154 | 115 |
| 3 | 140 | 148 | 132 |
| 4 | 139 | 142 | 118 |
| 5 | 144 | 130 | 118 |
| 6 | 144 | 146 | 118 |
| 7 | 146 | 130 | 111 |
| 8 | 132 | 136 | 106 |
| 9 | 148 | 130 | 140 |
| 10 | 148 | 124 | 116 |

Con estos datos se proceden a realizar los cálculos pertinentes para evaluar la resistencia al aplastamiento plano de los diferentes tipos de cartón analizados, para lo cual, la tabla 10 muestra los resultados obtenidos.

Ejemplo de cálculo:

La ecuación utilizada para obtener la resistencia al aplastamiento plano es:

$$X = \frac{F}{A} \times 10^6$$

En donde:

X es la resistencia al aplastamiento plano (kPa)

F es la fuerza máxima de aplastamiento (kN)

A es el área de la probeta (mm²)

$$x = \frac{1,341}{6450} \times 10^6$$

$$X = 207,906 \text{ kPa}$$

Tabla 10**Resultados de las pruebas de aplastamiento plano**

| Parámetro/Tipo de Cartón | C250 | C200 | B125 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Fuerza Media (kN) | 1,4072 | 1,341 | 1,1630 |
| Desviación Estándar de la fuerza última (kN) | 0,0504 | 0,098 | 0,0990 |
| Área (mm ²) | 6450 | 6450 | 6450 |
| Coefficiente de variación (%) | 3,587 | 7,364 | 8,517 |
| Resistencia al aplastamiento plano (kPa) | 218,217 | 207,906 | 180,310 |
| Desviación estándar de la resistencia al aplastamiento plano (kPa) | 8,20 | 15,20 | 15,36 |

3.3 Ensayo de compresión de borde

Para la realización del ensayo de borde (descrito en el capítulo 2) se hizo referencia a la normativa vigente en nuestro país NTE INEN-ISO 3037, cumpliendo el procedimiento, dimensiones de probeta y realizando una memoria de cálculo como lo describe la misma.

3.3.1 Equipamiento

- Máquina Universal de Ensayos INSTRON 1130 con mordazas adecuadas para este ensayo.
- Probetas de cartón corrugado tipo C250 y DP350 con dimensiones iguales a las observadas en las figuras 43.
- Pie de rey

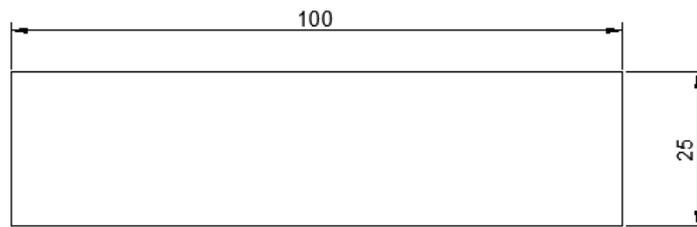


Figura 43 Diagrama de probeta de compresión de borde

3.3.2 Procedimiento

Se calibra la máquina en un rango de 0 a 100 kg para posteriormente adaptar las mordazas. Se coloca la muestra de manera que la longitud de 100 mm haga contacto con la mordaza inferior y que la longitud de 25 mm se encuentre perpendicular a la mordaza como se muestra en la figura 44, Se baja la mordaza superior sosteniendo la con una guía hasta que esta obtenga contacto entre la mordaza superior y la probeta (50 N de carga), repitiendo el proceso para cada probeta



Figura 44 Probeta C250 en ensayo de compresión de borde

3.3.3 Toma de Datos

Tomando en cuenta el proceso descrito, se llevó a cabo la toma de datos para el cartón C250 y para el DP350 obteniendo los valores de la tabla 11.

Tabla 11

Datos obtenidos en la prueba de compresión de borde

| Número de Probeta | Fuerza de falla (kgf) | |
|-------------------|-----------------------|------|
| | DP350 | C250 |
| 1 | 94 | 65 |
| 2 | 80 | 66,5 |
| 3 | 92 | 61 |
| 4 | 91 | 65 |
| 5 | 90 | 69 |
| 6 | 92 | 64 |
| 7 | 82 | 62 |
| 8 | 76 | 63,5 |
| 9 | 81 | 66 |
| 10 | 90 | 63 |

Una vez efectuada la toma de datos se proceden a realizar los cálculos descritos en la norma, obteniendo los resultados definidos en la tabla 12.

Tabla 12

Resultados obtenidos prueba de compresión de borde

| Parámetro/Tipo de Cartón | DP350 | C250 |
|---|---------|---------|
| Fuerza Media (N) | 851,217 | 632,142 |
| Resistencia a la compresión de borde (kN/m) | 8,512 | 6,321 |
| Desv. estándar fuerza (N) | 62,332 | 22,868 |
| Desviación estándar de la RCB (kN/m) | 0,623 | 0,22 |
| Longitud de la probeta(mm) | 100 | 100 |
| Ancho de la probeta(mm) | 25 | 25 |

Ejemplo de Cálculo:

Inicialmente procedemos a calcular la resistencia a la compresión de borde R:

$$R = \frac{\overline{F_{max}}}{l}$$

En donde:

F_{max} es la fuerza máxima media (N)

L es la longitud de la probeta (mm)

$$R = \frac{632,14}{100}$$

$$R = 6,32 \text{ kN/m}$$

Ahora encontramos la desviación estándar de la resistencia a la compresión:

$$S_R = \frac{S_{Fmax}}{l}$$

En donde:

S_{Fmax} es la desviación estándar de la fuerza máxima (N)

$$S_R = \frac{22,868}{100}$$

$$S_R = 0,228 \text{ kN/m}$$

En las figuras 45 y 46 podemos apreciar probetas ya ensayadas en las que se dio el fallo por compresión de borde.



Figura 45 Probeta DP350 ensayada vista frontal



Figura 46 Probeta C250 y DP350 ensayada vista superior

3.4 Ensayo de tracción

En este análisis experimental se conocerán parámetros como la absorción de energía, alargamiento, rigidez a la tracción y módulo de elasticidad. Dicho ensayo se lo lleva a cabo bajo normativa Ecuatoriana NTE INEN-ISO 1924 de la cual obtendremos una guía de cálculo, procedimiento y dimensionamiento de las probetas.

El ensayo se realizó a 10 probetas, tanto en dirección de la máquina como en dirección transversal.

3.4.1 Equipamiento

- Máquina Universal de Ensayos INSTRON 1130 (mordazas de tracción)
- Probetas de cartón corrugado B125 con dimensionamiento 200 x 50 mm como se muestra en las figuras 47
- Pie de rey

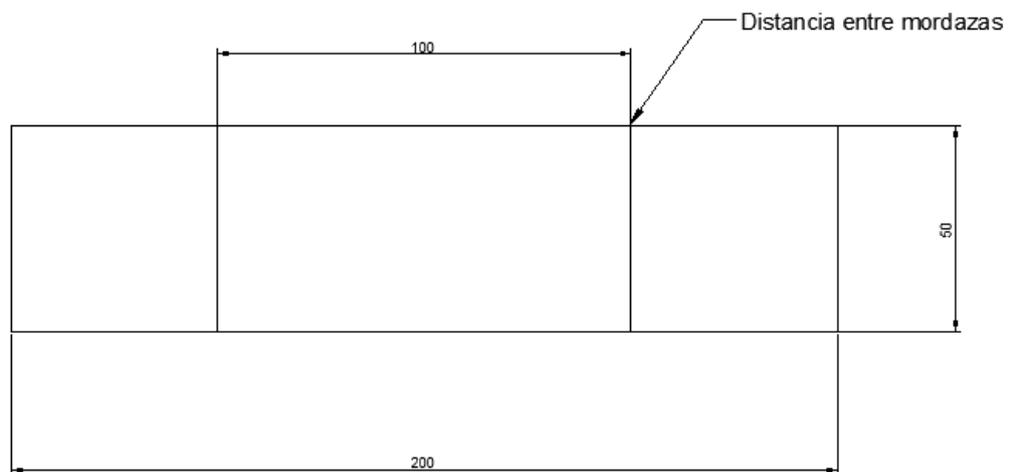


Figura 47 Diagrama probeta de tracción

Procedimiento

Se calibra la máquina en el rango de 0 a 100 kg para posteriormente adaptar las respectivas mordazas correspondientes a tracción, se calibra la velocidad a 10 mm/min. Se coloca la muestra ajustando las mordazas de tal manera que exista una longitud de 100 mm entre las mismas, como se observa en la figura 48, cuando las probetas se rompan a 2 mm de las mordazas contarán como ensayos no válidos, finalmente se repite el proceso 10 veces en cada dirección del material

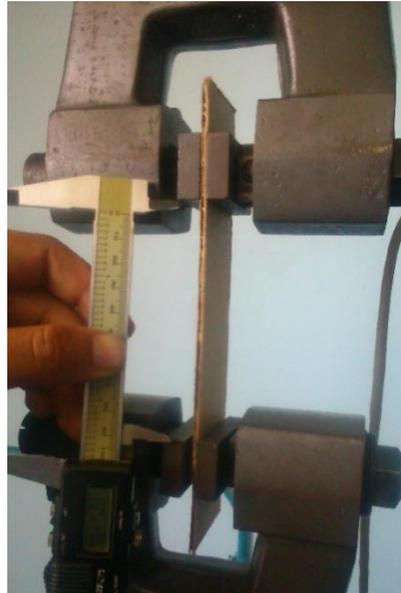


Figura 48 Distancia entre mordazas de tracción (100 mm)

3.4.2 Toma de Datos

3.4.2.1. En el sentido transversal del cartón corrugado

Realizaremos el ensayo de tracción cuando la probeta se dispone de manera transversal, es decir, la dirección de la fuerza de tracción está en el sentido de la flauta. En la tabla 13 se observan las características de la probeta a ensayarse.

Tabla 13

Características de la probeta de tracción

| | | |
|-----------------|-----|------------------|
| Ancho | 50 | mm |
| Gramaje | 125 | g/m ² |
| Longitud | 100 | mm |

Una vez verificado el proceso de acuerdo a lo descrito en el literal 3.4.2 se lleva a cabo la experimentación, obteniendo los valores que se aprecian en la tabla 14.

Tabla 14

Ensayo de tracción del material B125 en el sentido transversal

| Nº probeta | Fuerza de falla (kgf) | Fuerza de falla (N) | Resistencia (N/mm) | Deformación (mm) |
|------------|-----------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| 1 | 54 | 529,56 | 10,59 | 9,6 |
| 2 | 54 | 529,55 | 10,59 | 7,4 |
| 3 | 61 | 598,20 | 11,96 | 9 |
| 4 | 59 | 578,58 | 11,57 | 8,8 |
| 5 | 56 | 549,16 | 10,98 | 6,4 |
| 6 | 64 | 627,62 | 12,55 | 9 |
| 7 | 61 | 598,20 | 11,96 | 7,4 |
| 8 | 58 | 568,78 | 11,38 | 8,2 |
| 9 | 64 | 627,62 | 12,55 | 7,8 |
| 10 | 60 | 588,39 | 11,77 | 9 |
| 11 | 60 | 588,39 | 11,77 | 8 |

Con los valores ubicados en la tabla 14 procedemos a realizar los cálculos, detallados en la norma, en aras de cuantificar los parámetros de comportamiento del material; estos resultados se han tabulado en la tabla 15.

Tabla 15

Resultados ensayo de tracción del material B215 en el sentido transversal

| | | |
|---|---------|----------------------|
| Carga de Rotura (σ_T^b) | 11,607 | kN/m |
| Índice de Carga de Rotura (σ_T^w) | 92,858 | kN-m/kg |
| Alargamiento hasta rotura (ε_T) | 8,236 | % de la long inicial |
| Energía Absorbida durante la tracción (W_T^b) | 726,34 | J/m ² |
| Índice de energía absorbida durante la tracción (W_T^w) | 3883,07 | J/m ² |
| Rigidez a la tracción (E^b) | 607.6 | KN/m |
| Índice de rigidez a la tracción | 4,86 | MN-m/kg |
| Módulo de elasticidad (E) | 214,69 | MPa |

Ejemplo de cálculo:

Procedemos a calcular la carga a la rotura:

$$\sigma_T^b = \frac{\overline{F_T}}{b}$$

En donde:

σ_T^b es la carga a la rotura (kN/m)

F_T es la media de la fuerza de tracción máxima (N)

b es el ancho de la probeta (mm)

$$\sigma_T^b = \frac{580,37}{50} = 11.607 \text{ KN/m}$$

Seguidamente se calcula el índice de carga a la rotura:

$$\sigma_T^w = \frac{1000 \sigma_T^b}{w}$$

En donde:

σ_T^w es el índice de carga a la rotura en (kN-m/kg)

σ_T^b es la carga de rotura en (kN/m)

W es el gramaje en (g/m²)

$$\sigma_T^w = \frac{1000 (11,607)}{125}$$

$$\sigma_T^w = 92,85 \text{ KNm/kg}$$

Luego se procede a obtener el alargamiento a la rotura:

$$\varepsilon_T = \frac{100 \overline{\delta}_T}{l}$$

En donde:

ε_T es el alargamiento hasta la rotura (% de la longitud inicial)

$\overline{\delta}_T$ es el alargamiento medio a la rotura (mm)

L es la longitud inicial de la probeta (entre mordazas 100mm)

$$\varepsilon_T = \frac{100 (8,23)}{100} = 8,23\% \text{ de la longitud inicial}$$

Para encontrar la energía absorbida por el material necesitamos realizar un análisis de la curva fuerza vs deformación. En la figura 49 observamos los parámetros que involucra la curva mencionada, teniendo en cuenta que el área bajo la misma cuantifica la energía de absorción del cartón.

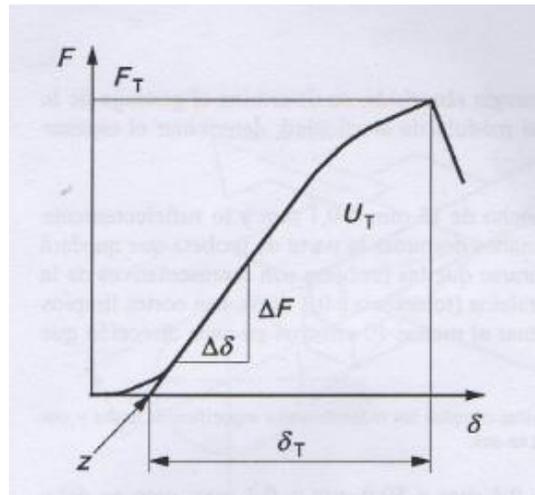


Figura 49 Parámetros de gráfica Fuerza vs Deformación

Fuente: NTE INEN-ISO 1924

Siendo:

F la fuerza de tracción (N)

δ el alargamiento (mm)

Z el punto donde la tangente a la curva, con una pendiente igual a la pendiente máxima, interseca con el eje de alargamiento

F_T la fuerza máxima de tracción en N

δ_T el alargamiento a la rotura

U_T el área bajo la curva fuerza alargamiento en mJ

Una vez concluido el ensayo para las probetas cortadas en el sentido de máquina en el cartón B125, se obtienen 10 gráficas resultantes, una de las cuales (ensayo número 6) podemos apreciar en la figura 50.

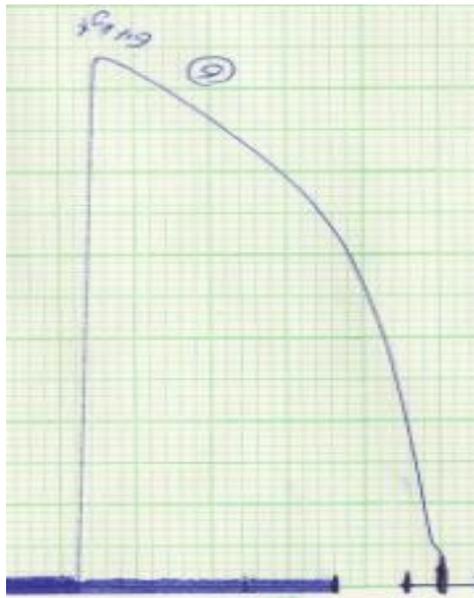


Figura 50 Fuerza vs deformación ensayo tracción 6 (sentido transversal)

- **Análisis de gráfica mediante AutoCAD 2014**

Se procede a escanear la curva más representativa del experimento, escogiendo la del ensayo 6 (figura 50), y, mediante el software de CAD, analizamos la imagen para luego continuar con la definición de parámetros como el área bajo la curva, la fuerza última que soportó el material, puntos de comportamiento, pendiente y deformación máxima.

En la figura 51, en donde se reproduce la curva mencionada, se observa que el material cede a una fuerza de 627,2 N con una deformación máxima de 9 mm. El comportamiento de la probeta de cartón corrugado tiene una tendencia lineal hasta llegar a 352 N que una vez superada muestra una curva, es decir, en su etapa inicial (lineal) soporta el 60% de la carga total con una deformación equivalente al 20% de la total, hasta un punto donde esta tendencia cambia y la carga produce una deformación equivalente al 80% de la deformación total.

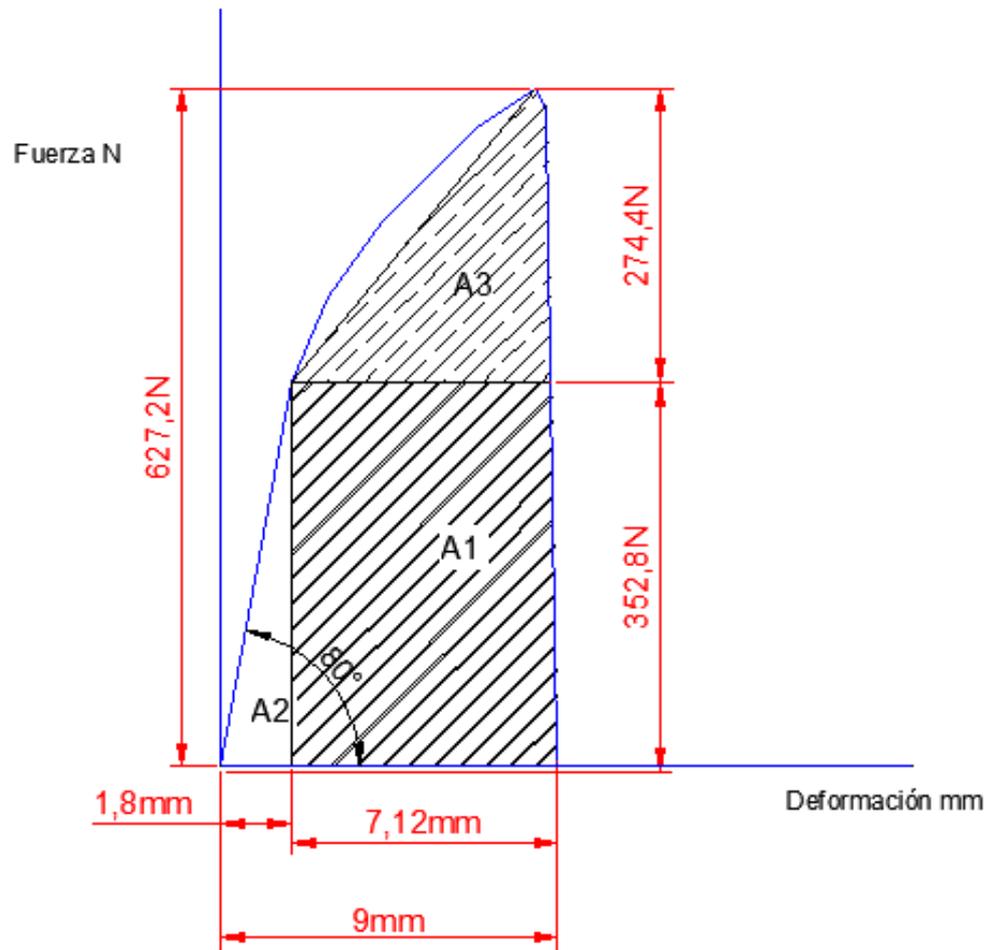


Figura 51 Análisis de la curva AutoCAD

Procedemos a encontrar la energía de absorción, para lo cual, es necesario cuantificar el área bajo la curva, por lo tanto es ventajoso utilizar una suma de áreas.

$$U_T = A1 + A2 + A3$$

$$U_T = 2511,936 + 317,52 + 802,424 = 3631,87 \text{ mJ}$$

Procedemos a calcular la energía absorbida

$$W_T^b = \frac{1000 \overline{U_T}}{bl}$$

Donde:

U_T es el área bajo la curva fuerza vs alargamiento (mJ)

W_T^b es la energía absorbida durante la tracción (J/m²)

B es el ancho de la probeta (50 mm)

L es la longitud de probeta (100 mm)

$$W_T^b = \frac{1000 (3631,87)}{50(100)} = 726,34 \text{ J/m}^2$$

Posteriormente calculamos el índice de energía absorbida:

$$W_T^w = \frac{1000 \overline{W_T^b}}{w}$$

Donde:

W_T^w es el índice de energía absorbida (J/m²)

W es el gramaje (g/m²)

$$W_T^w = \frac{1000 (726,34)}{125} = 5810,72 \text{ J/m}^2$$

Cabe mencionar que un parámetro importante, para obtener el módulo de elasticidad, es la rigidez a la tracción.

$$\delta_{max} = \left(\frac{\Delta F}{\Delta \delta} \right)_{max}$$

En donde:

δ_{max} es la pendiente curva fuerza vs deformación (N/mm)

ΔF es el incremento en fuerza (N)

$\Delta \delta$ es el incremento del alargamiento (mm)

En la tabla 16 observamos la fuerza que soporta el material por cada 0,2 mm de deformación utilizando el gráfico insertado en CAD; calculamos la pendiente que existe entre cada punto debido a que la pendiente máxima es un parámetro de cálculo necesario para encontrar la rigidez a la tracción.

Tabla 16

Fuerza vs deformación con un incremento de 0,2 mm del material B125 en el sentido transversal

| Ord | Deformación (mm) | Fuerza (kg) | Fuerza (N) | Pendiente |
|-----|------------------|-------------|------------|-----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 269,5 |
| 2 | 0,2 | 5,5 | 53,9 | 196 |
| 3 | 0,4 | 9,5 | 93,1 | 220,5 |
| 4 | 0,6 | 14 | 137,2 | 98 |
| 5 | 0,8 | 16 | 156,8 | 303,8 |
| 6 | 1 | 22,2 | 217,56 | 137,2 |
| 7 | 1,2 | 25 | 245 | 196 |
| 8 | 1,4 | 29 | 284,2 | 147 |
| 9 | 1,6 | 32 | 313,6 | 147 |
| 10 | 1,8 | 35 | 343 | 171,5 |
| 11 | 2 | 38,5 | 377,3 | 188,65 |

En la figura 52 se aprecia la gráfica fuerza vs deformación con un incremento de 0,2 mm en la abscisa.

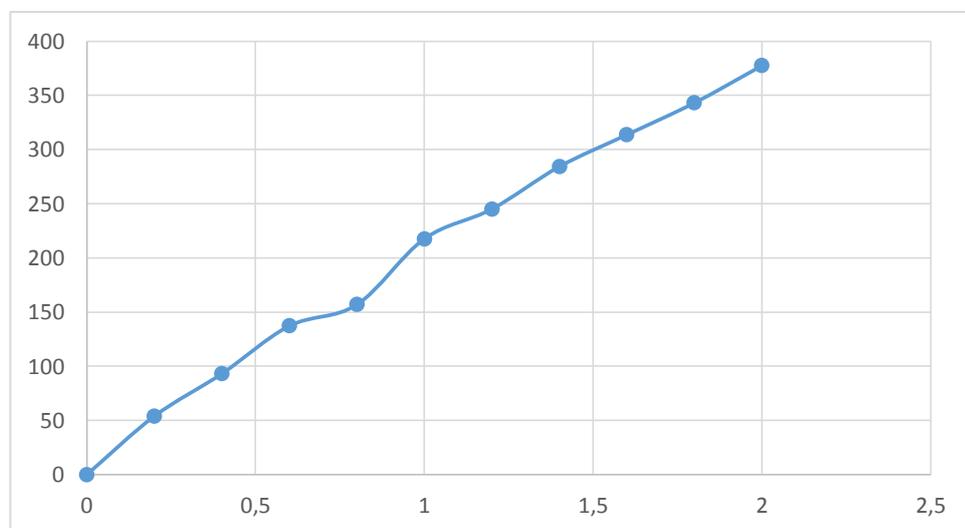


Figura 52 Fuerza vs deformación con un incremento de 0,2 mm del material B125 en el sentido transversal

Se obtiene la pendiente máxima:

$$\delta_{max} = \left(\frac{217,56 - 156,8}{0,2} \right)$$

$$\delta_{max} = 303,8 \text{ N/mm}$$

Con lo cual procedemos a calcular la rigidez a la tracción:

$$E^b = \frac{\delta_{max} l}{b}$$

En donde:

E^b es la rigidez a la tracción (KN/m)

Entonces:

$$E^b = \frac{303,8(100)}{50} = 607,6 \text{ KN/m}$$

Y por últimos encontramos el módulo de elasticidad:

$$E = \frac{E^b}{t}$$

En donde:

E es el módulo de elasticidad (MPa)

t es el espesor (mm)

$$E = \frac{607,6}{2,83} = 214,69 \text{ MPa}$$

3.4.2.2. En el sentido de la máquina en el cartón corrugado.

En este caso la dirección de la fuerza de tracción será aplicada de forma perpendicular al sentido de las flautas.

Toma de Datos

Terminada la revisión del procedimiento especificado anteriormente en el literal 3.4.2, procedemos a obtener los valores del comportamiento del cartón B125 en sentido de máquina ante cargas de tracción, valores que se publican en la tabla 17 a continuación mostrada:

Tabla 17

Valores obtenidos ensayo de tracción - sentido de maquina B125

| Nº probeta | Fuerza de falla (kgf) | Fuerza de falla (N) | Resistencia (N/mm) | Deformación (mm) |
|------------|-----------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| 1 | 66 | 647,239 | 12,945 | 3 |
| 2 | 77 | 755,112 | 15,102 | 2,8 |
| 3 | 97 | 951,245 | 19,025 | 2,1 |
| 4 | 79 | 774,725 | 15,495 | 3 |
| 5 | 100 | 980,665 | 19,613 | No aplica |
| 6 | 74 | 725,692 | 14,514 | 2 |
| 7 | 78 | 764,919 | 15,298 | 2,2 |
| 8 | 95 | 931,632 | 18,633 | 2,8 |
| 9 | 87 | 853,179 | 17,064 | 2 |
| 10 | 73 | 715,885 | 14,318 | 3 |
| 11 | 90 | 882,599 | 17,652 | 3 |

Nota: el ensayo número 5 no es tomado en cuenta debido a que la probeta se resbaló de las mordazas e incluso se rompió a menos de 2 mm de distancia de una de ellas.

Con los valores ubicados en la tabla 17 se proceden a realizar los cálculos necesarios para cuantificar los parámetros de comportamiento del material; estos resultados se han tabulado en la tabla 18 que se presenta a continuación.

Tabla 18

Resultados ensayo de tracción- sentido de máquina B125

| | | |
|---|---------|--------------------------|
| Carga de Rotura (σ_T^b) | 16,333 | kN/m |
| Índice de Carga de Rotura (σ_T^w) | 130,660 | kN-m/kg |
| Alargamiento hasta rotura (ε_T) | 3,160 | % de la long. inicial |
| Energía Absorbida durante la tracción (W_T^b) | 255,78 | J/m ² |
| Índice de energía absorbida durante la tracción (W_T^w) | 2046,24 | J/m ² |
| Rigidez a la tracción (E^b) | 1176 | N/mm |
| Índice de rigidez a la tracción | 9,48 | MN-m/kg |
| Módulo de elasticidad (E) | 415,54 | MPa |

- **Gráficas obtenidas**

Una vez realizados los ensayos, obtenemos 10 gráficas que son el resultado del estudio experimental y en ellas se muestra la manera en que el material se deforma ante el aumento de la fuerza. Estas gráficas presentan dos picos, una de ellas evidentemente más elevada en comparación a la otra, lo cual se debe a que el material llega a un punto donde se fractura su primer liner pero el segundo de ellos aún no presenta falla alguna. Nunca la primera resistencia será menor a la segunda, por lo tanto, el estudio de los parámetros se analizará cuando el primer liner ceda. En la figura 53 podemos observar una probeta que presenta este tipo de fallo.

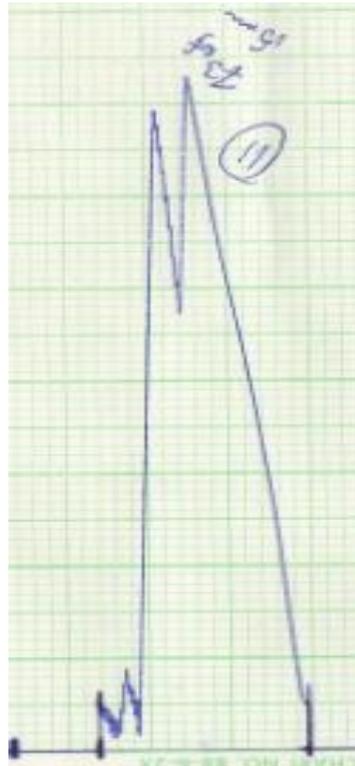


Figura 53 Fuerza vs deformación tracción sentido de máquina B215

- **Análisis de gráfica**

Para el análisis del gráfico se utilizó nuevamente el software CAD con el fin de poder distinguir más a detalle los puntos de comportamiento del material disminuyendo, de esta manera, la propensión a errores por percepción.

Se observa uno de los ensayos con el cual se procede a realizar el análisis. En la figura 54 podemos apreciar que la probeta de cartón corrugado B125 falla a 852 N con una deformación máxima de 3 mm y es notable que la gráfica en su mayoría tiende a ser lineal. En esta disposición del cartón (sentido de máquina) podemos notar claramente la diferencia existente en su resistencia con respecto a la encontrada en las probetas cortadas en la disposición transversal, pues, en términos generales, se puede decir que la primera (sentido de máquina) soporta más carga y acarrea menor deformación que la segunda en mención (sentido transversal).

Este análisis es necesario para proseguir con el ejemplo de cálculo ya que necesitamos cuantificar el área bajo la curva fuerza vs deformación.

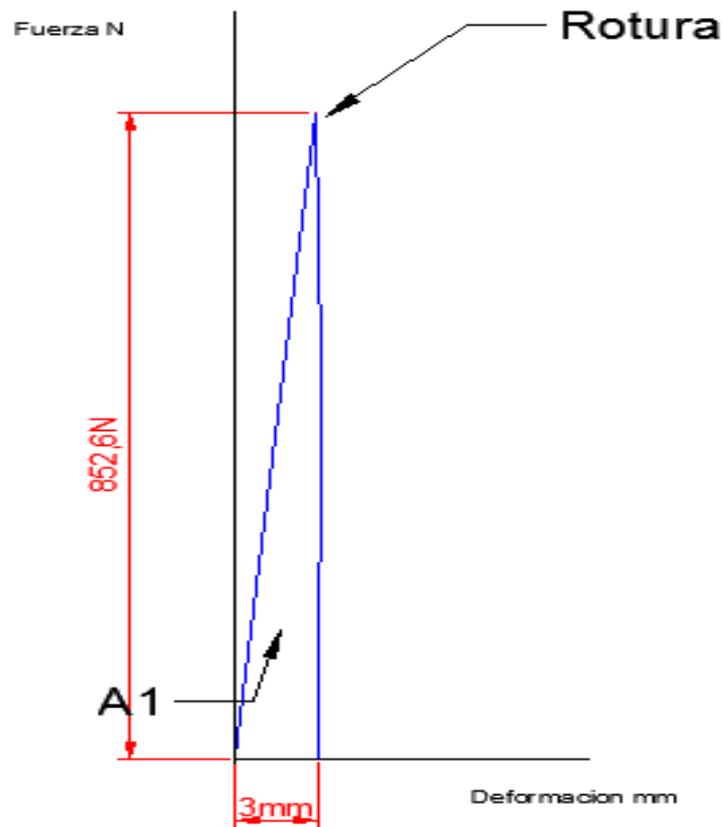


Figura 54 Análisis Fuerza vs deformación (sentido de máquina)

Para el análisis de la rigidez a la tracción necesitamos encontrar la pendiente máxima que existe en la curva fuerza vs deformación con un incremento de 0,2 mm en la deformación como se muestra en la tabla 19 cuya gráfica se encuentra en la figura 55.

Tabla 19 Variación de fuerza de tracción con un incremento de 0,2 mm – sentido de máquina B125

| # | Deformación (mm) | Fuerza (Kg) | Fuerza (N) | Pendiente |
|----|------------------|-------------|------------|-----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 318,5 |
| 2 | 0,2 | 6,5 | 63,7 | 416,5 |
| 3 | 0,4 | 15 | 147 | 588 |
| 4 | 0,6 | 27 | 264,6 | 343 |
| 5 | 0,8 | 34 | 333,2 | 490 |
| 6 | 1 | 44 | 431,2 | 392 |
| 7 | 1,2 | 52 | 509,6 | 490 |
| 8 | 1,4 | 62 | 607,6 | 392 |
| 9 | 1,6 | 70 | 686 | 441 |
| 10 | 1,8 | 79 | 774,2 | 392 |
| 11 | 2 | 87 | 852,6 | 426,3 |

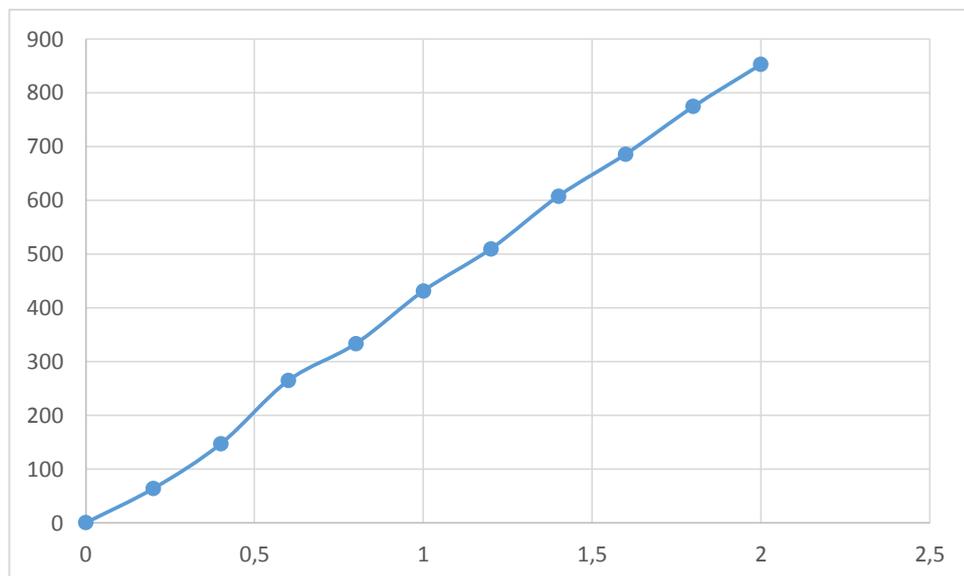


Figura 55 Variación de fuerza de tracción con un incremento de 0,2 mm – sentido de máquina B125

Calculamos la pendiente máxima y la rigidez a la tracción

$$\delta_{max} = \left(\frac{264,4 - 147}{0,2} \right)$$

$$\delta_{max} = 588N/mm$$

$$E^b = \frac{\delta_{max} l}{b}$$

$$E^b = \frac{588(100)}{50} = 1176 KN/m$$

Continuamos con el cálculo del índice a la rigidez:

$$E^w = \frac{E^b}{W}$$

$$E^w = \frac{1176}{125} = 9,408 MN - m/kg$$

Así, obtenemos el valor del módulo de elasticidad:

$$E = \frac{E^b}{t}$$

$$E = \frac{1176}{2,83} = 415,54 MPa$$



Figura 56 Falla por tracción (sentido de máquina)

3.5 Ensayos de Flexión

3.5.1 Introducción

Finalmente realizamos ensayos de flexión para obtener una respuesta acerca de la rigidez a la flexión que proporciona el cartón corrugado, lo cual, se usará posteriormente en ciertos cálculos; para esto es inevitable diseñar una pieza adaptable a la máquina universal de ensayos que sea capaz de aplicar una fuerza distribuida en dos puntos de la probeta en forma uniforme, por esta razón se inicia este estudio con el diseño de la mismo.

Se realizaron 2 tipos de ensayos, uno con un aplicador de fuerza en dos puntos de la muestra y el otro con un aplicador de fuerza en un solo punto como se indica en las figuras 57 hasta la 60, con el fin de cumplir con la norma ASTM C393.



Figura 57 Ensayo de flexión con una carga central y puntual

**Fuente: ASTM-C93-Standard Test for Flexural Properties of Sandwich
Constructions**

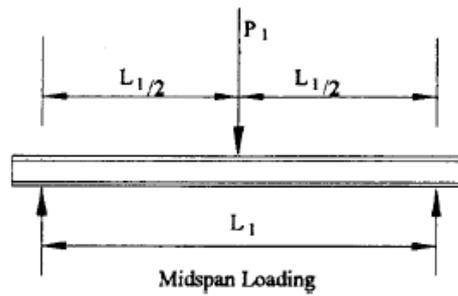


Figura 58 Diagrama de ensayo con carga puntual en el centro

Fuente: ASTM-C93-Standard Test for Flexural Properties of Sandwich Constructions



Figura 59 Ensayo de flexión con 2 cargas uniformes

Fuente: ASTM-C93-Standard Test for Flexural Properties of Sandwich Constructions

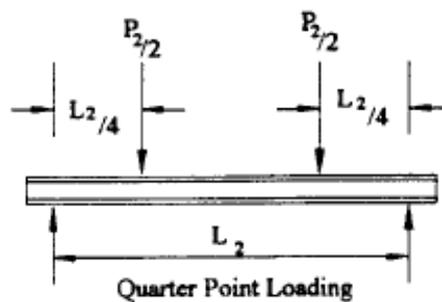


Figura 60 Diagrama de ensayo de flexión con 2 cargas uniformes

Fuente: ASTM-C93-Standard Test for Flexural Properties of Sandwich Constructions

3.5.2 Diseño del aplicador de fuerza

Es necesario el diseño de una pieza que sea capaz de aplicar una fuerza como lo indica la figura 60 y adaptarla a la máquina de ensayos universal MTS TK/T5002 del laboratorio de Mecánica de Materiales ubicada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, y de esta manera dar cumplimiento con la norma (ASTM C393 - Standard Test for Flexural Properties of Sandwich Contructions) con el objetivo primordial de encontrar la rigidez a la flexión y entender el comportamiento del cartón corrugado ante cargas externas que generen este comportamiento en el material.

Tenemos conocimiento, gracias a dicha norma, que la distancia entre los puntos de aplicación de fuerza debe estar a un cuarto de la longitud del borde de la probeta (figura 60). Tomando en base el punto 5 de la norma ASTM C393, se ha decidido utilizar las siguientes dimensiones para las probetas como se ve en la figura 61.

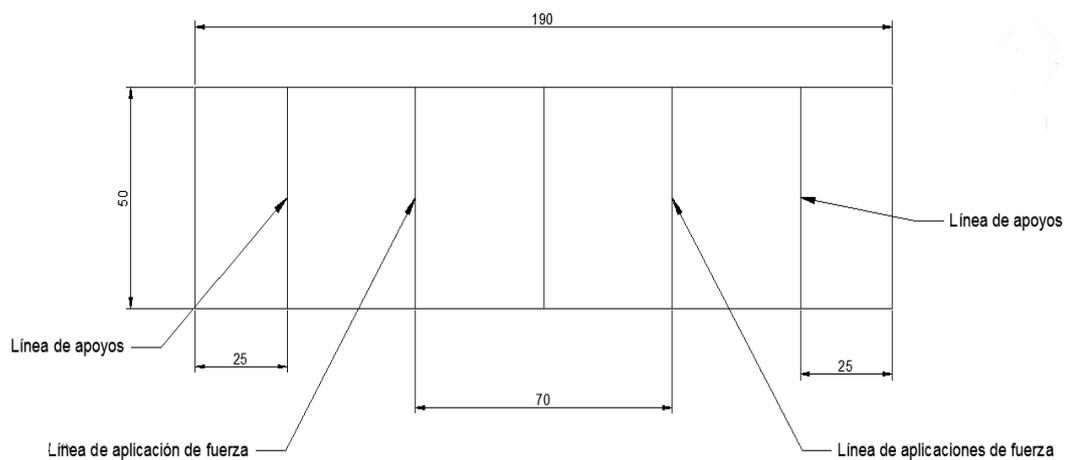


Figura 61 Diagrama de probeta de flexión

Utilizando un diámetro de 40 mm para los rodillos aplicadores de fuerza obtenemos una pieza como se indica en las figuras 62 hasta la 64

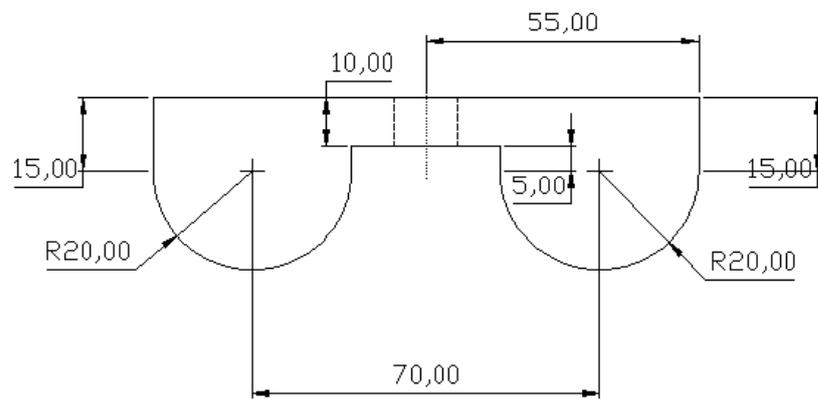


Figura 62 Diagrama de pieza aplicador de fuerza simultánea Vista Frontal

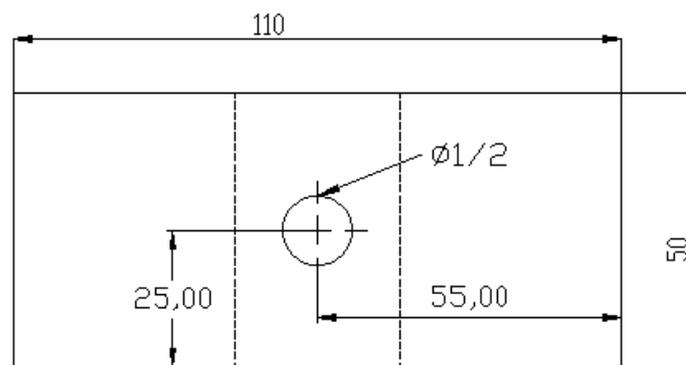
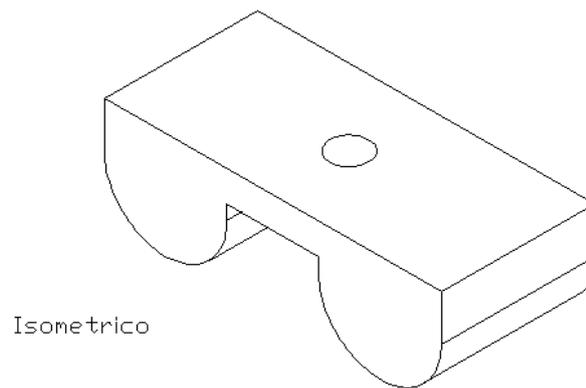


Figura 63 Diagrama de pieza aplicador de fuerza simultánea Vista superior



Vista Isométrico

Figura 64 Diagrama de pieza aplicador de fuerza simultánea Vista Isométrico

Una vez diseñada la pieza es de vital importancia hacer un análisis de deformación de la misma a causa de su peso, ya que es necesario que la fuerza se aplique de manera uniforme y al mismo tiempo en los dos puntos de la probeta, caso contrario tendremos valores erróneos y el ensayo no podrá ser válido. La pieza será de acero A36 y fabricada bajo un sistema de fresado CNC.

Al adaptar la pieza a la máquina por su agujero central, ésta presenta puntos críticos de deformación, los cuales estarán en sus extremos como se observa en las figuras 65 y 66.

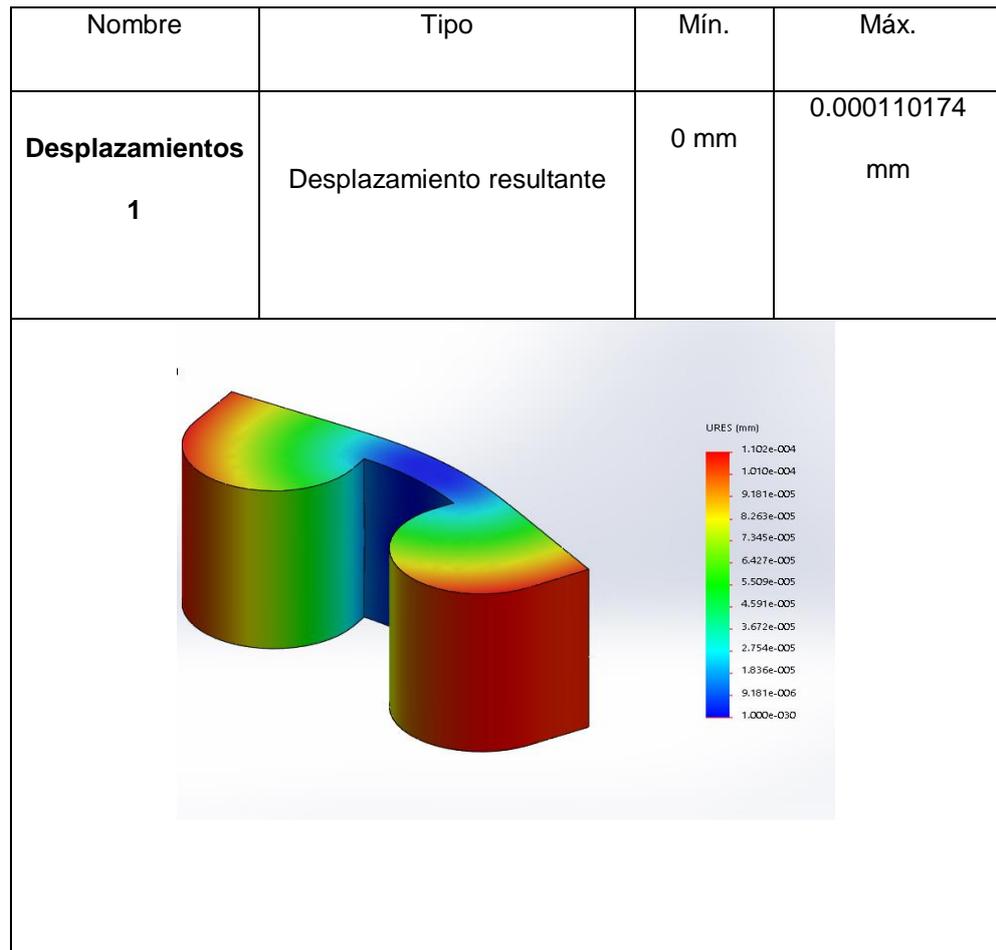


Figura 65 Análisis de desplazamiento resultante con SolidWorks del aplicador de fuerza de 2 puntos

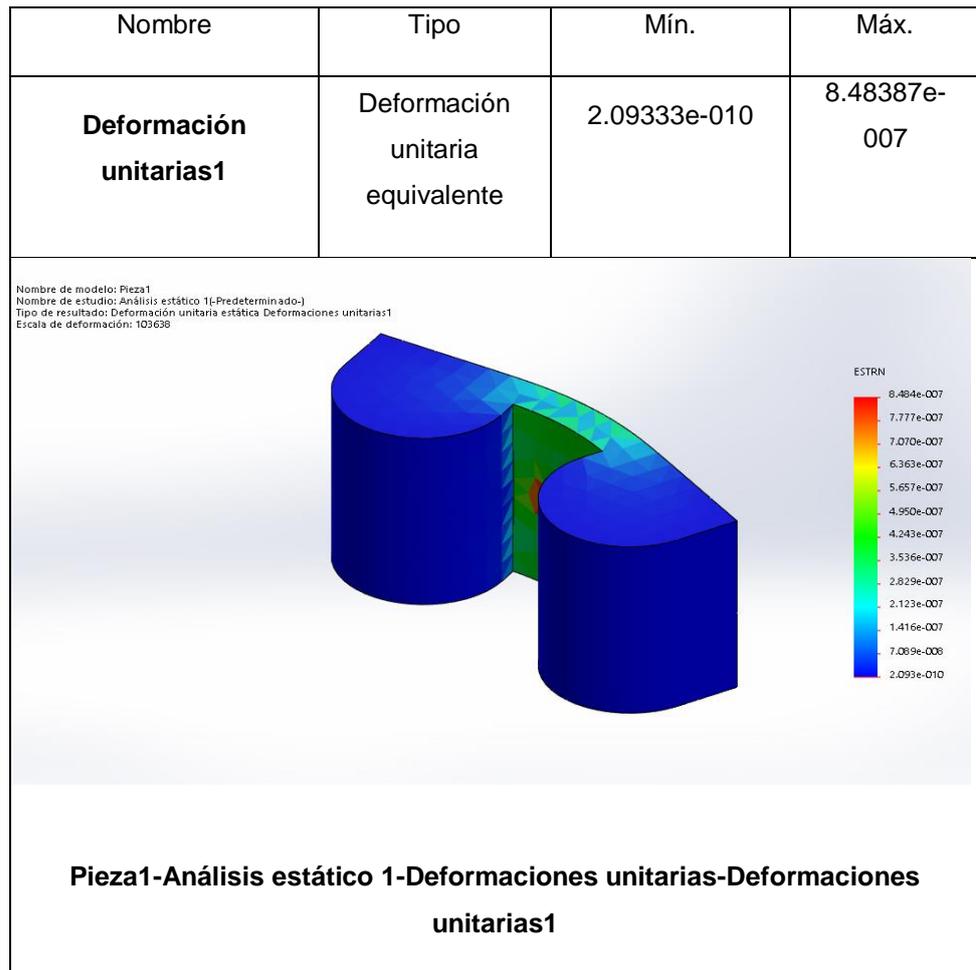


Figura 66 Figura 66: Análisis de deformación unitaria con SolidWorks del aplicador de fuerza de 2 puntos

3.5.3. Realización de ensayos

Al llevar a cabo los ensayos existen parámetros bajo los cuales fue realizado el estudio experimental y se los detalla a continuación:

- Material: Cartón Corrugado
- Tipo: Doble pared DP 350, Simple Pared C250, C200, B125
- Maquina: Máquina de Ensayos Universal MTS TK/T5002 (ver figura 67)

- Norma: ASTM-C93-Standard Test for Flexural Properties of Sandwich Contructions
- Fecha: Viernes, 29 de Abril del 2016
- Lugar: ESPE- Sangolquí- Lab. Mecánica de Materiales
- Ambiente: 53% de humedad – 20.8 ° C - 10:06 min (Figura 68)
- Velocidad de avance : 2 mm/min
- No aplica acondicionamiento de muestra



Figura 67 Máquina de ensayos Universal MTS TK/T5002



Figura 68 Hora – temperatura - humedad relativa del ambiente en ensayos de flexión

3.5.4. Equipamiento

- Máquina de Ensayos Universal MTS TK/T5002 (celda tipo S)
- Comparador de reloj:
 - ✓ 10 mm de alcance
 - ✓ Apreciación de 0,01 mm
 - ✓ 1 mm por vuelta
- Sujetador universal
- Cronómetro
- Pie de rey
- Pieza aplicadora de fuerza
- Medidor de fuerza digital (ver figura 69)



Figura 69 Medidor de fuerza digital

3.5.5 Procedimiento.

- Ubicamos la pieza aplicadora de fuerza en la máquina de ensayos (ensayo 2 puntos) mediante un perno de $\frac{1}{2}$ in.
- Instalamos los apoyos en la máquina universal de ensayos asegurándonos que estén a las medidas necesarias de la probeta como lo dice la norma.
- Por medio de un cronómetro ajustamos la velocidad de avance de la máquina a 2 mm por minuto.
- Calibramos el comprador de reloj al sujetador universal de modo que el palpador del mismo logre medir la deformación en el punto medio de la probeta.
- Enceramos el comparador de reloj cuando el medidor digital de fuerza este en un newton con lo que se afirma que existe contacto entre la probeta y el aplicador de fuerza.
- Procedemos a encerar el medidor de fuerza digital.

- Realizamos la toma de datos para ensayos de dos puntos como se observa en la figura 70.
- Para ensayos de flexión en un punto repetimos los pasos anteriores pero ahora instalamos el aplicador de fuerza con una sola carga puntual en el centro de la probeta, como se observa en la figura 71.



Figura 70 Ensayo de flexión dos puntos uniformes



Figura 71 Ensayo de flexión carga puntual en el centro

3.5.6 Toma de datos

Cumpliendo estrictamente el procedimiento mencionado iniciamos con la toma de datos.

3.5.6.1 Doble pared 350

En la tabla 20 observamos los valores obtenidos para el cartón DP350 en el ensayo con dos cargas simultáneas en sentido transversal.

Tabla 20

Ensayo de flexión DP350 Sentido transversal - 2 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 3 | 0,22 |
| 2 | 6 | 0,4 |
| 3 | 9 | 0,6 |
| 4 | 12 | 0,78 |
| 5 | 15 | 0,95 |
| 6 | 18 | 1,12 |
| 7 | 21 | 1,27 |
| 8 | 24 | 1,45 |
| 9 | 27 | 1,7 |
| 10 | 30 | 1,9 |
| 11 | 33 | 2,08 |
| 12 | 36 | 2,29 |
| 13 | 42 | 2,73 |
| 14 | 45 | 3 |
| 15 | 48 | 3,29 |
| 16 | 51 | 3,4 |
| 17 | 54 | 3,95 |
| 18 | 57 | 4,54 |
| 19 | 60 | 4,81 |
| 20 | 64 | 6,7 |
| 21 | 67 | 6,9 |
| 22 | 68 | 7,5 |

En la figura 72 observamos la gráfica obtenida en base a la tabla 20 con lo que podemos visualizar la tendencia del material en sentido transversal.



Figura 72 Fuerza vs Deformación DP350 sentido transversal - 2 puntos

Continuamos con la toma de datos para el cartón DP350, con el ensayo de dos puntos en sentido de máquina como se ilustra en la tabla 21.

Tabla 21 .

Ensayo de flexión DP350 Sentido de máquina-2 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 4 | 0,18 |
| 2 | 8 | 0,36 |
| 3 | 12 | 0,45 |
| 4 | 16 | 0,75 |
| 5 | 20 | 0,96 |
| 6 | 24 | 1,31 |

En la figura 73 se puede apreciar la tendencia del comportamiento del material en sentido de máquina.

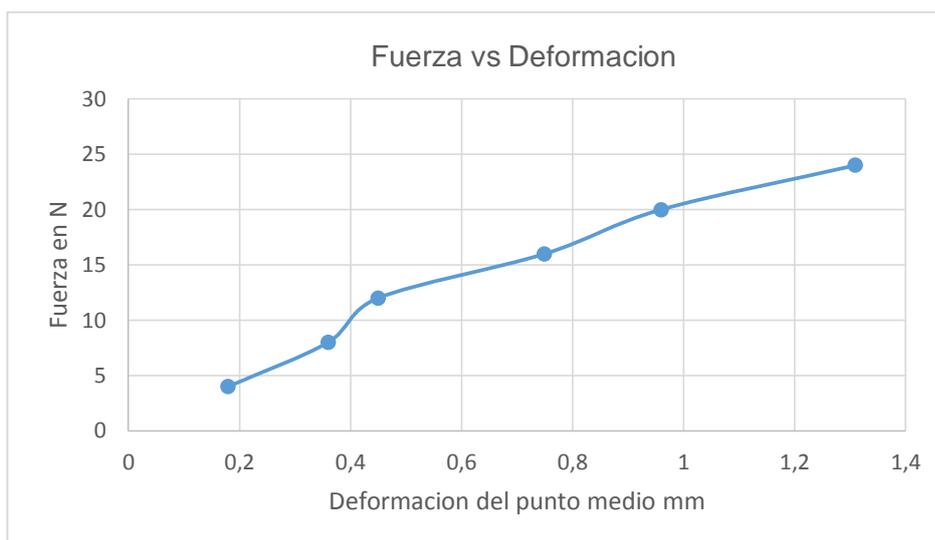


Figura 73 Fuerza vs Deformación DP350 Sentido de máquina - 2 puntos

Ahora realizamos la toma de datos para el mismo tipo de cartón pero con una sola carga puntual, en el centro de la probeta, en el sentido de máquina obteniendo los valores ilustrados en la tabla 22

Tabla 22

Ensayo de flexión DP350 Sentido de máquina-1 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 2 | 0,26 |
| 2 | 4 | 0,36 |
| 3 | 6 | 0,47 |
| 4 | 8 | 0,61 |
| 5 | 10 | 0,75 |
| 6 | 12 | 0,94 |
| 7 | 13 | 1,2 |

En la figura 74 observamos la tendencia del material ante una carga puntual, en el centro de la probeta, en el sentido de máquina.



Figura 74 Fuerza vs Deformación DP350 Sentido de máquina - 1 punto

Finalmente experimentamos con una carga puntual en el centro de la probeta en sentido transversal y adquirimos los siguientes valores detallados en la tabla 23.

Tabla 23 .

Ensayo de flexión DP350 Sentido transversal-1 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 3 | 0,33 |
| 2 | 6 | 0,58 |
| 3 | 9 | 0,83 |
| 4 | 12 | 1,12 |
| 5 | 15 | 1,4 |
| 6 | 18 | 1,79 |
| 7 | 21 | 2,2 |
| 8 | 24 | 2,69 |
| 9 | 27 | 5 |

En la figura 75 observamos que la curva tiene un tendencia lineal hasta un punto donde esto cambia y empieza a deformarse de manera significativa ante cargas relativamente menores.

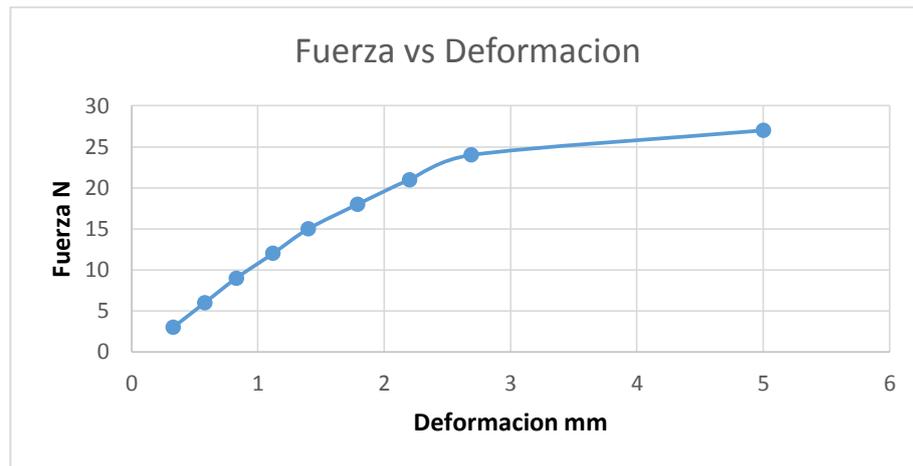


Figura 75 : Fuerza vs Deformación DP350 Sentido transversal - 1 punto

Cálculos:

Procedemos a calcular la rigidez a la flexión con la formula dada en el capítulo 2, tanto para sentido transversal como para sentido de la máquina.

$$D = \frac{P_1 L_1^3 \left[1 - \left(\frac{11 L_2^2}{8 L_1^2} \right) \right]}{48 \Delta_1 \left[1 - \left(\frac{2 P_1 L_1 \Delta_2}{P_2 L_2 \Delta_1} \right) \right]}$$

D es la rigidez a la flexión (N-mm)

L es longitud entre apoyos del ensayo (mm)

Δ es la deflexión medida en la mitad de la distancia entre apoyos (mm)

P es la carga efectuada (N)

En nuestro caso las longitudes entre apoyos serán las mismas tanto para el ensayo de una carga en la mitad como para el ensayo con dos puntos de carga y corresponde a 140 mm

- Rigidez a la flexión en sentido transversal:

$$D_{22} = \frac{27(140)^3 \left[1 - \left(\frac{11(140)^2}{8(140)^2} \right) \right]}{48(5) \left[1 - \left(\frac{2(27)(140)(7,5)}{68(140)(5)} \right) \right]}$$

$$D_{22} = 605526,92 \text{ N} - \text{mm}^2$$

$$D_{22} = 0.6055 \text{ N} - \text{m}^2$$

Al dividirla para el ancho de la probeta obtenemos la rigidez a la flexión lineal

$$D_{22} = 12.11 \text{ N} - \text{m}$$

- Rigidez a la flexión en sentido de la máquina

$$D_{11} = \frac{13(140)^3 \left[1 - \left(\frac{11(140)^2}{8(140)^2} \right) \right]}{48(1,2) \left[1 - \left(\frac{2(13)(140)(1,31)}{24(140)(1,2)} \right) \right]}$$

$$D_{11} = 1271577,94 \text{ N} - \text{mm}^2$$

$$D_{11} = 1,27 \text{ N} - \text{m}^2$$

$$D_{11} = 25,4 \text{ N} - \text{m}$$

3.5.6.2 Pared simple C250

Concluido el cartón DP350 procedemos a la toma de datos del cartón corrugado C250, iniciando con el ensayo de dos puntos en sentido transversal como se muestra en la tabla 24.

Tabla 24

Ensayo de flexión C250 Sentido transversal - 2 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|------------|------------|------------------|
| 1 | 3 | 0,33 |
| 2 | 6 | 0,73 |
| 3 | 9 | 1,01 |
| 4 | 12 | 1,34 |
| 5 | 15 | 1,65 |
| 6 | 18 | 2,01 |
| 7 | 21 | 2,39 |
| 8 | 24 | 2,66 |
| 9 | 27 | 3,3 |
| 10 | 30 | 3,7 |
| 11 | 33 | 3,95 |
| 12 | 36 | 4,33 |
| 13 | 39 | 4,78 |
| 14 | 42 | 5,3 |
| 15 | 45 | 5,82 |
| 16 | 48 | 6,61 |
| 17 | 49 | 7,85 |

Analizamos la gráfica del material C250 ante cargas de dos puntos en sentido transversal que se ilustra en la figura 76.

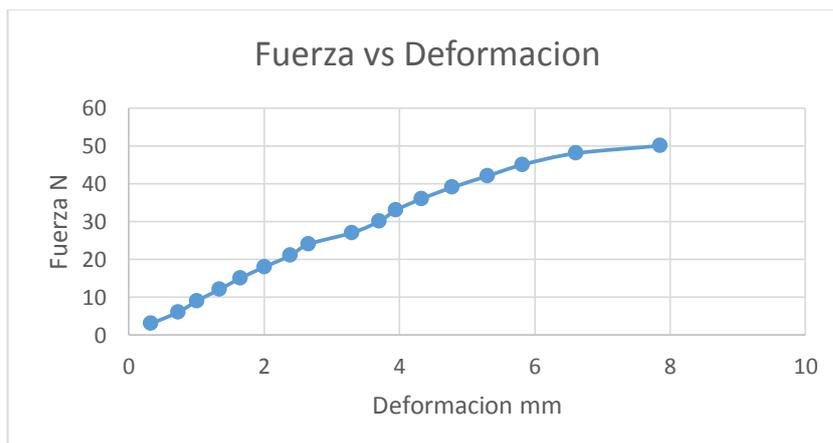


Figura 76 Fuerza vs Deformación en sentido transversal - 2 puntos

Seguidamente experimentamos en dos puntos simultáneos pero en sentido de máquina como muestra la tabla 25.

Tabla 25

Ensayo de flexión C250 Sentido de máquina-2 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 3 | 0,27 |
| 2 | 6 | 0,6 |
| 3 | 9 | 0,86 |
| 4 | 12 | 1,17 |
| 5 | 15 | 1,39 |
| 6 | 17 | 1,48 |
| 7 | 19 | 1,58 |

En la figura 77 observamos la tendencia del material en base a los valores de la tabla 25.

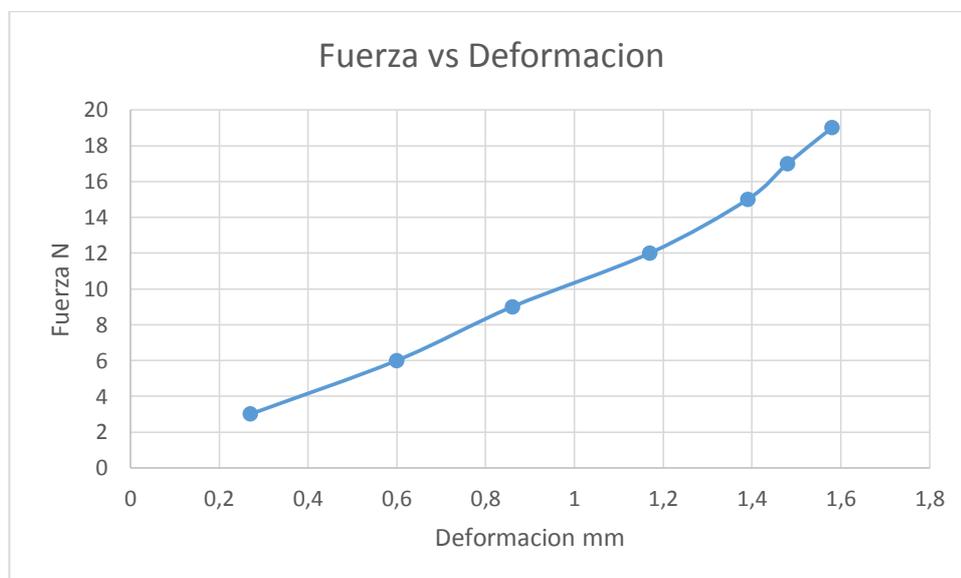


Figura 77 Fuerza vs Deformación sentido máquina - 2 puntos

Procedemos a la toma de datos para el material C250 en su punto central y en sentido de máquina, los valores son ilustrados en la tabla 26.

Tabla 26

Ensayo de flexión C250 en sentido de máquina - 1 punto

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 1 | 0,1 |
| 2 | 2 | 0,2 |
| 3 | 3 | 0,31 |
| 4 | 4 | 0,41 |
| 5 | 5 | 0,55 |
| 6 | 6 | 0,73 |
| 7 | 7 | 0,82 |
| 8 | 8 | 0,97 |
| 9 | 9 | 1,09 |
| 10 | 10 | 1,23 |
| 11 | 11 | 1,42 |
| 12 | 12 | 1,6 |

En la figura 78 observamos la gráfica de tendencia del material en sentido de máquina.

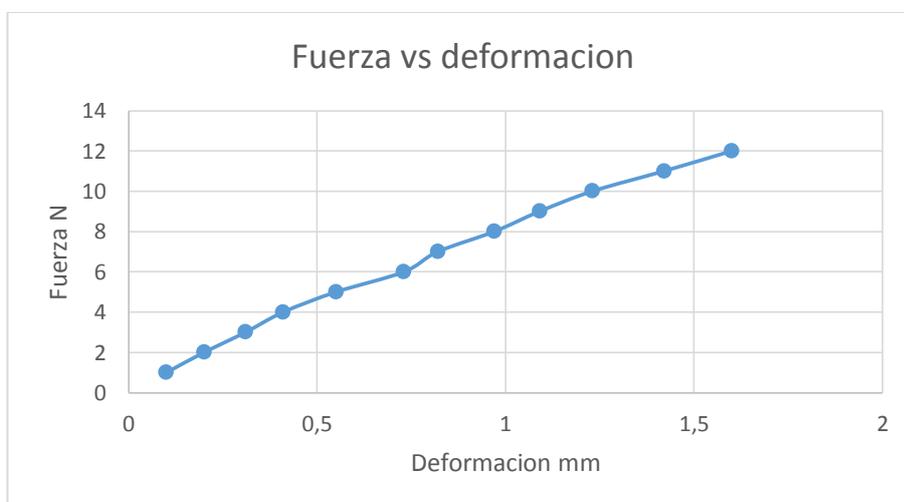


Figura 78 Fuerza vs Deformación en sentido de máquina - 1 punto

En la tabla 27 observamos la toma de datos para el material C250 en un punto central y en sentido transversal.

Tabla 27

Ensayo de flexión C250 en sentido transversal - 1 punto

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 3 | 0,53 |
| 2 | 6 | 1,02 |
| 3 | 9 | 1,56 |
| 4 | 12 | 2,2 |
| 5 | 15 | 2,75 |
| 6 | 18 | 3,7 |
| 7 | 19 | 4,75 |

En la figura 79 se ilustra la gráfica de tendencia del material en sentido transversal con una carga puntual y central.



Figura 79 Fuerza vs Deformación C250 en sentido transversal - 1 punto

Cálculos

- Rigidez a la flexión en sentido transversal:

$$D_{22} = \frac{19(140)^3 \left[1 - \left(\frac{11(140)^2}{8(140)^2} \right) \right]}{48(4,75) \left[1 - \left(\frac{2(19)(140)(7,85)}{49(140)(4,75)} \right) \right]}$$

$$D_{22} = 304474.63 \text{ N} - \text{mm}^2$$

$$D_{22} = 0,3044 \text{ N} - \text{m}^2$$

$$D_{22} = 6,08 \text{ N} - \text{m}$$

- Rigidez a la flexión en sentido de máquina

$$D_{11} = \frac{12(140)^3 \left[1 - \left(\frac{11(140)^2}{8(140)^2} \right) \right]}{48(1,6) \left[1 - \left(\frac{2(12)(140)(1,58)}{19(140)(1,6)} \right) \right]}$$

$$D_{11} = 649966,75 \text{ N} - \text{mm}^2$$

$$D_{11} = 0,6499 \text{ N} - \text{m}^2$$

$$D_{11} = 12,99 \text{ N} - \text{m}$$

3.5.6.3 Simple pared C200

Continuamos con el siguiente tipo de cartón utilizando un procedimiento similar a los anteriores. En la tabla 28 observamos los valores de la experimentación del material C200 ante dos cargas puntuales en sentido transversal.

La representación gráfica de la tabla 28 consta en la figura 80.

Tabla 28

Ensayo de flexión C200 Sentido transversal - 2 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 3 | 0,49 |
| 2 | 6 | 1,04 |
| 3 | 9 | 1,47 |
| 4 | 12 | 2,03 |
| 5 | 15 | 2,54 |
| 6 | 18 | 3,1 |
| 7 | 21 | 3,65 |
| 8 | 24 | 4,15 |
| 9 | 27 | 5,05 |
| 10 | 30 | 5,65 |
| 11 | 33 | 6,92 |
| 12 | 36 | 7,3 |
| 13 | 39 | 7,7 |
| 14 | 42 | 7,8 |
| 15 | 45 | 7,9 |
| 16 | 48 | 7,98 |
| 17 | 51 | 8,05 |

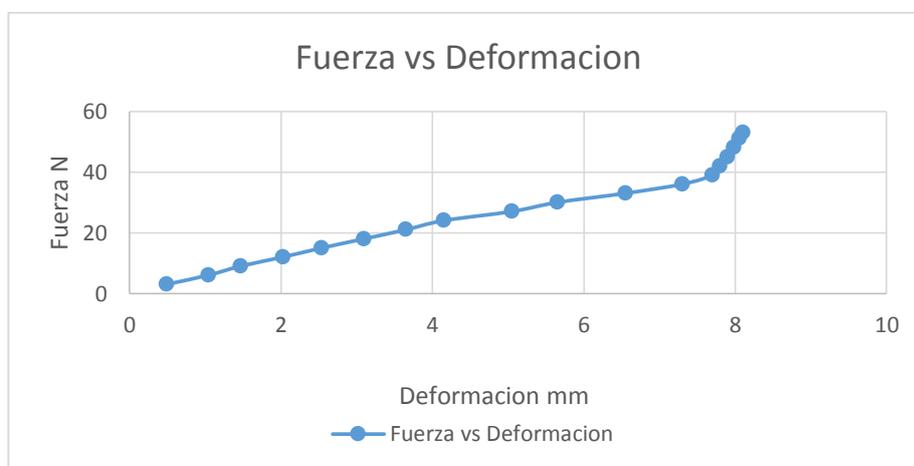


Figura 80 Fuerza vs Deformación C200 en sentido transversal - 2 puntos

En la tabla 29, analizamos experimentalmente con una carga central en el punto medio de la probeta en sentido transversal para el cartón C200.

Tabla 29

Ensayo de flexión C200 Sentido transversal - 1 punto

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 2 | 0,57 |
| 2 | 4 | 1,08 |
| 3 | 6 | 1,66 |
| 4 | 8 | 2,25 |
| 5 | 10 | 2,86 |
| 6 | 11 | 3,4 |
| 7 | 12 | 3,77 |
| 8 | 13 | 4,2 |
| 9 | 14 | 4,85 |
| 10 | 15 | 5,2 |

La tendencia del material cuyos puntos están en la tabla 29 se grafica en la figura 81.

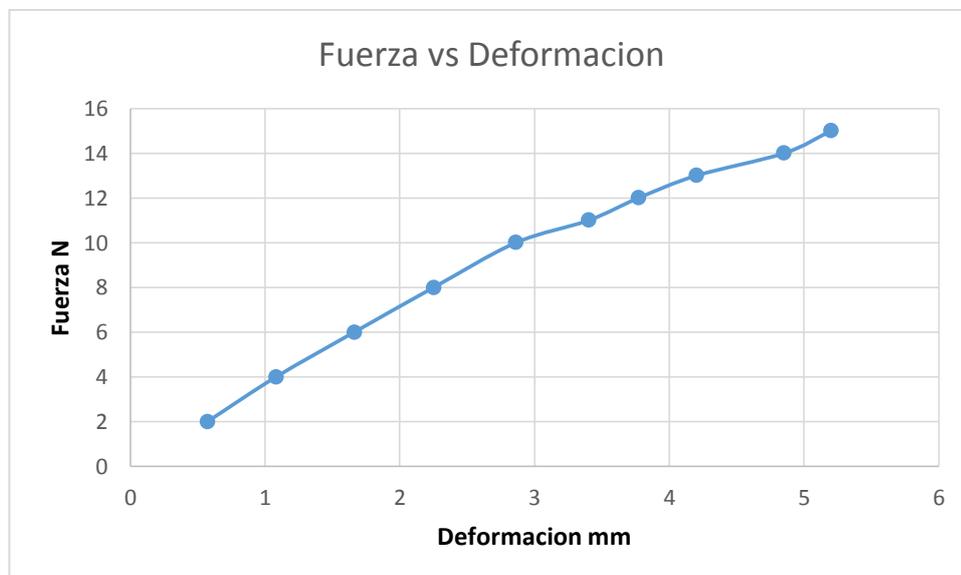


Figura 81 Fuerza vs Deformación C200 en sentido transversal - 1 punto

De manera similar realizamos la toma de datos para el cartón C200 en dos puntos y en sentido de máquina, como se observa en la tabla 30, y su respectiva tendencia se presenta en la gráfica 82.

Tabla 30

Ensayo de flexión C200 en sentido de máquina - 2 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 3 | 0,33 |
| 2 | 6 | 0,69 |
| 3 | 9 | 1,04 |
| 4 | 12 | 1,4 |
| 5 | 15 | 1,71 |

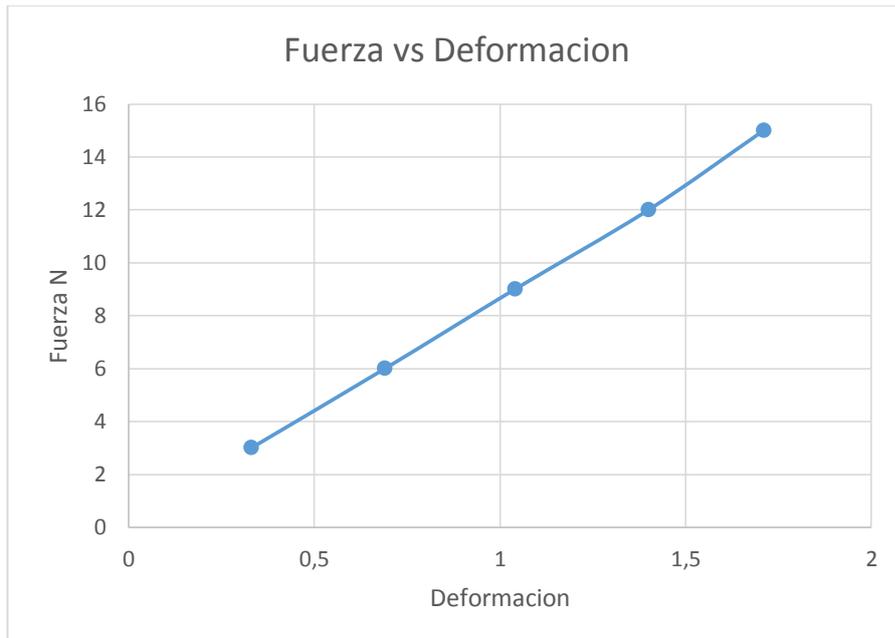


Figura 82 Fuerza vs Deformación C200 en sentido de máquina - 2 puntos

Para finalizar con este tipo de material realizamos el último ensayo con una carga puntual en su centro en sentido de máquina, obteniendo los valores descritos en la tabla 31.

En la gráfica 83 observamos la tendencia que el material presenta.

Tabla 31

Ensayo de flexión C200 en sentido máquina - 1 punto

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 1 | 0,28 |
| 2 | 2 | 0,5 |
| 3 | 3 | 0,82 |
| 4 | 4 | 0,98 |
| 5 | 5 | 1,25 |
| 6 | 6 | 1,47 |
| 7 | 8 | 1,65 |

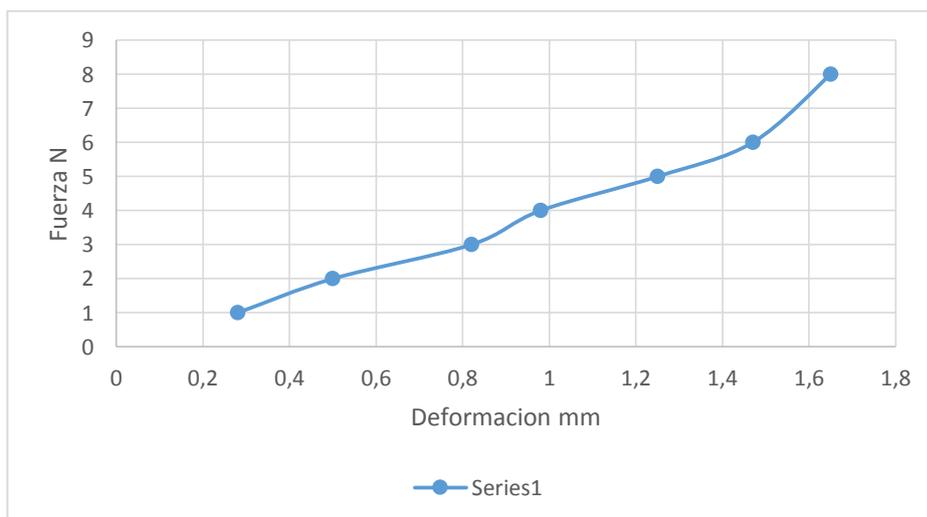


Figura 83 Fuerza vs Deformación C200 en sentido de máquina - 1 punto

Cálculos:

- Rigidez a la flexión en sentido transversal:

$$D_{22} = \frac{15(140)^3 \left[1 - \left(\frac{11(140)^2}{8(140)^2} \right) \right]}{48(5,2) \left[1 - \left(\frac{2(15)(140)(6,92)}{33(140)(5,2)} \right) \right]}$$

$$D_{22} = 294765,62 \text{ N} - \text{mm}^2$$

$$D_{22} = 0,2947 \text{ N} - \text{m}^2$$

$$D_{22} = 5,89 \text{ N} - \text{m}$$

- Rigidez a la flexión en sentido de la máquina

$$D_{22} = \frac{8(140)^3 \left[1 - \left(\frac{11(140)^2}{8(140)^2} \right) \right]}{48(1,65) \left[1 - \left(\frac{2(8)(140)(1,71)}{14(140)(1,65)} \right) \right]}$$

$$D_{11} = 563615,02 \text{ N} - \text{mm}^2$$

$$D_{11} = 0,5636 \text{ N} - \text{m}^2$$

$$D_{11} = 11,27 \text{ N} - \text{m}$$

3.5.6.4 Simple Pared B125

Para el último material a ensayarse procedemos de manera similar a los anteriores casos, así, en la tabla 32 se muestran los valores obtenidos en la experimentación del cartón B125 en sentido transversal con dos puntos de carga, además en la figura 84 se ilustra la gráfica obtenida con los datos de la experimentación.

Tabla 32

Ensayo de flexión B125 sentido transversal – 2 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|------------|------------|------------------|
| 1 | 2 | 0,61 |
| 2 | 4 | 1,174 |
| 3 | 5 | 2,2 |
| 4 | 6 | 3 |
| 5 | 7 | 3,4 |
| 6 | 8 | 3,8 |
| 7 | 9 | 4,25 |
| 8 | 10 | 4,79 |
| 9 | 11 | 5,38 |
| 10 | 12 | 6,04 |
| 11 | 13 | 6,75 |
| 12 | 14 | 7,49 |
| 13 | 15 | 7,63 |
| 14 | 16 | 7,7 |
| 15 | 17 | 7,77 |
| 16 | 18 | 7,81 |
| 17 | 19 | 7,9 |

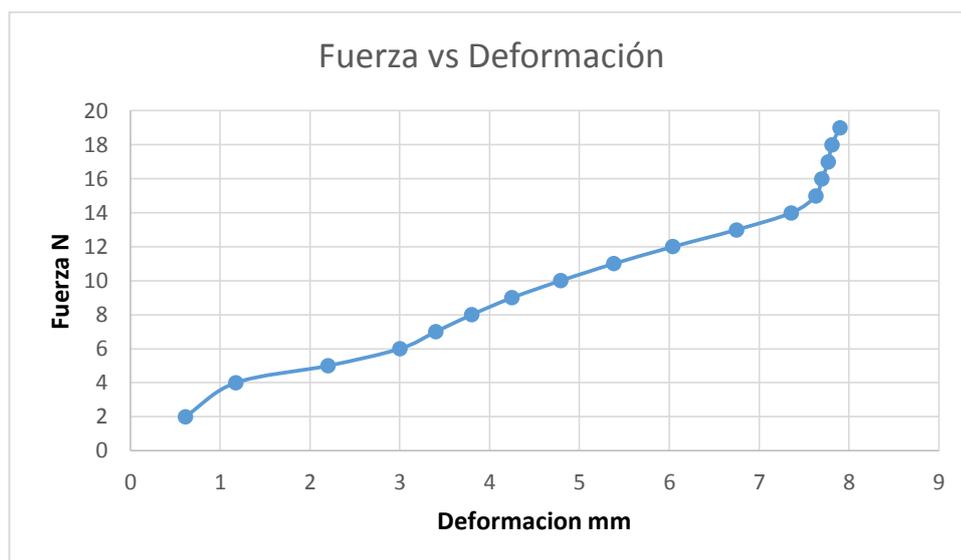


Figura 84 Fuerza vs Deformación B125 en sentido transversal - 2 puntos

Seguidamente realizamos el estudio experimental de las probetas cortadas en el sentido de máquina y con dos puntos de carga. En la tabla 33 observamos los valores obtenidos.

Tabla 33 .

Ensayo de flexión B125 en el sentido de máquina - 2 puntos

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 1 | 0,11 |
| 2 | 2 | 0,4 |
| 3 | 3 | 0,64 |
| 4 | 4 | 0,89 |
| 5 | 5 | 1,17 |
| 6 | 6 | 1,47 |

En la gráfica 85 podemos apreciar el comportamiento del material visualmente:

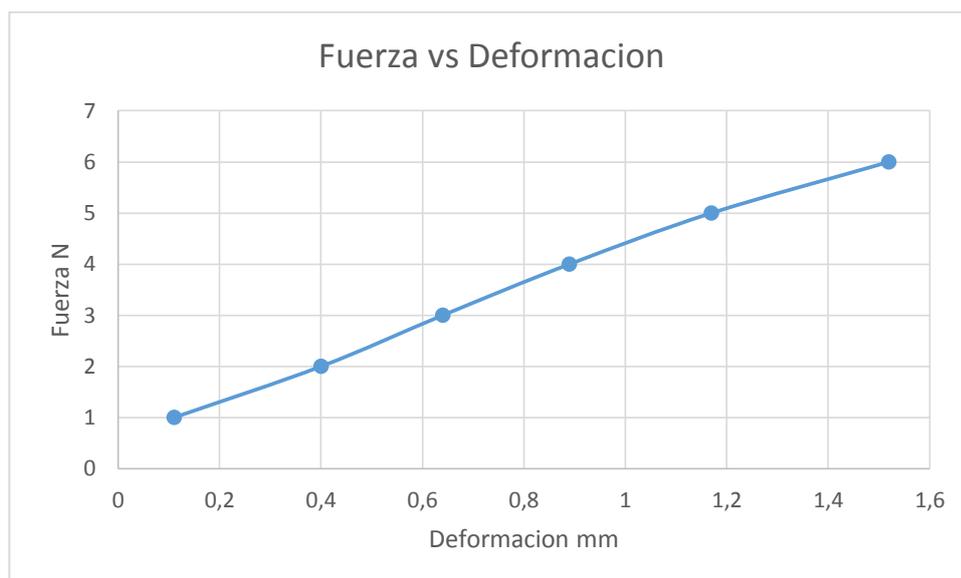


Figura 85 Fuerza vs deformación B125 en el sentido de máquina - 2 puntos

Continuando con el cartón B125, al realizar el ensayo en sentido de máquina y con una carga central en la probeta, se obtienen los datos que se observan en la tabla 34.

Tabla 34

Ensayo de flexión B125 en el sentido de máquina – 1 punto

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 1 | 0,5 |
| 2 | 2 | 0,91 |
| 3 | 3 | 1,41 |
| 4 | 4 | 1,89 |
| 5 | 5 | 2,1 |

En la figura 86 observamos la tendencia del material B125, en el sentido de máquina, con una carga en su centro.

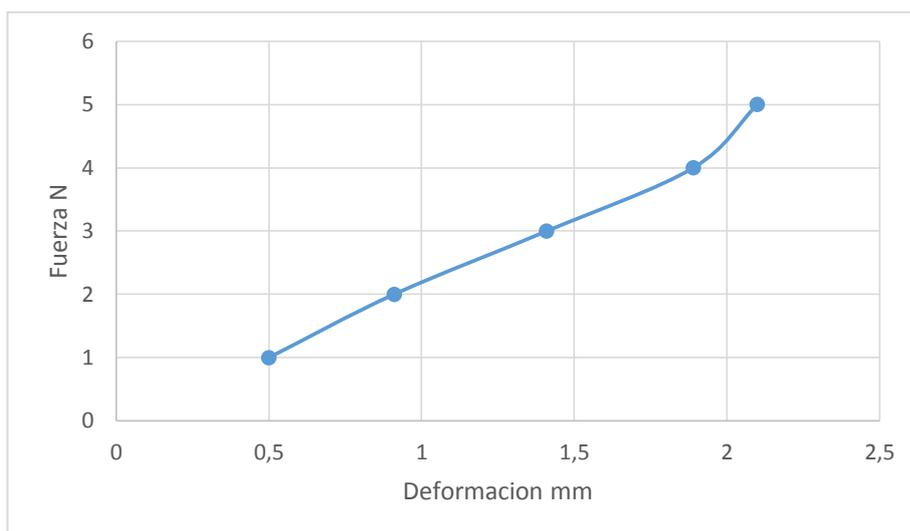


Figura 86 Fuerza vs deformación B125 sentido de máquina-1 punto

Finalmente realizamos el último ensayo al cartón corrugado, de esta manera, en la tabla 35 se muestran los valores que nos proporciona el cartón B125 ante una carga central y dispuesta en sentido transversal.

Tabla 35

Ensayo de flexión B125 sentido transversal – 1 punto

| # Punto | Fuerza (N) | Deformación (mm) |
|---------|------------|------------------|
| 1 | 1 | 0,83 |
| 2 | 2 | 1,6 |
| 3 | 3 | 2,4 |
| 4 | 4 | 3,4 |
| 5 | 5 | 4,6 |
| 6 | 6 | 5,6 |
| 7 | 7 | 6,48 |
| 8 | 8 | 6,62 |
| 9 | 9 | 6,67 |
| 10 | 10 | 6,75 |
| 11 | 11 | 6,85 |

En la figura 87 observamos la tendencia que presenta el material cortado en sentido transversal ante una carga puntual en su centro.

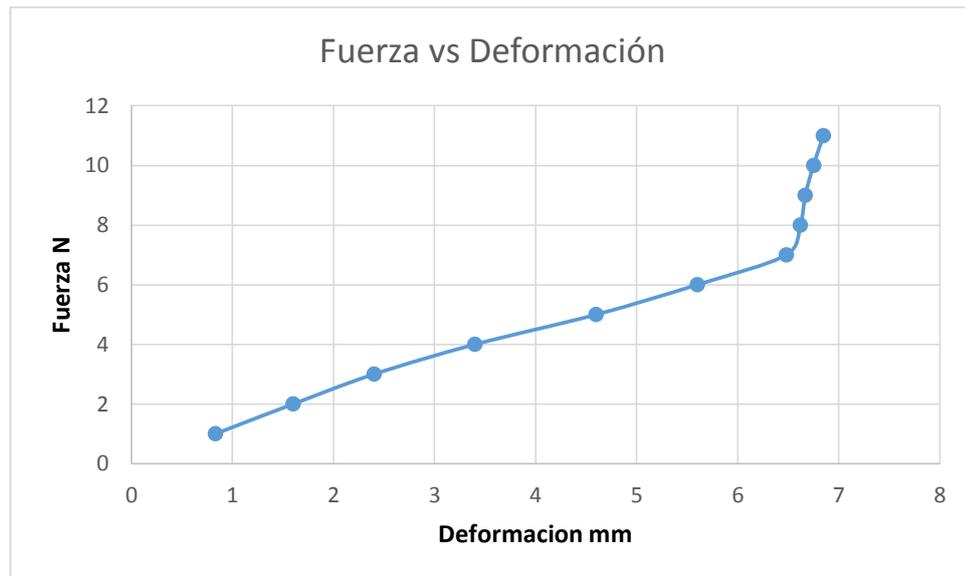


Figura 87 Fuerza vs deformación B125 en sentido transversal - 1 punto

Cálculos

Procedemos a calcular la rigidez a la flexión con la fórmula dada en el capítulo 2, tanto para sentido transversal como para sentido de la máquina.

$$D = \frac{P_1 L_1^3 \left[1 - \left(\frac{11 L_2^2}{8 L_1^2} \right) \right]}{48 \Delta_1 \left[1 - \left(\frac{2 P_1 L_1 \Delta_2}{P_2 L_2 \Delta_1} \right) \right]}$$

D es la rigidez a la flexión (N-mm)

L es longitud entre apoyos del ensayo (mm)

Δ es la deflexión medida en la mitad de la distancia entre apoyos (mm)

P es la carga efectuada (N)

En nuestro caso las longitudes entre apoyos serán las mismas tanto para el ensayo de una carga en la mitad como para el ensayo con dos puntos de carga y corresponde a 140 mm

- Rigidez a la flexión en sentido transversal:

$$D_{22} = \frac{7(140)^3 \left[1 - \left(\frac{11(140)^2}{8(140)^2} \right) \right]}{48(6,48) \left[1 - \left(\frac{2(7)(140)(7,49)}{14(140)(6,48)} \right) \right]}$$

$$D_{22} = 148576,73 \text{ N} - \text{mm}^2$$

$$D_{22} = 0,1485 \text{ N} - \text{m}^2$$

$$D_{22} = 2,97 \text{ N} - \text{m}$$

- Rigidez a la flexión en sentido de máquina:

$$D_{11} = \frac{5(140)^3 \left[1 - \left(\frac{11(140)^2}{8(140)^2} \right) \right]}{48(2,1) \left[1 - \left(\frac{2(5)(140)(1,47)}{6(140)(2,1)} \right) \right]}$$

$$D_{11} = 306250 \text{ N} - \text{mm}^2$$

$$D_{11} = 0,306 \text{ N} - \text{m}^2$$

$$D_{11} = 6,125 \text{ N} - \text{m}$$

Nota: Los valores últimos de cada tabla son los valores donde el material presentó falla. Se considera falla cuando el medidor de fuerza digital empieza retroceder en su medición, es decir, disminuye la resistencia del material como se observa en la figura 88.



Figura 88 Material DP350 cede por flexión

3.5.7 Resultados

En la tabla 36 se ilustran todos los resultados obtenidos en cuanto a la rigidez a la flexión de los materiales analizados.

Tabla 36

Rigidez a la flexión de los materiales ensayados

| Tipo de cartón | D ₁₁ (Nm) | D ₂₂ (Nm) |
|----------------|----------------------|----------------------|
| DP350 | 25,4 | 12,11 |
| C250 | 12,99 | 6,08 |
| C200 | 11,27 | 5,89 |
| B125 | 6,12 | 2,97 |

3.5.8 Validación de ensayo de flexión.

Una vez concluidos los ensayos de flexión, es de suma importancia validar los resultados obtenidos en el estudio experimental; para lo cual, se procederá a compararlos con los valores mostrados en otras investigaciones de materiales de índole similar.

En la tabla 37 podemos observar los resultados de la rigidez a la flexión en ambos sentidos obtenidos por Hahn et al. (1992).

Tabla 37

Valores de rigidez por estudio investigativo

| Cartón | 140B | 160C |
|------------------------|-------------|-------------|
| Espesor (mm) | 2,86 ± 0,01 | 4,02 ± 0,03 |
| D ₁₁ , (Nm) | 6,40 ± 0,20 | 13,0 ± 1,1 |
| D ₂₂ , (Nm) | 2,40 ± 0,10 | 5,60 ± 0,2 |
| D ₁₂ , (Nm) | 1,15 | 2,50 |
| D ₆₆ , (Nm) | 1,39 | 3,02 |
| P _{cr} , (N) | 389 | 853 |

Fuente: (Hahn, Carlsson, & Westerlind, 1992)

Al analizar y comparar los valores correspondientes a las tablas 36 y 37, se puede apreciar que la rigidez a la flexión de los materiales estudiados por Hahn et al. (1992) se asemejan mucho a los valores obtenidos mediante el ensayo de flexión en el presente trabajo para el mismo parámetro, tomando en cuenta materiales con el mismo tipo de flauta.

CAPÍTULO IV

DISEÑO MODULAR

4.1 Descomposición Modular

Para llevar a cabo el diseño modular de los 3 tipos de muebles que se contemplan en el presente trabajo, es decir, tanto de la silla de oficina, del escritorio como del estante de almacenamiento, es necesario, primeramente, realizar una descomposición física y funcional que nos muestre cuáles son sus mínimas partes constituyentes.

- **Silla**

La silla que se procederá a diseñar es una silla de oficina fija sin apoyaduras para los brazos como la que se muestra en la figura 89.



Figura 89 Silla de oficina fija sin apoyaduras para los brazos

Las partes más comunes que se pueden encontrar en cualquier espécimen de sillas de este tipo son el espaldar, el asiento y las patas de soporte cuyas

funciones son permitir el apoyo adecuado de la espalda del usuario, permitirle sentarse y dar sustento a toda la estructura, respectivamente.

- **Escritorio**

Un escritorio de oficina tipo C, el cual fue escogido para el presente proyecto, básicamente se compone de 3 partes fundamentales que son la superficie plana de trabajo, compartimento de almacenamiento o un bloque de ellos y la estructura de soporte como se muestra en la figura 90.

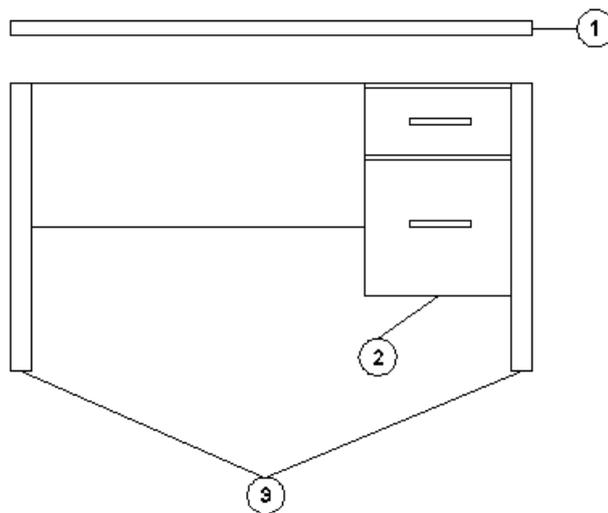


Figura 90 Escritorio de oficina tipo C

La superficie de trabajo cumple la función de dar al usuario un área en la cual pueda llevar a cabo una variedad de actividades y dar soporte a los equipos y utensilios que éste desee utilizar; la gaveta, por otro lado, permite el almacenamiento de documentos u objetos que el usuario requiera y, finalmente, la estructura de soporte deberá dar al conjunto una estabilidad adecuada y asegurar su normal funcionamiento ante cargas externas.

Para el elemento que tomará la función de la superficie de trabajo no se realizará ensayo alguno debido a que, se utilizara una plancha de tablero aglomerado con el fin de maximizar su rigidez ya que el cartón corrugado, a pesar de ser un material adecuado para soportar cargas en aplastamiento

plano como se lo mostró en el capítulo 3, es débil ante impactos o cargas en áreas muy pequeñas.

- **Estante de almacenamiento**

Al analizar el estante de almacenamiento podemos notar que simplemente consta de la unión de varios compartimentos cuya función es la de brindar un espacio adecuado para acumular diferentes objetos y de clasificarlos de acuerdo a la conveniencia y preferencia de los usuarios.

4.2 Módulos a Utilizar

Se han ideado diferentes tipos de estructuras hechas con cartón, los cuales permitirán el cumplimiento de las funciones de cada uno de los muebles que el presente trabajo contempla y que fueron mencionados previamente.

4.2.1 Material

El material que fue seleccionado, de entre los diferentes tipos de cartón corrugado, es el de doble pared pues, aunque no permite ahorrar material ya que su relación peso – calibre no es la menor de todas (ver tabla 38), su espesor, superior al de los demás tipos, nos permitirá usar una menor cantidad de láminas para cada tipo de estructura lo que, a su vez, se traduce en un menor uso de adhesivos y en una menor cantidad de cortes que se deban efectuar, algo muy importante debido a su costo en especial al ser efectuado mediante láser.

Tabla 38**Espesor de los tipos de cartón corrugado**

| Tipo de Cartón Corrugado | Gramaje (g/m ²) | Calibre (mm) | Relación Peso – Calibre |
|--------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|
| 350 DP | 350 | 6,73 | 52 |
| 250 C | 250 | 4,57 | 54,7 |
| 200 C | 200 | 4,25 | 47,05 |
| 125 B | 125 | 2,83 | 44,16 |

4.2.2 Silla

Para la silla de oficina se plantea una estructura ensamblable en forma de malla hecha de láminas de cartón corrugado con ranuras para su acoplamiento, como la que se puede apreciar en la figura 91, cuya finalidad es disminuir el peso del producto final y con ello el gasto de material.

**Figura 91 Silla hecha con láminas de cartón corrugado ranuradas**

Cabe mencionar que aunque la silla vendría a estar compuesta básicamente por espaldar y asiento, esta última zona se encuentra sometida

a los mayores esfuerzos inherentes a su forma de uso y será separada de la estructura para proceder a realizar los ensayos de resistencia.

De esta manera, los módulos que corresponden a la zona del asiento serán ensayados mediante pruebas de compresión. Las medidas que tendrán se registrarán a lo estipulado en la norma NTE INEN 1647 para una silla de oficina y corresponden a un alto de 420 mm, y a una profundidad y un ancho efectivo en el asiento de 450 mm.

Se han elaborado 3 tipos diferentes de módulos con estas dimensiones, el primero de ellos se trata de un mallado en el que cada pared está compuesta por dos láminas de cartón corrugado unidas con un adhesivo basado en alcohol polivinílico (ver figura 92); el segundo tipo de módulo, bastante similar, tiene 3 láminas por cada pared unidas, de la misma forma con un adhesivo y, finalmente, para dar una mayor resistencia, se optó por agregar tubos de cartón de 420 mm de alto en las zonas huecas de un mallado de doble lámina y en forma de cruz para formar el tercer tipo de módulo (ver figura 93). Cabe mencionar que la dirección de las flautas del cartón es perpendicular a la superficie del asiento, con lo que se desea llevar al máximo su resistencia.



Figura 92 Zona de asiento de silla hecha con 2 láminas ranuradas por cada pared



Figura 93 Zona de asiento de silla hecha con 2 láminas ranuradas por cada pared y reforzada con tubos de cartón

En este tipo de estructuras se ha optado por ayudar a la unión de las láminas con pegamento termofusible en cada punto de intersección del mallado.

La distancia entre cada pared es de 81 mm, valor superior al utilizado por Kiki Carton (2012) en sus modelos de sillas artesanales y que corresponde a 72 mm. Esta distancia permite, así mismo, la inserción de los tubos de cartón que se encuentran disponibles; a continuación se pueden apreciar los tres tipos de módulos con sus dimensiones propuestas en las figuras 94, 95 y 96.

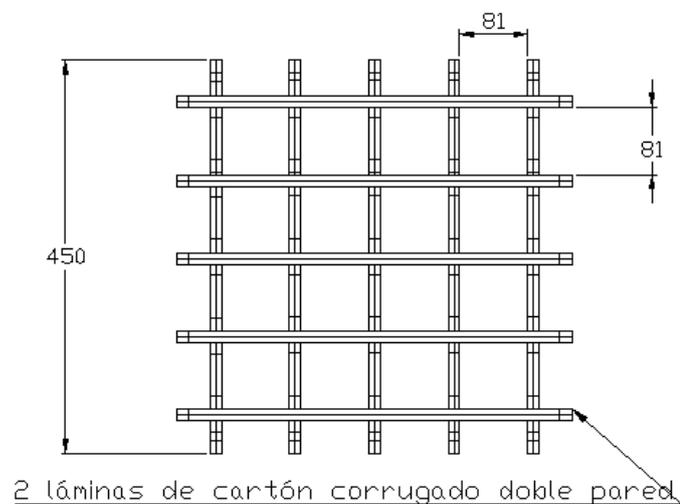


Figura 94 Medidas de la zona de asiento de la silla de doble lámina ranurada

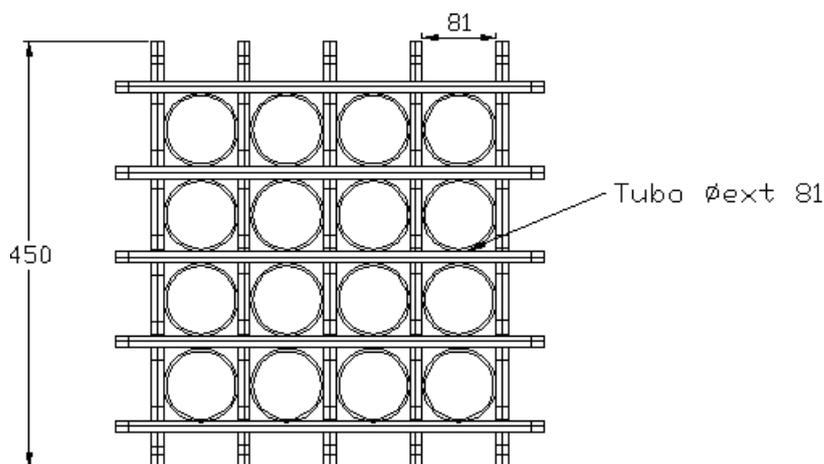


Figura 95 Medidas de la zona de asiento de la silla de doble lámina ranurada reforzada con tubos de cartón

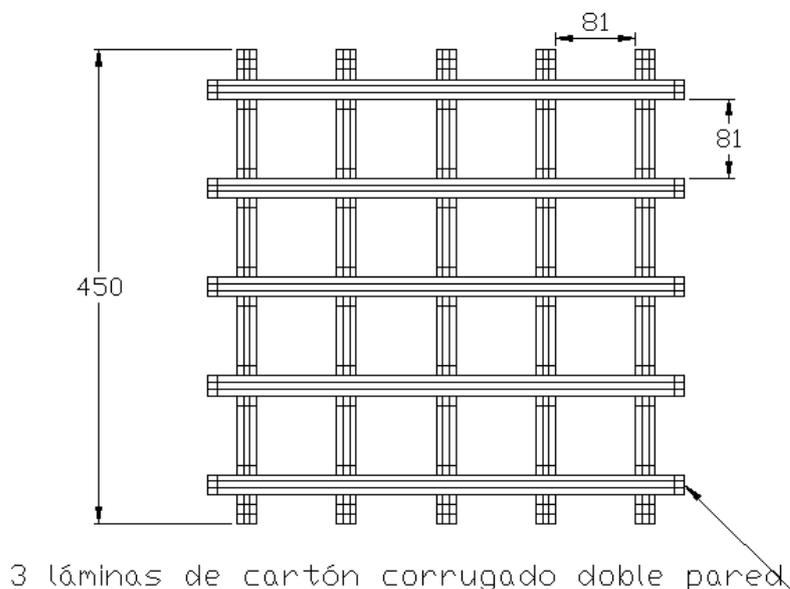


Figura 96 Medidas de la zona de asiento de la silla de triple lámina ranurada

El corte de las láminas que componen cada tipo de asiento se realizó mediante láser debido a que con ello se obtiene una precisión adecuada para efectuar uniones más precisas, asimismo ayuda a no dañar al material con una excesiva manipulación.

4.2.3 Estante

En el caso del estante de almacenamiento, se ha reducido la estructura a su mínima parte constitutiva, es decir, a cada uno de los pequeños estantes que puedan conformarlo; de esta manera, se plantea la idea de que se puedan armar estructuras con la combinación de varios de ellos, en las disposiciones deseadas, logrando así una mayor versatilidad y una posibilidad de aumentar y modificar casi indefinidamente la forma del producto final. A su vez, los estantes planteados, como los que se pueden apreciar en la figura 97, nos permitirán armar la estructura de almacenamiento presente en el escritorio.



Figura 97 Estante de almacenamiento

Se han planteado 3 tipos diferentes de módulos de estantes que van a ser sometidos a pruebas de compresión para probar su resistencia y cuyas dimensiones las podemos apreciar en la figura 98 y en la tabla 39.

Estas dimensiones se han basado en la normativa NTE INEN 1642 que nos dicta que el alto útil de cada estante deberá ser de al menos 330 mm y a su vez deberá tener una profundidad útil de 290 mm, además como referencia para el dimensionamiento también podemos citar que las paredes de

estructuras de cartón similares, hechas por la empresa Vitra y que corresponden a mesas bajas, tienen un espesor de 60 mm.

Los módulos de los estantes serán construidos mediante una técnica de construcción con láminas de cartón llamada apilamiento en donde se colocarán 42 de ellas con la forma cuadrangular hueca, una tras otra y en el final 5 láminas de forma cuadrangular sin orificios para dar forma a toda la estructura, la dirección del cartón corrugado será dispuesta en la dirección de mayor resistencia a la compresión, es decir, de tal manera que la dirección de las flautas sea perpendicular a la superficie de contacto.

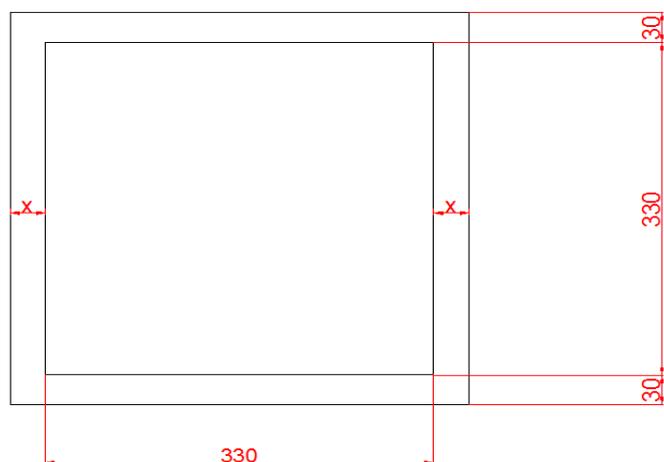


Figura 98 Medidas del estante de almacenamiento

Tabla 39

Designación de los módulos de acuerdo al espesor de la pared vertical

| Módulo | X (mm) |
|--------|--------|
| 1 | 30 |
| 2 | 45 |
| 3 | 60 |

El corte de las láminas que componen los módulos de los estantes y cuya resistencia será probada se ha efectuado mediante la utilización de herramientas eléctricas.

4.2.4 Tubos de Cartón

En la concepción del escritorio también se ha considerado el uso de tubos de cartón de manera que sean los elementos de soporte o, como comúnmente se conocen, en forma de “patas” de la estructura.

Los proveedores locales de estos productos, por otro lado, han limitado el amplio espectro de tubos que se podrían utilizar para el fin planteado ya que solicitan pedidos de alto número para proceder a su fabricación. Los tubos que en el presente trabajo se utilizan tienen como dimensiones iniciales un diámetro interno de 3 pulgadas, 3 mm de espesor de pared y 110 cm de largo.

4.2.5 Vigas

Como parte de la estructura de soporte del escritorio, se ha planteado el uso de vigas hechas con láminas de cartón corrugado, las cuales se colocarían entre dos tubos de cartón y permitirían dar el espacio hueco que necesita el usuario para colocar sus piernas al estar sentado.

La longitud de dichas vigas viene dado por el diámetro de los tubos de cartón, en los cuales se asentará, añadido a los 580 mm que la norma NTE INEN 1641 dicta como espacio necesario para esta zona del escritorio como se observa en la figura 99.

El ancho de las vigas será constante y tendrá un valor de 100.95 mm, lo que corresponde a 15 láminas de cartón corrugado unidas una a lado de otra; dicha medida fue escogida en aras de que pueda acoplarse de forma

adecuada con los tubos y, finalmente, solo procederemos a variar su alto en 3 dimensiones: 100, 80 y 60 mm.

Las vigas que se sometieron a las pruebas mecánicas fueron obtenidas a partir de cortes efectuados mediante herramientas de tipo eléctrico.



Figura 99 Viga de cartón corrugado

4.3 Ensayos a Módulos

Una vez definidos y dimensionados los respectivos módulos que pudiesen utilizarse en la conformación de los muebles, se procede a llevar a cabo la experimentación en aras de verificar la resistencia mecánica de cada módulo en relación a la función que deberá cumplir dentro del sistema global del mobiliario. Se ha visto la necesidad de construir y experimentar en 3 módulos idénticos de cada ejemplar para poder generar un valor más real y práctico.

4.3.1 Experimentación en módulos de estante

Los módulos de estantes definidos anteriormente serán sometidos a una carga de compresión con el fin de conocer su resistencia y, de esta manera, determinar cuál modulo sería el idóneo para la función que debe cumplir.

El experimento se lo llevo a cabo en las instalaciones del laboratorio de resistencia mecánica del Instituto Ecuatoriano De Normalización. El equipo utilizado fue la máquina de compresión CO702D –Tester Sangyo, mostrada en la figura 100 y las condiciones ambientales a las que se llevaron los

ensayos fueron de una temperatura de 21,8 °C y una humedad relativa de 50,4%.



Figura 100 Máquina de compresión CO702D –Tester Sangyo de los laboratorios del INEN

Procedimiento

Se calibra el equipo para obtener un rango de medición de 0 a 5000 kg, luego centramos el módulo en el piso fijo inferior de la máquina para proceder, posteriormente, a desplazar hacia abajo el piso móvil hasta que exista contacto con el estante, como se muestra en la figura 101.

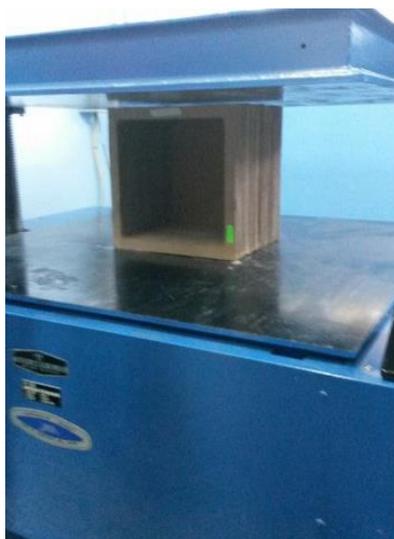


Figura 101 Prueba de compresión realizada sobre el módulo del estante

Luego de ello, se aplica la fuerza en sentido de compresión del módulo hasta que éste falle, repitiendo el proceso para los 3 especímenes de cada tipo de estante. Una vez concluido el ensayo mecánico se procede a pesar cada elemento para, de esta manera, obtener un resultado preciso acerca de la resistencia que presenta en relación a su peso; en la figura 102 se puede apreciar el dispositivo utilizado para este fin.



Figura 102 Balanza digital de los laboratorios del INEN

En la tabla 40 podemos apreciar los datos de resistencia que nos han dejado como resultado las pruebas de los módulos.

Tabla 40

Datos de ensayo de compresión a módulos de estantes

| Módulo | Parámetro | Muestra | | | Desviación estándar | Promedio | Relación Resistencia/Peso |
|--------|----------------------------------|---------|------|--------|---------------------|----------|---------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | | |
| 1 | Resistencia a la compresión (kg) | 1725 | 1425 | 1600 | 150,69 | 1583,33 | 699,09 |
| | Peso (g) | 2254 | 2259 | 2281,5 | 14,65 | 2264,83 | |
| 2 | Resistencia a la compresión (kg) | 2500 | 2850 | 2850 | 202,07 | 2733,33 | 1055,62 |
| | Peso (g) | 2604,9 | 2592 | 2571 | 17,11 | 2589,30 | |
| 3 | Resistencia a la compresión (kg) | 3400 | 3200 | 3200 | 115,47 | 3266,67 | 1094,72 |
| | Peso (g) | 2982 | 2945 | 3025 | 40,04 | 2984,00 | |

Como observamos en la tabla 40, los resultados fueron satisfactorios debido a la gran resistencia mecánica presentada por los estantes ensayados, observando valores de hasta 3,2 toneladas como carga crítica en compresión para el módulo número 3 cuyas paredes laterales tenían 60 mm de ancho. En la figura 103 podemos observar como varía la relación resistencia-peso en función del espesor de las paredes verticales de la estructura del estante.

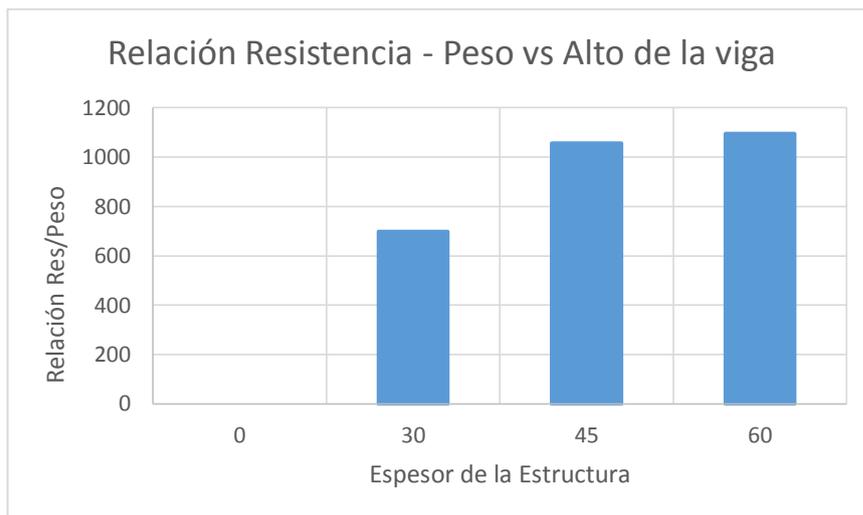


Figura 103 Gráfica de relación resistencia – peso existente en los módulos de estante ensayados

Al analizar el gráfico observamos una gran variación de la relación resistencia - peso en el estante cuyas paredes verticales tienen 30 mm de ancho a aquel cuyas paredes tienen 45 mm para la misma magnitud. Esta diferencia es mucho menos pronunciada para el estante de 60 mm de ancho de pared, es decir, observando la tendencia podemos afirmar que un aumento del espesor de las paredes verticales que vaya más allá de los 45 mm de ancho no hace crecer la relación resistencia – peso de manera considerable para este tipo de estructuras.

4.3.2 Ensayos a módulos de silla

Para los módulos de silla, identificados anteriormente, se procede a realizar un ensayo de compresión de forma que podamos conocer la magnitud de la carga que estos podrían soportar. El ensayo se lo lleva a cabo de igual manera que el realizado sobre los estantes, es decir, en las mismas instalaciones, día, temperatura ambiente, humedad e igual equipo.

El procedimiento es similar al anterior como se observa en la figura 104.



Figura 104 Módulo del asiento ensayado en compresión

Al realizar los 9 ensayos correspondientes a los módulos de las sillas, se procede al pesaje de cada uno de ellos.

En la tabla 41 se muestran los datos obtenidos mediante los ensayos de compresión realizados sobre los módulos de las sillas.

Tabla 41

Datos obtenidos en los ensayos a módulos de sillas

| Módulo | Parámetro | Muestra | | | Desviación estándar | Promedio | Relación Resistencia / Peso |
|-----------------------|----------------------------------|---------|--------|--------|---------------------|----------|-----------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | | |
| Doble lámina | Resistencia a la compresión (kg) | 1550 | 2225 | 2250 | 397,13 | 2008,33 | 615,330 |
| | Peso (g) | 3258,5 | 3261,5 | 3271,5 | 6,81 | 3263,83 | |
| Doble lámina con tubo | Resistencia a la compresión (kg) | 4950 | 5000 | 5100 | 76,38 | 5016,67 | 1036,501 |
| | Peso (g) | 4847 | 4833 | 4840 | 7,00 | 4840,00 | |
| Triple lámina | Resistencia a la compresión (kg) | 4950 | 4300 | 3900 | 529,94 | 4383,33 | 936,877 |
| | Peso (g) | 4803 | 4494 | 4739 | 163,10 | 4678,67 | |

Una vez obtenidos los resultados, es de vital importancia hacer un análisis acerca de la manera en que varía la resistencia cuando se utilizan tanto 2 como 3 láminas de cartón corrugado por cada pared y además cuando se añaden los tubos a su estructura. En la figura 105 podemos apreciar esa variación mediante su relación resistencia/ peso.

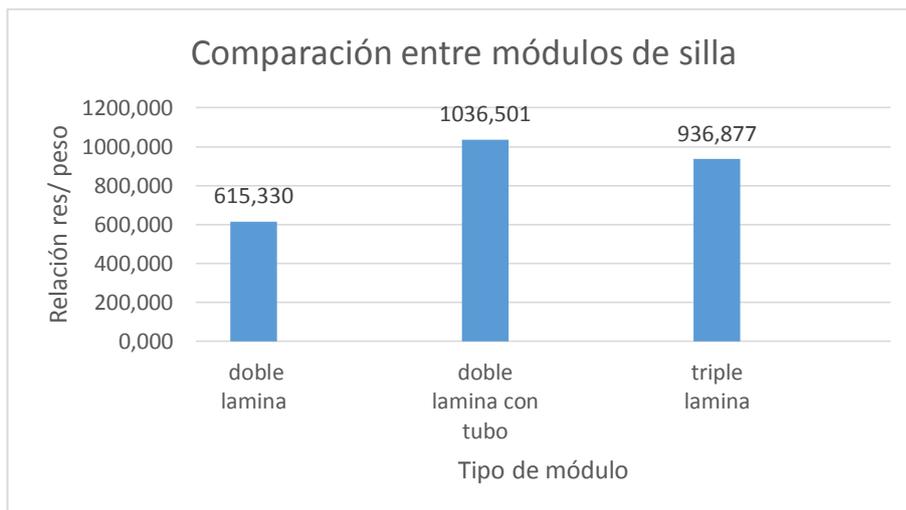


Figura 105 Gráfica de relación resistencia – peso existente en los módulos de silla ensayados

El módulo de pared de triple lámina en comparación con el módulo de doble lámina, que vamos a tomar como referencia y cuya carga promedio máxima es de 2008 kg a la compresión, presenta una diferencia de más del 100 % en cuanto a su resistencia (soportando 4383 kg, es decir 2375 kg más) y en cuanto a la relación resistencia / peso se puede ver un aumento de 34%; además, al incorporar 8 tubos de cartón, cada uno con una resistencia individual de 370 kg a la compresión y con una relación resistencia / peso de 2829,5 (ver tabla 42), podemos observar que el aumento, con respecto al módulo de referencia, es de 3008 kg en su resistencia a la compresión y su variación en resistencia / peso es de 40,6 %.

4.3.3 Ensayos a los tubos de cartón

Los tubos de cartón también han sido sometidos a pruebas de compresión (ver figura 106) y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 42.

Las probetas a analizar tienen 680 mm de largo, la cual es la medida final que tendrán en el escritorio (altura seguida de forma que el escritorio cumpla

con la altura designada por la norma NTE INEN 1641), y con ello se solventará, al mismo tiempo, el análisis de pandeo del elemento.



Figura 106 Prueba de compresión de tubos

Tabla 42

Resistencia a compresión tubo de módulo soporte de escritorio

| Parámetro | Muestra | | | Desviación estándar | Promedio | Relación Resistencia/ peso |
|----------------------------------|---------|-----|-----|---------------------|----------|----------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| Resistencia a la compresión (kg) | 415 | 365 | 330 | 42,72 | 370,00 | 1135,318 |
| Peso en (g) | 327,7 | 325 | 325 | 1,56 | 325,90 | |

Como se observa en la tabla 42 un tubo de cartón en una medida de 680 mm es capaz de soportar cargas de compresión óptimas para uso de soporte en un escritorio.

4.3.4 Ensayo de flexión a módulos de vigas

Procedemos a realizar ensayos de flexión con una carga puntual en el centro a módulos que cumplirán la función de viga en la estructura del escritorio.

El ensayo se lo lleva a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", en la máquina de ensayos universal. El total de ensayos a realizarse será de nueve, correspondientes a tres por cada tipo de viga en el que se ha variado su espesor como se indicó previamente.

El procedimiento empieza con la calibración de la máquina, instalando y ajustando las piezas para efectuar un ensayo de flexión con carga puntual en el centro de las vigas. Finalmente colocamos el módulo y bajamos el cilindro aplicador de fuerza hasta que exista contacto como se muestra en la figura 107.



Figura 107 : Prueba de flexión de vigas de cartón

Aplicamos fuerza hasta que la viga falle como se observa en la figura 108.



Figura 108 Viga que ha fallado con una carga de flexión

Culminado los ensayos obtenemos los resultados que se observan en la tabla 43.

Tabla 43

Datos obtenidos de la prueba de resistencia a flexión de vigas

| Tipo de viga | Espesor de viga (mm) | Muestra | | | Desviación estándar | Promedio |
|--------------|----------------------|---------|-----|-----|---------------------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | 60 | 60 | 68 | 55 | 6,56 | 61 |
| 2 | 80 | 104 | 115 | 96 | 9,54 | 105 |
| 3 | 100 | 135 | 167 | 163 | 17,44 | 155 |

Se observa en la figura 109 la gráfica que muestra como varia la resistencia a la flexión (con carga puntual en el centro) en función del ancho de la viga



Figura 109 . Espesor de viga vs resistencia en a la flexión de las vigas analizadas

Analizando la curva podemos afirmar que por cada 20 mm adicionales, en el alto de la viga, la resistencia incrementa un promedio de 47 kg a la flexión.

4.4 Diseño de Muebles

Una vez obtenidos los datos acerca de las pruebas mecánicas efectuadas sobre las estructuras de cartón, se deberá proceder a seleccionar la más adecuada para cada función particular dentro de cada tipo de mueble.

4.4.1 Silla

En el caso de la silla, se ha procedido a seleccionar el mallado hecho con 2 láminas ranuradas por cada pared cuya resistencia en la zona del asiento, la cual fue aislada inicialmente para ser testada, ha sido obtenida experimentalmente soportando en promedio 2008,33 kg a la compresión. De esta manera, posteriormente se procede a realizar el diseño de la silla

completa al añadir la zona del espaldar al tipo de asiento seleccionado. Se ha tomado como referencia a Kiki Carton (2012) para dar el dimensionamiento del ancho que deberá tener la sección del cartón que cumple la función de espaldar y que corresponde a 170 mm, pero a su vez se le ha dado una forma que, al ser más ensanchada en la base, le proporcione mayor equilibrio a toda la estructura.

Otro aspecto a tomar en cuenta es que no se han colocado transversales ni sus respectivos ranurados en la zona de unión entre el espaldar y el asiento en aras de no disminuir la resistencia que pudiera presentar la silla en su totalidad.

Las distancias que tienen los ranurados horizontales, presentes en el espaldar de la silla, son las mismas utilizadas en el asiento y corresponden a un valor de 81 mm todas ellas.

En la figura 110 podemos apreciar el diseño de la estructura de cartón corrugado y en la figura 111 la silla ensamblada y lista para su uso.

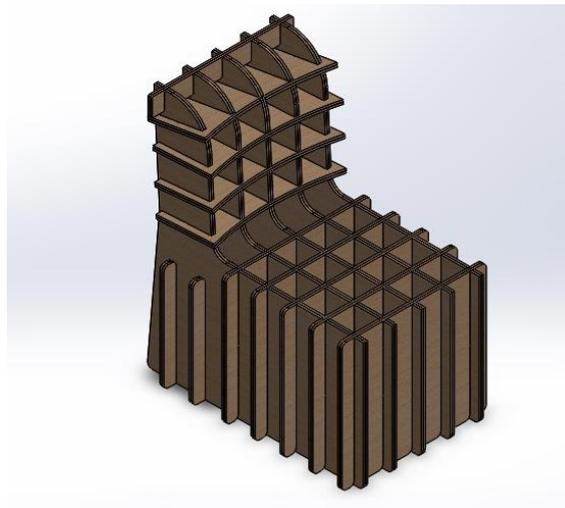


Figura 110 Silla de cartón corrugado-Diseño



Figura 111 Silla de cartón corrugado- final

La resistencia máxima de este tipo de mueble en la zona del asiento es bastante elevada y por ende también lo es su factor de seguridad cuyo valor corresponde a 18 (al utilizar como referencia a la carga que una silla de oficina debe soportar según la norma NTE INEN 2002).

Además su espaldar es lo suficientemente resistente para soportar cargas inherentes a su utilización sin problemas, afirmación que se sustenta en una prueba realizada sobre el producto terminado y que consiste en la aplicación de una fuerza de 15 N en tres puntos diferentes del espaldar sobre la misma. Se debe mencionar que el factor de seguridad, a pesar de ser bastante alto, es coherente con el diseño del mueble ya que se trata de un material nuevo al que se le ha de dar un cuidado especial para que no sufra ningún tipo de complicaciones en su uso normal. Como referencia podemos decir que según Gribbon et al. (2008), al utilizar cartón en estructuras sometidas a esfuerzos

permanentes de compresión y tensión bajo la influencia del efecto creep, el factor de seguridad estimado que fue usado ronda el valor de 10.

4.4.2 Estante de Almacenamiento

Para realizar el diseño del estante de almacenamiento se ha procedido a seleccionar, de entre los módulos planteados, a aquel de menor pero suficiente resistencia, es decir, al estante que, sometido a una carga de compresión, soportó 1583 kg en promedio y cuyas medidas exteriores son de 390 mm por cada lado y en el cual cada pared tiene el espesor de 30 mm.

La resistencia mostrada por este tipo de estructura, en términos generales, ha sido bastante alta, razón por la cual simplemente se procederá al ensamble de 3 pequeños estantes, uno sobre otro, para conformar el mueble y en el cual cada uno de ellos simplemente se encontraría sometido a una carga de compresión que dependerá de los elementos que la ejerzan y su masa.

Para que la unión entre los módulos se pueda realizar de una forma más sencilla, en este caso, se ha optado por que la sección de algunas de las láminas que conformarán al estante sea una sola, permitiendo, de esta manera, obtener una estructura rígida que, además de ser más fácil de ensamblar y no requerir otro tipo de uniones, podrá cumplir su funcionalidad sin problemas. Las 5 últimas láminas que son de sección constante, es decir sin orificio central, y 5 de las 42 láminas que conforman cada pequeño estante serán cortadas de forma que toda la sección y el material de la estructura sea uno solo y no tenga cortes de por medio.

En la figura 112 podemos apreciar el diseño del estante de almacenamiento completo, y en la figura 113 el estante ensamblado y finalizado.

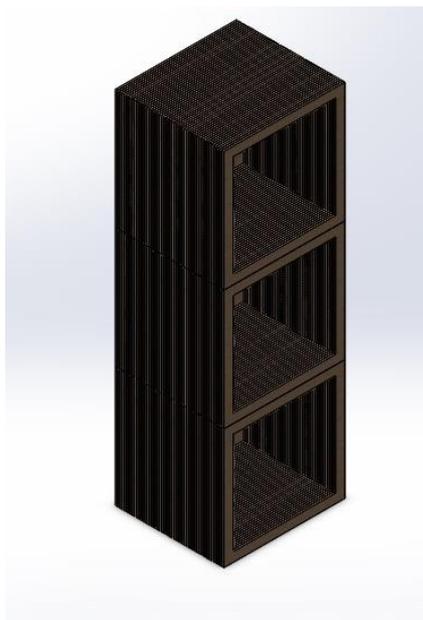


Figura 112 Estante de Almacenamiento-Diseño



Figura 113 Estante de Almacenamiento- Ensamblado

Ya que cada uno de los pequeños estantes puede soportar la carga de 1583 kg, en este caso, el estante inferior será el que dé sustento a toda la estructura, de esta manera los dos estantes superiores no deberán, en

conjunto, sobrepasar con su peso y el de los objetos almacenados a la resistencia del mismo.

Si tomamos como referencia a 00, quien como se indicó previamente utiliza un factor de seguridad aproximadamente de 10 para estructuras de cartón sometidas a esfuerzos de compresión y tensión constantes, entonces podemos decir que cada uno de los estantes se encuentra diseñado para ser sometido a una carga de 158,3 kg.

4.4.3 Escritorio

El escritorio tipo C que se ha planteado diseñar en el presente trabajo va a constar de 2 zonas que difieren tanto en su funcionalidad como en los elementos que los conformarán. La primera zona es la de almacenamiento, la cual se ha concebido y será construida con 4 pequeños estantes que vendrán a ser los mismos utilizados para formar toda la estructura del estante de almacenamiento y cuya resistencia mecánica, individual, a la compresión es de 1583 kg en promedio. La segunda zona corresponde a aquella en la que el usuario del mueble podrá acomodarse de manera que sus piernas ingresen debajo del área de trabajo y que, en este caso, se encuentra conformada por una estructura que consta de vigas horizontales apoyadas en los tubos de cartón, dispuestos a manera de columnas.

Cabe mencionar que las vigas seleccionadas para esta zona son aquellas cuyo alto es de 100 mm, es decir, aquellas que tuvieron la mayor resistencia de todas las opciones al soportar 155 kg en promedio en flexión con una carga central. En el diseño planteado, se van a utilizar 4 vigas una tras otra, además cada una de ellas soportada por 2 tubos de cartón cuyos centros se encuentran separados una distancia de 662 mm y que, individualmente, soportan en promedio una carga de 370 kg en compresión y cuyo largo es de 680 mm.

En la figura 114 podemos observar lo descrito previamente acerca del diseño y disposición de los elementos que, unidos, dan forma al escritorio de oficina.

Con el fin de brindarle más rigidez a la estructura y de aprovechar las propiedades del material, tanto las vigas como los 2 estantes laterales serán cortados de forma que sean una sola pieza, lo cual nos permitirá evitar generar conexiones, ya sea mediante adhesivos u otros componentes, entre los dos elementos de la estructura.

Dado que el escritorio consta de dos zonas principales como lo son la zona de trabajo y el bloque de estantes de almacenamiento, cada una de ellas presenta una resistencia diferente, la cual se encuentra relacionada con el tipo de elementos que las conforman. Al existir dos estantes de almacenamiento una tras otro la resistencia del bloque de ellos asciende a un valor de 3 toneladas aproximadamente. Por otro lado, la zona de trabajo consta de 4 vigas, cada una de ellas con una resistencia de 155 kg en flexión y con una carga única en el centro, es decir, esta zona tendría una resistencia máxima de 620 kg.

En consecuencia, la carga que puede soportar el escritorio es la menor de las dos zonas y de esta manera si utilizamos el factor de seguridad que va relacionado con el creep, previamente mencionado, entonces podrá soportar continuamente 62 kg en total.

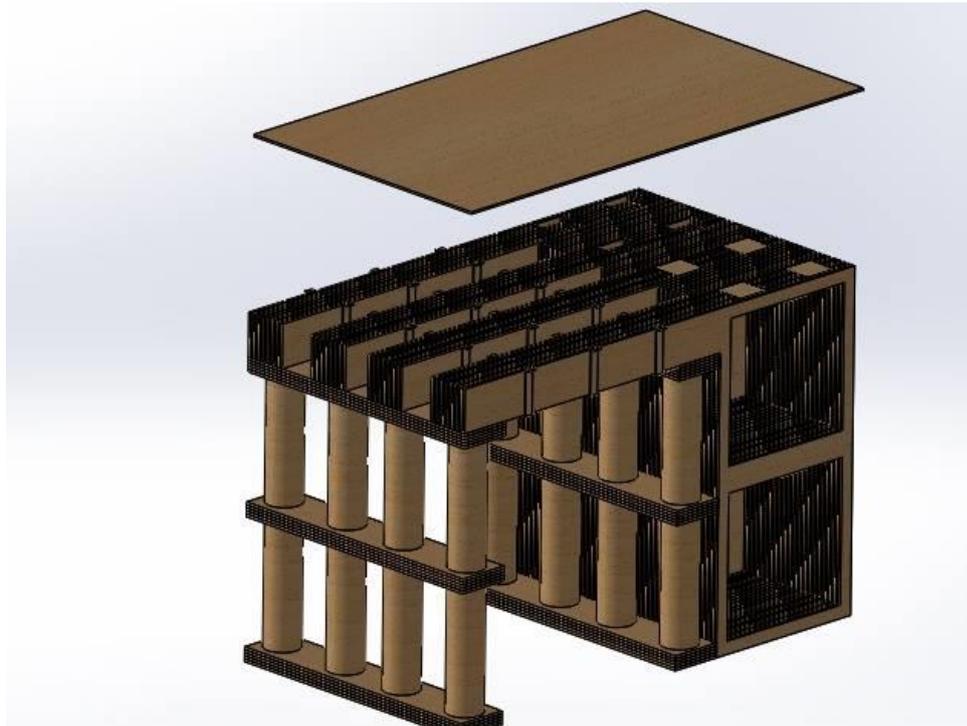


Figura 114 Estructura del Escritorio completa

Para realizar una conexión adecuada entre el tubo y las vigas se ha planteado el desarrollo de piezas con orificios del diámetro de los tubos (ver figura 115) que sean dispuestas una tras otra, 30 en total, hasta formar un elemento de sujeción adecuado. Estas piezas además tendrán la función de mantener unidas las vigas a la distancia adecuada y dar rigidez a toda la estructura.

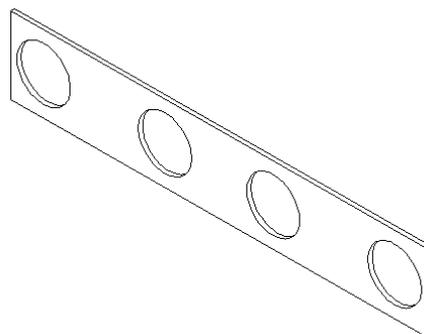


Figura 115 Pieza de unión tubo-vigas en el escritorio de oficina

4.4.4 Zona de aplastamiento de la viga

El tubo de cartón tendrá una placa plástica, de un diámetro igual a 83 mm, en el borde que va a ser conectado con la viga de cartón corrugado para distribuir cualquier esfuerzo al que se pueda encontrar sometido ya que, al ser un tubo hueco, la concentración de esfuerzos que generarían sus bordes en las vigas podrían generar deformaciones permanentes en ellas.

La magnitud de la fuerza de aplastamiento que podrá soportar el cartón corrugado de las vigas en esta zona será calculada a continuación:

Área de aplastamiento:

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$A = \pi \cdot \left(\frac{0.0822}{2}\right)^2$$

$$A = 0.005281 \text{ m}^2$$

Si el espesor del cartón de doble pared es de 6.73 mm en promedio, entonces, podemos sacar una longitud equivalente que nos permita hallar cuanto soporta la zona, al utilizar los resultados de la prueba de compresión de borde sobre el material.

$$L_{eq} = \frac{0.005281}{0.00673}$$

$$L_{eq} = 0.7846 \text{ m}$$

Siendo la resistencia a la compresión de borde:

$$R = 8.512 \frac{kN}{m}$$

La fuerza máxima que la zona podrá soportar será igual a:

$$P = 6.679 \text{ kN}$$

Con ello se concluye que no representa ningún problema el aplastamiento que ejercerán los tubos sobre el cartón corrugado

4.4.5 Selección del tablero

El tablero que se ha procedido a seleccionar, para que forme parte de la estructura del escritorio, es de tipo aglomerado con un recubrimiento decorativo impregnado con resinas melamínicas que soporta el derrame de líquidos de uso común o alimentos y que, además, es recomendado para muebles de uso doméstico e industrial pues posee gran resistencia al rayado. Las propiedades de resistencia a la flexión y densidad del tablero se pueden observar en la tabla 44.

Tabla 44

Características del tablero de aglomerado del escritorio

| | |
|---|-----|
| Espesor (mm) | 9 |
| Densidad (kg / m ³) | 650 |
| Resistencia a la flexión (kgf / cm ²) | 180 |

Dada la ecuación de esfuerzo a la flexión generado por una carga en el centro de una pieza rectangular simplemente apoyada en sus 2 extremos:

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bd^2}$$

Siendo:

σ el esfuerzo a la flexión

l la longitud entre apoyos

b el ancho de la sección rectangular analizada

d el espesor del tablero

Podemos encontrar la fuerza crítica a la que el tablero fallaría si se analiza la sección del mismo que se encontraría a flexión en la zona sin apoyo existente entre las vigas de cartón corrugado.

Despejando tenemos:

$$F = \frac{2\sigma b d^2}{3l}$$

Siendo los valores del espesor “d” igual a 9 mm, la longitud máxima “l” entre apoyos igual a 195 mm, el ancho “b” de la sección igual a 662,2 mm y σ será reemplazado con el valor correspondiente al esfuerzo de flexión máximo que puede soportar el material. Entonces la fuerza máxima que se podrá aplicar, en flexión con carga central, es:

$$F = 366,75 \text{ kgf}$$

Lo cual nos quiere decir que el tablero seleccionado cumple de manera más que satisfactoria, y con la resistencia necesaria, las condiciones para su normal y adecuado funcionamiento.

4.4.6 Unión entre viga y tablón

Una vez escogido el espesor del tablón de mdf necesitamos diseñar la unión entre el tablón con las vigas y estante, para lo cual se plantea una unión con tornillo en espacios cuadrados donde se incrustara un pieza de madera mediante pega como se puede observar en los planos.

Para la unión entre las vigas y el tablón se propone una unión atornillada mediante una pieza en U de aluminio que abrace a la viga, se propone esta unión debido a que el cartón como material no es bueno para soportar uniones donde deba ser perforado. A continuación se diseña la unión como se observa en la figura 116, en la figura 117 podemos observar la pieza lista para ser ensamblada.

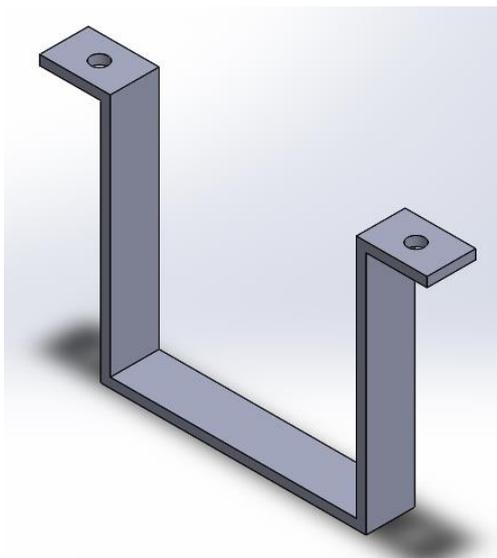


Figura 116 Pieza de Unión



Figura 117 Pieza de Unión

Sabemos que esta unión estará sometida a carga de cizallamiento simple, podemos decir que la carga admisible para simple cizallamiento es la mitad para una de doble cizallamiento cómo se observa en la figura 118 podemos ver las dimensiones recomendadas para ello.

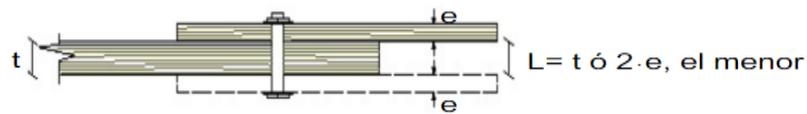


Figura 118

Como sabemos el espesor del tablón L es igual a 9 mm por ende el espesor de la pieza de aluminio será de 4 mm. Para el espaciado entre el borde del perno y el borde de la pieza se recomienda una distancia de $2d$ recomendado en Tabla 12.9 Pág. 12-20 "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino. Se ha escogido como material el aluminio debido a su peso relativamente bajo en comparación del acero pero posee propiedades mecánicas aceptables para el propósito.

Selección del tornillo

El perno para su selección consideramos 4 factores, los cuales son:

- Esfuerzo neto del miembro
- Numero de tornillos que soportaran la carga
- Longitud del tornillo

Sabemos que la longitud del tornillo está dada por:

$$L = Lt + Lpa - 3mm$$

Donde:

Lt es la longitud del tablón es decir 9 mm

Lpa es la longitud de la pieza de aluminio es decir 4.5 mm

Restamos una cantidad de 2 mm debido a que el tornillo no puede atravesar el espesor completo del tablón ya que esto generaría un agujero en el tablón lo cual no es válido para una superficie plana en un escritorio.

Por ende:

$$L = 8mm + 4mm - 2mm = 10 mm$$

Este será la longitud ideal del perno

La carga que recomienda el INEN para cargas laterales al tablón, es decir la carga que los pernos soportaran es de 600 N, se propone un tornillo de 3,5 mm de diámetro externo con la cual tenemos:

El diámetro interno está dado por:

$$\varnothing_{int} = \varnothing_{ext} * 0,95 = 3,32mm$$

$$A = 0,0865 cm^2$$

$$\vartheta = \frac{61,22 Kg}{0,0865 cm^2} = 707,17 Kg/cm^2$$

Pero esta carga deberá ser soportada por 16 tornillos, por ende, cada tornillo debe ser capaz de soportar $44 Kg/cm^2$ por lo que concluimos que un tornillo de 3,5 mm en acero medio de carbono es suficiente, en la figura 119 observamos el dimensionamiento del tornillo a usarse, se considera un tornillo para instalación de correderas.

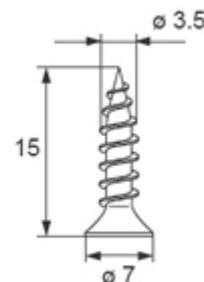


Figura 119 Catalogo tornillos para madera Cymisa

En la figura 120 podemos observar el escritorio en proceso de ensamblado y en la figura 121 el escritorio finalizado.



Figura 120 Escritorio en proceso de ensamble



Figura 121 Escritorio Finalizado

Finalmente en la figura 122 podemos observar el conjunto de los tres mobiliarios finalizados y listos para acoplarse a su uso cotidiano.



Figura 122 Conjunto Finalizado

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se determinaron las propiedades mecánicas del cartón corrugado llevando a cabo diferentes ensayos.

Para ello, inicialmente, se obtuvieron las propiedades de los materiales B125, C200, C250 y DP350 ante esfuerzos de flexión y aplastamiento plano, utilizando la norma ASTM-C93-Standard Test for Flexural Properties of Sandwich Constructions y la norma NTE INEN-ISO 3037 respectivamente; así mismo, se ensayaron probetas de cartón B125 para obtener sus propiedades de tracción respetando la norma NTE INEN-ISO 1924, además se ensayaron en compresión de borde a los cartones tipo C250 y DP350 utilizando la norma NTE INEN-ISO 3037.

Finalmente se procedió a testear diferentes estructuras planteadas para formar parte de los muebles (silla de oficina, escritorio y estante de almacenamiento) y, con todo ello, se concluye que el cartón corrugado es un material con el que, aunque cada lámina individualmente no sea apta para conformar ningún tipo de estructuras, al ser unido con otras más y al tener disposiciones geométricas y formas adecuadas, lograría conformarlas y brindarles una resistencia lo suficientemente elevada como para generar los tipos de muebles presentados en el presente trabajo y otros tipos más como por ejemplo mesas, sofás, etc.

Además, debido a los resultados obtenidos que nos muestran la gran resistencia de las estructuras planteadas con valores en resistencia a la compresión estática de hasta 5 toneladas, podemos decir que este material puede ser utilizado en una multitud de otras

aplicaciones siempre y cuando se planteen diseños adecuados con respecto a sus características y disposiciones más ventajosas.

De las tres técnicas principales que se utilizan en la construcción de estructuras de cartón corrugado: apilamiento, mallado y doblado; se determina que, de entre las dos primeras en mención, la de mayor dificultad por el número de cortes necesarios, costo y la forma de unión de las láminas es la técnica de apilamiento ya que necesita una alta precisión en el corte y en el pegado de unión, a su vez cabe mencionar que es la técnica que más material necesita, sin embargo, una gran ventaja es que mediante ella se pueden generar y construir estructuras más sólidas con incontables formas y geometrías que pudiesen alcanzar una alta resistencia mecánica.

Por otro lado, al realizar estructuras con la técnica de mallado, también se puede lograr que el producto final tenga una alta resistencia, además utilizamos relativamente mucho menos material que la técnica de apilado aunque en el corte se necesita alta precisión en particular en la zona de los ranurados para que no presente problemas la unión de las láminas ni su normal funcionamiento.

La geometría del cartón corrugado, tomando en cuenta la forma de las flautas y el número de éstas y de liners, permite que sea un material con buena resistencia en especial ante dos tipos de cargas, tanto de aplastamiento plano como de compresión de borde, siendo esta última característica la que mejor se puede aprovechar para la construcción de estructuras como muebles puesto que cuando este material se encuentra expuesto a presiones o agresiones mecánicas de impacto en pequeñas áreas, no tiene buena respuesta si la zona que los soporta es la superficie de las láminas puesto que su interior no es sólido y es hueco entre cada cresta de flautas.

5.2. Recomendaciones

Al trabajar con cartón corrugado se recomienda darle cuidados especiales a su manipulación y almacenamiento ya que debe encontrarse en óptimas condiciones para poder formar parte de estructuras como las planteadas; de esta manera, se deberá evitar que las láminas sean colocadas en disposición vertical por tiempo prolongado pues podría deformarlas, se deberán evitar golpes o agresiones de cualquier índole sobre el material, sobre todo en los bordes, y también se deberá cuidar que no sea expuesto a humedades muy altas y contacto con líquidos.

Al conformar mobiliarios con cartón corrugado, desde un punto de vista industrial y comercial, se recomienda optimizar el proceso de conformado de cada una de las láminas a usarse ya que el costo del corte es relativamente elevado cuando se manufacturan pocos ejemplares; de esta manera, en el presente trabajo se construyeron, a penas, un mueble de cada tipo por lo cual el corte y manufactura no solo acarrió gran dificultad sino que además fue relativamente costoso.

En estructuras de cartón corrugado, es importante intentar disminuir, al máximo, el número de uniones que deban hacerse en cuanto a los diferentes elementos que las conformen en aras de que pueda ser más fácil de ensamblar y sea menos propensa a sufrir daños en estas zonas.

Los cortes de las láminas de cartón corrugado se deberán efectuar con una alta precisión para lo cual se recomienda el tipo de corte láser que, además, no daña el material dando un corte limpio y permite disminuir la manipulación del mismo.

Bibliografía

ACCCSA. (2008). *Manual de Elaboración del Cartón Corrugado*.

Recuperado el 06 de mayo de 2016 de Revista Corrugando:

http://www.corrugando.com/index.php?option=com_content&view=article&id=268:iv-fasciculo-manual-de-elaboracion-del-carton-ondulado-el-proceso-de-elaboracion&catid=25:edicion-10&Itemid=18

ACCCSA. (2013). *Métodos e Instrumentos de Prueba para el Cartón*

Corrugado. Recuperado el 06 de mayo de 2016 de Revista

Corrugando:

http://www.corrugando.com/index.php?option=com_content&view=article&id=480

Allaoui, S. (2009). *Effects of the environmental conditions on the mechanical*

behaviour of the corrugated cardboard. Composites Science and

Technology Vol. 69, 104–110.

Amores, B., & Cruz, D. (2008). *Aplicación de data mining para establecer*

patrones de comportamiento de datos meteorológicos para la ciudad

de Quito. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Carton, K. (2012). *Cardboard Furniture*. Atglen, EEUU: Schiffer Publishing.

Cartones América. (s. f.). *Proceso Productivo*. Recuperado el 06 de mayo de

2016, de Cartones América:

<http://www.cartonesamerica.com/proceso-productivo>

Creado en Chile. (s.f.). Lámparas de Cartón Corrugado. Recuperado el 06

de mayo de 2016 de Creado en Chile:

<http://creadoenchile.cl/2015/06/07/lamparas-eh-pale/>

Durance, D. (2009). *Survey of Cardboard Furniture*. Recuperado el 05 de

julio de 2016 de David Durance Design:

http://furnituredesign.biz/index/Articles_files/Cardboard%20typology.pdf

Francis, D. (2002). *Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry*.

Montreal: Pulp and Paper Research Institute of Canada.

Gribbon, H., & Foerster, F. (2008). *Structural Engineering and Design in*

Paper and Cardboard - Approaches and Projects. IOS Press, 95 - 117.

Gutowski, T. (2004). *Design and Manufacturing for the Environment*.

Handbook of Mechanical Engineering. Berlin: Springer-Verlag.

Hahn, E., Carlsson, L., & Westerlind, B. (1992). *Edge-compression Fixture*

for Buckling Studies of Corrugated Board Panels. Experimental Mechanics Vol.32, 252 - 258.

Industrias Omega. (s.f.). Recuperado el 10 de mayo de 2016, de Línea

Kores:

http://www.industriasomega.com/content/section/27/tubos_de_carton

Jambeck, J. R. (2015). *Plastic waste inputs from land into the ocean*. Science

Vol. 347, 768-771.

- Jones, R. (2006). *Buckling of Bars, Plates and Shells*. Virginia, EEUU: Bull Ridge.
- Kamrani, A., & Salhieh, S. (2000). *Product Design for Modularity*. Springer Science & Business Media.
- Onusseit, H. (2003). Tissue world 2003 conference. *Adhesives in tissue paper production: new developments and impact on recycling of production waste*.
- Pérez, G., & Valencia, L. (2013). *Diseño y construcción de una máquina cortadora de planchas cartón para separadores de flores de exportación*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Pinterest. (s.f.). *Pieces of Furniture Made From Cardboard* .Recuperado el 05 de junio de 2016 de Pinterest:
<https://www.pinterest.com/pin/391461392583643399/>
- Pita, C., & Vega, E. (2014). *“Estudio de factibilidad para la puesta en marcha de una empresa que produzca y comercialice papel basado en los desechos vegetales del plátano”*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- SIG. (2008). *Análisis de ciclo de vida de alcance europeo para envases de alimentos de larga duración*. Recuperado el 7 de mayo de 2016 de SIG:
https://www.sig.biz/fileadmin/content/7_Environment/4_LCAs/4_Food/dam/l10n/Quick_guide_of_LCA_Europe_Food_es.pdf

Vitra. (s.f.). *Wiggle Side Chair*. Recuperado el 05 de julio de 2016, de Vitra:

<https://www.vitra.com/en-ch/product/wiggle-side-chair>

wb form. (s.f.). *Shigeru Ban*. Recuperado el 05 de julio de 2016, de wb form:

<http://www.wbform.com/de/designer/shigeru-ban/>

World Economic Forum. (2016). *The New Plastics Economy*. Recuperado el

7 de mayo de 2016 de World Economic Forum:

http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf

Z.Abouira et al. (2004). *Elastic Behavior of Corrugated Cardboard:*

Experiments and Modeling. Composite Structures Vol.63, 53 - 62.

Zwick. (s.f.). *Sistemas de ensayos de materiales de Zwick*. Recuperado el 06

de mayo de 2016 de Zwick:

<http://www.zwick.es/es/aplicaciones/papel/carton-corrugado-y-carton-compacto/ensayodecompresionenplano.html>