



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Cuautla

# **Tecnológico Nacional de México**

## **Instituto Tecnológico de Cuautla**

### **Coordinación de Posgrado**

#### **Diseño digital de material compuesto para empaques de cables ópticos con Análisis de Elemento Finito**

José Alfredo Avendaño Barajas

Tesis para Obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería Administrativa

#### **Comité Tutorial**

*M.A.N. Omar Oswaldo Torres Fernández*

*Director de Tesis*

*Dr. José Gabriel Ayala Landeros*

*Co-Director de Tesis*

*Dra. Mónica Leticia Acosta Miranda*

*M.C. Silvestre Guillermo Puebla Serrano*

*M.C. Julio Pérez Machorro*



*Cuautla, Morelos*

*27 de junio, 2025*



**Instituto Tecnológico de Cuautla**  
Subdirección Académica  
Coordinación de posgrado e investigación

Cuautla, Morelos, **27/junio/2025**  
Oficio No. ITC-SA-CPI/051/2025

**ASUNTO: Autorización de impresión**

**C. JOSÉ ALFREDO AVENDAÑO BARAJAS**  
**PRESENTE**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Administrativa, se acordó autorizar la impresión de su trabajo de Tesis titulado:

**"DISEÑO DIGITAL DE MATERIAL COMPUESTO PARA EMPAQUES DE CABLES ÓPTICOS CON ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO."**

Es muy satisfactorio para la Coordinación de Posgrado compartir con usted el logro de esta meta.

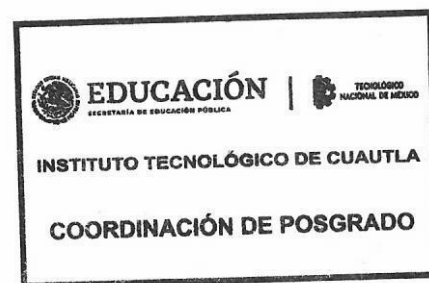
Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de nuestro país.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*

*En su ideal de Servicio reside la grandeza del hombre®*

  
**OSCAR JIMÉNEZ ESTEVÉZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



Ccp: archivo  
OJE/rbcc/ebt\*



**2025**  
Año de  
**La Mujer**  
**Indígena**

Libramiento Cuautla-Oaxaca S/N, Col. Juan Morales,  
C.P. 62826, Yecapixtla, Morelos. Telefonos: 7351222242/7353536496  
e-mail: [cyd\\_cuautla@tecnm.mx](mailto:cyd_cuautla@tecnm.mx) | [comunicacion@cuautla.tecnm.mx](mailto:comunicacion@cuautla.tecnm.mx)  
[www.cuautla.tecnm.mx](http://www.cuautla.tecnm.mx)





**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



**Instituto Tecnológico de Cuautla**  
Subdirección Académica  
Coordinación de posgrado e investigación

Cuautla, Morelos, 27/junio/2025  
Oficio No. ITC-SA-CPI/50/2025

El presente trabajo de Tesis "**DISEÑO DIGITAL DE MATERIAL COMPUESTO PARA EMPAQUES DE CABLES ÓPTICOS CON ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO**", presentado por el **C. JOSÉ ALFREDO AVENDAÑO BARAJAS**, con número de control **M21680024**, ha sido aprobado por su comité tutorial como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA ADMINISTRATIVA**

Director(a) de Tesis

M.A.N. OMAR OSWALDO TORRES FERNÁNDEZ

Secretaria (o)

DRA MÓNICA LETICIA ACOSTA MIRANDA

Vocal

M.C. SILVESTRE GUILLERMO PUEBLA SERRANO

Vocal Suplente

M.C. JULIO PÉREZ MACHORRO



**2025**  
Año de  
**La Mujer  
Indígena**

Libramiento Cuautla-Oaxaca S/N, Col. Juan Morales,  
C.P. 62826, Yecapixtla, Morelos. Telefonos: 735122242/7353536496  
e-mail: [cyd\\_cuautla@tecnm.mx](mailto:cyd_cuautla@tecnm.mx) | [comunicacion@cuautla.tecnm.mx](mailto:comunicacion@cuautla.tecnm.mx)  
[www.cuautla.tecnm.mx](http://www.cuautla.tecnm.mx)



**LICENCIA DE USO OTORGADA POR** José Alfredo Avendaño Barajas, de nacionalidad mexicana mayor de edad, con domicilio ubicado en Calz. del Bosque 15, Fracc. Quintas de Guadalupe, 76806. San Juan del Río, Querétaro, en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada: Diseño digital de material compuesto para empaques de cables ópticos con Análisis de Elemento Finito, en adelante "**LA OBRA**" quien para todos los fines del presente documento se denominará "**EL AUTOR Y/O EL TITULAR**", a favor del Instituto Tecnológico de Cuautla del Tecnológico Nacional de México, la cual se registrá por las cláusulas siguientes:

**PRIMERA - OBJETO:** "**EL AUTOR Y/O TITULAR**", mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de Cuautla del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de "**LA OBRA**", para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

**SEGUNDA - TERRITORIO:** La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

**TERCERA - ALCANCE:** La presente licencia contempla la autorización para formato uso de "**LA OBRA**" en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse.

**CUARTA - EXCLUSIVIDAD:** La presente licencia no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico de Cuautla; por lo tanto, "**EL AUTOR Y/O TITULAR**" conserva los derechos patrimoniales y morales de "**LA OBRA**", objeto del presente documento.

**QUINTA - CRÉDITOS:** El Instituto Tecnológico de Cuautla y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el "**AUTOR Y/O TITULAR**" es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre "**LA OBRA**"; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

**SEXTA - AUTORÍA:** "**EL AUTOR Y/O TITULAR**" manifiesta ser el único titular del único titular de los derechos de autor que derivan de "**LA OBRA**" y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable. Dado en la Ciudad de Cuautla, Morelos, a los 30 días del mes de junio de 2025.

"**EL AUTOR Y/O TITULAR**"



## DEDICATORIA

A mis hijas, por su amor, paciencia y entusiasmo diario. A mi padre<sup>f</sup>, madre y hermanos y familiares, por su apoyo y aliento. A todos por su cariño, consejo y empeño transmitido.

A mis profesores, agradezco su orientación y el acervo de conocimientos que compartieron conmigo ya que, sin su apoyo, me hubiera resultado imposible conseguir esta importante aspiración académica.

Y mis amigos de toda la vida que, sin conocer los detalles de este proyecto, siempre tuvieron confianza en mí y creyeron que lo concluiría satisfactoriamente.

Gracias.

## **AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES**

Agradezco profundamente la oportunidad que me brindó el Instituto Tecnológico de México, de cursar esta Maestría, pues el desarrollo académico y personal alcanzado fue enriquecedor y plagado de experiencias motivantes que reavivaron mi gusto por el estudio y la excelencia personal y laboral, además de brindarme un cúmulo de conocimientos útiles para mi trabajo y para la vida diaria.

También quiero expresar mi agradecimiento al M.A.N. Omar Oswaldo Torres Fernández y al Dr. José Gabriel Ayala Landeros, por su gran apoyo, orientación y paciencia durante la gestión de esta tesis y también en su labor de profesores.

Del mismo modo, agradezco infinitamente a mis profesores: Dra. Armida González Lorence, al Dr. Ángel Custodio Navarrete, al M.C. J. Emigdio Soto Osornio y al M.C. Guillermo Puebla Serrano, quienes me instruyeron con gran profesionalismo y excelencia docente, además de un trato siempre respetuoso, amable y comprometido con la enseñanza.

Finalmente, agradezco a mis compañeros de clases por su apoyo y esmero en aportar, además de ser un referente de esfuerzo para continuar hasta el final este maravilloso objetivo académico. Gracias por su amistad.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

## Tabla de contenido

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ÍNDICE DE CONTENIDO .....                                                                                                                  | 7  |
| ÍNDICE DE IMÁGENES. TABLAS, GRÁFICOS Y CUADROS .....                                                                                       | 13 |
| LISTADO DE SIGLAS .....                                                                                                                    | 19 |
| RESUMEN .....                                                                                                                              | 20 |
| INTRODUCCIÓN.....                                                                                                                          | 21 |
| 1.1 Resistencia mecánica y composición de maderas amazónicas y locales .....                                                               | 26 |
| 1.2 Resina de fenol formaldehído con nanocelulosa reforzada.....                                                                           | 28 |
| 1.3 Efecto del tratamiento térmico de las fibras de la madera en las propiedades de prensado plano de compuestos de madera y plástico..... | 30 |
| 1.4 Formado de perfiles a partir de preformas de fibras de madera prensadas .....                                                          | 31 |
| 1.5 Estudio paramétrico para minimizar el encogimiento del acanalado en laminados de madera.....                                           | 33 |
| 1.6 Propiedades mecánicas de la madera comprimida .....                                                                                    | 35 |
| 1.7 Impacto socio económico de la pandemia de COVID-19: Implicaciones para la posible degradación forestal.....                            | 37 |
| 1.8 Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para tableros y productos de madera Particulada .....                                    | 40 |
| 1.9 Utilización de Tecnologías de la Información para el diseño de empaques de madera y su evaluación mecánica digitalmente. ....          | 41 |
| CAPÍTULO II. MARCO HISTÓRICO – CONTEXTUAL .....                                                                                            | 44 |
| 2.1 México entra al grupo de los 10, más deforestados en el mundo .....                                                                    | 45 |
| 2.2 Desarrollo de carretes con materiales alternativos a la madera.....                                                                    | 45 |
| 2.3 Diseño general de un carrete para empaque de cables ópticos .....                                                                      | 46 |
| 2.4 Banco de Indicadores.....                                                                                                              | 47 |
| CAPÍTULO III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                                                                             | 51 |

|                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Justificación.....                                                                                                                                                                          | 55 |
| 3.1.1 Social.....                                                                                                                                                                               | 57 |
| 3.1.2 Teórica.....                                                                                                                                                                              | 57 |
| 3.1.3 Metodológica .....                                                                                                                                                                        | 58 |
| 3.1.4 Institucional.....                                                                                                                                                                        | 58 |
| 3.1.5 Personal y profesional:.....                                                                                                                                                              | 58 |
| 3.2 Objetivo General .....                                                                                                                                                                      | 59 |
| 3.2.1 Pregunta Central de investigación .....                                                                                                                                                   | 59 |
| 3.3 Variables de investigación.....                                                                                                                                                             | 59 |
| 3.3.1 Variables Independientes .....                                                                                                                                                            | 60 |
| 3.3.2 Variables Dependientes.....                                                                                                                                                               | 60 |
| 3.4 Hipótesis central de investigación .....                                                                                                                                                    | 61 |
| 3.5 Objetivos Específicos .....                                                                                                                                                                 | 61 |
| 3.5.1 Preguntas Secundarias de Investigación .....                                                                                                                                              | 62 |
| 3.5.2 Supuestos Teóricos Secundarios de Investigación.....                                                                                                                                      | 62 |
| 3.5.2.1 Hipótesis central .....                                                                                                                                                                 | 62 |
| 3.5.2.2 ¿Se pueden representar o simular en el software SOLIDWORKS® (DSW), todas las características constitutivas y mecánicas de la madera sólida y compuesta?.....                            | 63 |
| 3.5.2.3 ¿Es posible representar digitalmente en SOLIDWORKS® (DSW), la resistencia a los esfuerzos mecánicos de un material particulado de madera, dentro de una matriz de adhesivos? .....      | 63 |
| 3.5.2.4 ¿Es posible programar los parámetros necesarios en DSW, para que, a través del Análisis de Elemento Finito (AEF), se genere un modelo digital de una probeta de madera compuesta? ..... | 63 |
| 3.5.2.5 ¿Qué estructura deberá tener la probeta digital, para simular a la madera compuesta? .....                                                                                              | 64 |

|                     |                                                                                                                                                             |           |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.2.6             | ¿Cómo se pueden interpretar los resultados de la simulación digital del AEF del modelo de madera compuesta, comparados con la madera virgen o el MDF? ..... | 64        |
| 3.5.2.7             | ¿Existe un beneficio económico en la simulación y evaluación digital, comparativamente con las pruebas físicas? .....                                       | 64        |
| 3.5.2.8             | ¿Es posible utilizar en todas las plantas filiales de Condumex, este modelo de simulación digital para el diseño de materiales de empaque?.....             | 65        |
| 3.6                 | Alcances y Limitaciones .....                                                                                                                               | 65        |
| 3.6.1               | Recursos Materiales .....                                                                                                                                   | 65        |
| 3.6.2               | Recursos Financieros .....                                                                                                                                  | 66        |
| 3.6.3               | Acceso a la información .....                                                                                                                               | 66        |
| 3.6.4               | Permisos.....                                                                                                                                               | 66        |
| 3.6.5               | Limitaciones de la investigación.....                                                                                                                       | 66        |
| <b>CAPÍTULO IV.</b> | <b>MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL .....</b>                                                                                                                       | <b>68</b> |
| 4.1                 | Generalidades de la madera y su importancia en industria de las telecomunicaciones                                                                          | 68        |
| 4.1.1               | Ecosistemas Forestales y desabasto de maderables en la industria.....                                                                                       | 69        |
| 4.1.2               | Calidad de maderables en la industria .....                                                                                                                 | 71        |
| 4.2                 | Materiales sustitutos de la madera sólida.....                                                                                                              | 72        |
| 4.2.1               | Generalidades del MDF o Aglomerados de madera.....                                                                                                          | 72        |
| 4.2.2               | Características de otras maderas comprimidas .....                                                                                                          | 73        |
| 4.2.3               | Materiales compuestos (maderas compuestas) .....                                                                                                            | 76        |
| 4.2.3.1             | MDF con Nano Wollastonita.....                                                                                                                              | 77        |
| 4.2.3.2             | MDF con polipropileno en polvo (PP).....                                                                                                                    | 78        |
| 4.2.4               | Procesos industriales para fabricar maderas comprimidas .....                                                                                               | 78        |
| 4.2.5               | Análisis de adhesivos para maderas comprimidas.....                                                                                                         | 80        |
| 4.3                 | Responsabilidad Social y Ambiental.....                                                                                                                     | 80        |
| 4.4                 | Activos involucrados en el desarrollo del modelado virtual .....                                                                                            | 81        |
| 4.4.1               | Activos .....                                                                                                                                               | 82        |

|                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5 Estudio de la resistencia mecánica de la madera .....                          | 83         |
| 4.5.1 Características mecánicas de la madera .....                                 | 83         |
| 4.5.2 Características anisotrópicas de la madera.....                              | 84         |
| 4.6 Análisis matemático del esfuerzo en superficies.....                           | 88         |
| 4.6.1 Análisis del comportamiento elástico-lineal de sistemas continuos .....      | 89         |
| 4.6.2 Funciones de interpolación .....                                             | 93         |
| 4.6.2.1 Relaciones de Tensión y Deformación en los Elementos.....                  | 100        |
| 4.6.2.2 Interpolación rectangular.....                                             | 102        |
| 4.6.3 Tipos de Elementos .....                                                     | 104        |
| 4.6.3.1 Elementos de prisma rectangular.....                                       | 105        |
| 4.6.3.2 Elementos de ocho nodos.....                                               | 105        |
| 4.6.3.3 Elemento tetraédrico cuadrático de diez nodos.....                         | 107        |
| 4.6.4 Funciones tridimensionales.....                                              | 108        |
| 4.6.4.1 Interpolación Isoparamétrica.....                                          | 109        |
| 4.7. Elasticidad tridimensional .....                                              | 113        |
| 4.8. Cálculo de Esfuerzos Principales .....                                        | 115        |
| 4.8.1 El Círculo de Mohr .....                                                     | 116        |
| 4.8.2 Procedimiento de Trazo del Circulo de Mohr .....                             | 117        |
| 4.8.3 Orientación de las direcciones principales de tensión.....                   | 120        |
| 4.9 El MEF y el equipo de cómputo para su desarrollo .....                         | 121        |
| 4.9.1 Uso de equipos de cómputo en el análisis numérico de elementos finitos ..... | 122        |
| <b>CAPÍTULO V. METODOLOGÍA .....</b>                                               | <b>129</b> |
| 5.1 Tipo de Estudio .....                                                          | 131        |
| 5.1.1 Diseño de Investigación .....                                                | 131        |
| 5.2 Sujetos de Estudio o población .....                                           | 132        |
| 5.3 Muestra .....                                                                  | 133        |

|                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4 Instrumento de recolección de datos .....                       | 134        |
| 5.5 Instrumento de análisis de datos .....                          | 135        |
| <b>CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE DATOS .....</b>                         | <b>136</b> |
| 6.1 Procedimiento .....                                             | 136        |
| 6.1.1 Paso 1. Diseño del modelo CAD .....                           | 136        |
| 6.1.2 Paso 2. Definición de parámetros en DSW .....                 | 139        |
| 6.1.3 Paso 3. Creación del estudio Estático .....                   | 140        |
| 6.1.4 Paso 4. Asignación de materiales .....                        | 141        |
| 6.1.5 Paso 5. Definición de Conexiones entre las sub unidades ..... | 143        |
| 6.1.6 Paso 6. Aplicación de sujeciones .....                        | 143        |
| 6.1.7 Paso 7. Aplicación de cargas (fuerzas) .....                  | 144        |
| 6.1.8 Paso 8. Mallado del cuerpo de estudio .....                   | 145        |
| 6.1.9 Paso 9. Ejecución del análisis .....                          | 147        |
| 6.1.10 Paso 10. Visualización de los resultados .....               | 149        |
| 6.2 Resultados .....                                                | 151        |
| 6.2.1 Tensiones de von Mises .....                                  | 151        |
| 6.2.2 Desplazamientos (URES) .....                                  | 153        |
| 6.2.3 Deformaciones Unitarias (ESTRN).....                          | 155        |
| 6.2.4 Factor de Seguridad .....                                     | 156        |
| 6.3 Análisis de resultados.....                                     | 158        |
| 6.3.1 Tensiones o valores de von Mises .....                        | 158        |
| 6.3.2 Desplazamientos (URES) .....                                  | 160        |
| 6.3.3 Deformaciones Unitarias (ESTRN).....                          | 162        |
| 6.3.4 Factor de Seguridad (FDS) .....                               | 164        |
| 6.4 Hallazgos .....                                                 | 167        |
| 6.4.1 Datos Objetivos.....                                          | 167        |

|                                                          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| 6.4.2 Porcentajes de esfuerzos a diferentes cargas.....  | 168        |
| 6.5 Comprobación de la hipótesis .....                   | 170        |
| <b>CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b> | <b>172</b> |
| 7.1 Conclusiones.....                                    | 172        |
| 7.2 Recomendaciones.....                                 | 173        |
| <b>CAPÍTULO VIII: PROPUESTA .....</b>                    | <b>174</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                | <b>177</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>                                       | <b>187</b> |

# ÍNDICE DE IMÁGENES. TABLAS, GRÁFICOS Y CUADROS

## FIGURAS.

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Área de Embarques, Planta CONDUMEX. San Juan del Río .....                                                     | 21 |
| Figura 2. Doblez en V en láminas de madera prensada .....                                                                | 29 |
| Figura 3. Ilustración del efecto de apertura Spring-Back (SB) y de la contracción Spring-Forward (SF) en laminados ..... | 30 |
| Figura 4. Representación esquemática de Doblez en cuatro puntos aparejados .....                                         | 31 |
| Figura 5. Imágenes de cortes en pruebas de Compresión en muestras de Abeto .....                                         | 33 |
| Figura 6. Venta ilegal de madera en Indonesia .....                                                                      | 36 |
| Figura 7. Diagrama de los Pilares de la Industria 4.0 .....                                                              | 39 |
| Figura 8. Carretes de MDF con cables de Acometida Óptico .....                                                           | 42 |
| Figura 9. Banco de indicadores de Geografía y Medio Ambiente del INEGI .....                                             | 45 |
| Figura 10. Indicadores de la Biomasa Forestal en México .....                                                            | 45 |
| Figura 11. Indicadores de Costos por agotamiento/PIB de Recursos Forestales .....                                        | 46 |
| Figura 12. Cables de Fibras Ópticas en carretes de madera .....                                                          | 48 |
| Figura 13. Diagrama global de los Ecosistemas Forestales .....                                                           | 67 |
| Figura 14. Tarimas con hongos .....                                                                                      | 68 |
| Figura 15. Carrete con brida con falla estructural .....                                                                 | 68 |
| Figura 16. Hoja de MDF comercial .....                                                                                   | 70 |
| Figura 17. Maderas aglomeradas .....                                                                                     | 71 |
| Figura 18. Maderas comprimidas .....                                                                                     | 71 |
| Figura 19. Ciclo de vida de los tableros de MDP .....                                                                    | 72 |
| Figura 20. Proceso de fabricación de tableros MDP .....                                                                  | 73 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 21. Placa de MDF con NW, antes de la compresión .....                    | 74  |
| Figura 22. <i>Apariencia superficial de Madera Comprimida</i> .....             | 76  |
| Figura 23. Gráfica de carga vs deformación general de la madera .....           | 80  |
| Figura 24. Gráfica de carga vs deformación general de la madera .....           | 82  |
| Figura 25. Resistencia de la madera al esfuerzo cortante y plano paralelo ..... | 83  |
| Figura 26. Estructura reticular Discreta y estructura Continua .....            | 86  |
| Figura 27. Elementos para estudio de Elasticidad Unidimensional .....           | 87  |
| Figura 28. Elementos para estudio de Elasticidad Bidimensional .....            | 88  |
| Figura 29. Elementos para estudio de Elasticidad Tridimensional .....           | 88  |
| Figura 30. Elemento tipo Viga .....                                             | 89  |
| Figura 31. Elemento cáscara curva .....                                         | 89  |
| Figura 32. Elemento de coordenadas locales o de longitud .....                  | 90  |
| Figura 33. Deformaciones en un elemento finito .....                            | 91  |
| Figura 34. Figura de función de interpolación .....                             | 89  |
| Figura 35. Paralelepípedo elemental .....                                       | 93  |
| Figura 36. Equilibrio de fuerzas en elasticidad unidimensional .....            | 94  |
| Figura 37. Equilibrio de fuerzas en elasticidad bidimensional .....             | 95  |
| Figura 38. Interpolación de Elemento Triangular .....                           | 98  |
| Figura 39. Deformaciones en un elemento finito .....                            | 100 |
| Figura 40. Coordenadas locales normalizadas en el espacio .....                 | 102 |
| Figura 41. Elemento plano de ocho nodos .....                                   | 103 |
| Figura 42. Elemento tridimensional o prisma de ocho nodos .....                 | 103 |
| Figura 43. Elemento tetraédrico de 10 nodos .....                               | 104 |
| Figura 44. Elemento tridimensional con $n$ nodos .....                          | 105 |
| Figura 45. Análisis de Vasija de presión de un reactor nuclear .....            | 109 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 46. Convergencia de la deformación al refinar la malla .....                 | 110 |
| Figura 47. Deformación Unitaria en elemento tridimensional .....                    | 111 |
| Figura 48. Deformaciones en un elemento finito .....                                | 111 |
| Figura 49. Estado de esfuerzos en un punto P, Círculo de Mohr .....                 | 114 |
| Figura 50. Criterio de signos de los esfuerzos .....                                | 115 |
| Figura 51. Puntos de referencia x en y, en el Círculo de Mohr .....                 | 116 |
| Figura 52. Círculo de Mohr y sus vectores .....                                     | 116 |
| Figura 53. Direcciones principales en gráfico de Mohr .....                         | 117 |
| Figura 54. Planos de Tensión tangencial máxima de Mohr .....                        | 118 |
| Figura 55. Grietas presentadas por zonas, de probetas de maderas con adhesivo ..... | 120 |
| Figura 56. Datos de entrada y simulación digital del escaneo láser .....            | 121 |
| Figura 57. Propiedad ortotrópica de la madera en sus 3 ejes .....                   | 122 |
| Figura 58. Esquema del algoritmo para la simulación 3D con EF.....                  | 123 |
| Figura 59. Simulación digital de Madera y Nudo en probeta .....                     | 124 |
| Figura 60. Idealización de un nudo en muestra de madera .....                       | 124 |
| Figura 61. Etapas del Proceso de Simulación Digital .....                           | 126 |
| Figura 62. Preparación de la geometría para el AEF.....                             | 127 |
| Figura 63. Construcción general de carrete o bobina de empaque para cables .....    | 131 |
| Figura 64. Diseño de fibra de madera en SOLIDWORKS.....                             | 133 |
| Figura 65. Ensamble de resina (epoxi) para cada fibra de madera .....               | 134 |
| Figura 66. Vista alámbrica de estructura fibra-resina .....                         | 134 |
| Figura 67. Estructura individual Fibra de Madera-Resina Epoxi .....                 | 135 |
| Figura 68. Tapas para los extremos de estructuras individuales .....                | 135 |
| Figura 69. Ensamble completo de Probeta para pruebas de EF.....                     | 136 |
| Figura 70. Selección del Complemento de Simulación en DSW .....                     | 136 |

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 71. Configuración de Unidades .....                                | 137 |
| Figura 72. Generación de nuevo Estudio .....                              | 138 |
| Figura 73. Configuración de Materiales .....                              | 138 |
| Figura 74. Propiedades de las fibras de refuerzo (madera balsa) .....     | 139 |
| Figura 75. Propiedades de la matriz de resina (Epoxi sin carga) .....     | 139 |
| Figura 76. Definición de conexiones entre componentes de la probeta ..... | 140 |
| Figura 77. Aplicación de sujeciones .....                                 | 141 |
| Figura 78. Representación de la aplicación de fuerzas en la probeta ..... | 142 |
| Figura 79. Generación de la malla .....                                   | 143 |
| Figura 80. Condiciones del mallado .....                                  | 143 |
| Figura 81. Representación gráfica del Mallado de elemento sólido .....    | 143 |
| Figura 82. Detalles de la malla .....                                     | 144 |
| Figura 83. Orden de Ejecución de Estudio .....                            | 144 |
| Figura 84. Definición de los resultados requeridos .....                  | 145 |
| Figura 85. Configuración del Factor de Seguridad .....                    | 145 |
| Figura 86. Resultados solicitados al estudio .....                        | 146 |
| Figura 87. Configuración de las opciones de visualización .....           | 147 |
| Figura 88. Carga aplicada de 50 kgf, Tensión de von Mises .....           | 148 |
| Figura 89. Carga aplicada de 100 kgf, Tensión de von Mises .....          | 149 |
| Figura 90. Carga aplicada de 150 kgf, Tensión de von Mises .....          | 149 |
| Figura 91. Carga aplicada de 50 kgf, Desplazamiento (URES) .....          | 150 |
| Figura 92. Carga aplicada de 100 kgf, Desplazamiento (URES) .....         | 151 |
| Figura 93. Carga aplicada de 150 kgf, Desplazamiento (URES) .....         | 151 |
| Figura 94. Carga aplicada de 50 kgf, Deformación Unitaria (ESTRN) .....   | 152 |
| Figura 95. Carga aplicada de 100 kgf, Deformación Unitaria (ESTRN).....   | 152 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 96. Carga aplicada de 150 kgf, Deformación Unitaria (ESTRN) .....                    | 153 |
| Figura 97. Carga aplicada de 50 kgf, Factor de Seguridad .....                              | 153 |
| Figura 98. Carga aplicada de 100 kgf, Factor de Seguridad .....                             | 154 |
| Figura 99. Carga aplicada de 150 kgf, Factor de Seguridad .....                             | 154 |
| Figura 100. Desplazamiento o Deformación Unitaria Real .....                                | 157 |
| Figura 101. Deformación Unitaria ESTRN .....                                                | 159 |
| Figura 102. Deformación Unitaria .....                                                      | 160 |
| Figura 103. Código de colores para indicar FDS en AEF .....                                 | 163 |
| Figura 104. Gráficas de Estudios de tensión en SOLIDWORKS .....                             | 165 |
| Figura 105a. Protocolo de prueba de Resistencia a la Tensión de MDF .....                   | 166 |
| Figura 105b. Gráfica de esfuerzo a la Tensión a MDF.....                                    | 166 |
| Figura 106. Protocolo de prueba de Tensión a duela de pino .....                            | 167 |
| Figura 107. Cotización de software DMD con las utilerías de AEF.....                        | 171 |
| Figura 108. Ejemplo de recuperación de inversión al emplear digitalización de procesos .... | 172 |

## TABLAS

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1. Resultados para los módulos de ruptura del Eucalyptus camaldulensis .....                    | 23  |
| Tabla 2. Criterios de clasificación para las características mecánicas de maderas mexicanas.<br>..... | 24  |
| Tabla 3. Resultados de Nanocelulosa vs viscosidad en adhesivo .....                                   | 26  |
| Tabla 4. Precios y tiempos de desarrollo de Prototipos de carretes, octubre 2023 .....                | 51  |
| Tabla 5. Universo de códigos de carretes a desarrollar .....                                          | 130 |
| Tabla 6. Tabla de Resultados de SOLIDWORKS, para las diferentes Cargas de estudio ....                | 155 |
| Tabla 7. Análisis de Tensiones de von Mises y Factor de Seguridad .....                               | 156 |
| Tabla 8. Análisis de Desplazamientos (URES) .....                                                     | 158 |

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 9. Análisis de Deformaciones Unitarias (ESTRN) .....                   | 161 |
| Tabla 10. Análisis de Factor de Seguridad (FDS) .....                        | 162 |
| Tabla 11. Tabla de datos finales del análisis del CEF en SOLIDWORKS .....    | 164 |
| Tabla 12. Resultados de CEF & Protocolo de Prueba Mecánicas Físicas CX ..... | 168 |

## LISTADO DE SIGLAS

| Siglas   | Significado                                                               |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|
| AEF      | Análisis de Elemento Finito                                               |
| CAD      | Diseño o Modelado Asistido por Computadora                                |
| CX       | Empresa CONDUMEX S.A. DE C.V.                                             |
| CW       | Maderas Comprimidas                                                       |
| DSW      | Diseño SOLIDWORKS (software)                                              |
| EF       | Elemento Finito                                                           |
| ESR      | Empresa Socialmente Responsable                                           |
| FAO      | Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación |
| FO       | Fibras Ópticas                                                            |
| FRA      | Evaluación de los Recursos Forestales                                     |
| HDPE     | Polietileno de alta densidad                                              |
| INEGI    | Instituto Nacional de Estadística y Geografía                             |
| I4.0     | Industria 4.0                                                             |
| LAN      | Red de área Local                                                         |
| MDF      | Tableros de Fibra de Media Densidad                                       |
| MDP      | Fibra de Media Densidad Particulada                                       |
| PP       | Polipropileno                                                             |
| SAGARPA  | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Mx.)                        |
| SEMARNAT | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Mx.)                   |
| SYMIX    | Sistema de Manufactura Integral SyteLine (Condumex)                       |

# RESUMEN

El constante avance tecnológico en todos los aspectos de la Industria, exige el empleo de herramientas modernas de análisis, diseño y simulación digital para la optimización de sus recursos, la agilización en la elaboración y prueba de sus productos, así como el desarrollo de nuevos elementos que aporten características de mejora en la calidad y la competitividad de manera integral. En este trabajo de investigación se presenta la manera en la que, a través de la Simulación Digital, se analiza el diseño estructural de materiales maderables, y se obtiene una propuesta de material alternativo para la fabricación de los carretes, que son empleados como empaque para los cables de fibras ópticas de la empresa Condumex; pues debido a la creciente deforestación global, la madera con la que se han elaborado estos carretes por más de tres décadas, es cada vez más costosa y difícil de adquirir.

Se consiguen resultados satisfactorios en Simulación Digital que proponen un material derivado de virutas de madera en una matriz estructural de que representaría a los adhesivos; y con ello, estaríamos utilizando residuos maderables con mayor circularidad y fácil adquisición en el mercado; lo que reduce el costo de los empaques, disminuyendo el consumo de maderas vírgenes en la elaboración de los mismos, y como resultado, aumenta la disponibilidad y facilita su fabricación a precios competitivos.

Queda como parte de un proyecto posterior, la elaboración a escala industrial de dicho material obtenido en esta investigación, con la finalidad de implementarlo como una alternativa sustentable, más económico y con menor impacto ambiental para la fabricación de empaques de los cables de fibras ópticas de Condumex.

**Palabras Clave:** *Simulación digital, eficiencia, maderables, circularidad, económico, sustentable.*

# INTRODUCCIÓN

La industria de las Telecomunicaciones ha ido fortaleciéndose al mismo tiempo que la tecnología, y éstas se acompañan de dispositivos electrónicos cada vez más sofisticados y Tecnologías de la Información cada vez más potentes; lo que permiten realizar evaluaciones y simulación de nuevos procesos y materiales sin la necesidad de gastar en recursos físicos o materias primas de prueba. En este proyecto de investigación se desarrolla un material alternativo a la madera sólida o virgen empleada para la elaboración de los empaques de los productos de Condumex, a través de Simulación Digital; con la finalidad de reducir la dependencia actual de los recursos maderables de primera mano y conseguir empaques funcionales y económicos al reducir el uso de madera virgen, sin afectar la calidad en el embalaje que asegure la manipulación y el envío de los productos a los clientes.

En el Capítulo I, se muestran los datos referenciales que dan origen al desarrollo del proyecto de esta tesis, y al mismo tiempo se definen artículos de referencia que dan pie al desarrollo de este proyecto de investigación.

En el Capítulo II, se expresa una reseña temporal del problema a resolver hasta la actualidad y dónde se lleva a cabo el desarrollo de esta investigación.

En el Capítulo III, se detalla el problema a resolver, exponiendo las limitantes que presenta la investigación y la justificación del por qué se considera un problema; se fundan el objetivo general y los específicos, la hipótesis, la pregunta central de esta investigación y los alcances y limitaciones definidas.

En el Capítulo IV, se definen las características mecánicas y constructivas de interés para simulación digital del material a desarrollar, además de presentarse las limitantes del software para la obtención de características mecánicas actualmente obtenidas de las muestras de madera sólida, físicamente en el laboratorio de materias primas de Condumex, planta San Juan del Río.

En el Capítulo V, se presenta la metodología y el diseño experimental, así como el alcance de la investigación. Ya que los volúmenes de los insumos (empaques y materias primas) se rigen

de acuerdo a pronósticos de ventas (presupuesto anual); el avance e implementación, se programa de acuerdo a exigencias y disponibilidades inter plantas de Grupo Condumex.

En el Capítulo VI, se define el procedimiento para el análisis de los datos obtenidos y el estudio de los resultados, evaluados contra los objetivos. Lo anterior con el apoyo de software estadístico y tomando en cuenta el acervo de información respecto a consumo de materiales y gestión de ventas y pruebas de laboratorio de Condumex.

En el Capítulo VII, se expresan conclusiones de la investigación y se definen algunas recomendaciones obtenidas después de analizar los resultados y expectativas.

En el Capítulo VIII, se enuncia propuesta para la adquisición del paquete más completo de Análisis de Elemento Finito del Software SOLIDWORKS®, con la finalidad del desarrollo físico experimental del material a nivel pre-industrial en un proyecto posterior; para corroborar que la simulación digital, mostrada en esta investigación, es factible, confiable, efectiva y redituable económicamente.

## CAPÍTULO I: ANTECEDENTES (o Estado del Arte)

La comunicación entre las personas ha sido siempre una herramienta imprescindible y de gran relevancia para su vida en sociedad y fortalecer la característica gregaria como seres humanos. Por ello, desde el comienzo de la Revolución Industrial en el mundo, las Telecomunicaciones han ido de la mano con el desarrollo, de la producción de bienes y servicios, de la cultura, la educación y de la sociedad en todos sus ámbitos. Fue así, como la ciencia y la tecnología deciden unir esfuerzos a principios del siglo XXI para dar un empuje coordinado y lograr mayor impulso a la industria; surgiendo de esta manera, la tecnociencia (Pascual Trillo, 2011). Esto trajo de manera casi inmediata, la globalización económica, el bienestar social y al mismo tiempo, innovadoras formas de intercambiar información en mayor cantidad y a mayores distancias, lo que fomentó el auge de las telecomunicaciones.

Hoy día, no se podría atender la diversidad de tareas y necesidades que demandan la sociedad, la ciencia, la industria y el comercio con la misma facilidad, sin la infraestructura con la que cuentan las redes de Telecomunicación global.

Si bien el avance de la tecnología y la demanda voraz de la sociedad por contar con mayores y más eficientes medios de comunicación, se incrementó de manera exponencial en los últimos quince años, este fenómeno se vio magnificado por un evento ocurrido a finales del año 2018: la pandemia global de Covid19 (COP26, 2021); y debido a ella, se impuso un nuevo orden mundial, con cierre de espacios públicos casi en su totalidad y confinamientos estrictos. Por ello, para octubre 2021 ya se tenía un registro de más de 4.5 billones de usuarios en redes sociales (we are social, 2023). Esta situación multiplicó la cantidad de enlaces de telecomunicación urbana e interurbana de manera vertiginosa (TECNO, 2021), y como resultado de lo anterior, la demanda de cables para redes LAN y de fibras ópticas también se incrementó de manera repentina.

El cambio en la forma de trabajo, estudios y la adquisición de bienes y servicios, fue abrupta; las jornadas laborales cambiaron de ser presenciales a enlaces remotos vía internet, excepto aquellas actividades designadas como esenciales, entre las cuales se encontró la Industria de las Telecomunicaciones, en la que opera ConduMex. Las compras y pagos de servicios, la adquisición de alimentos, productos de higiene y primera necesidad se realizaron en

<<línea>>, para evitar las aglomeraciones; todo giró en torno a la pandemia mundial, y esto hizo que muchas materias primas y materiales de embalaje, tarimas y empaques, entre otros sub productos, enfrentaran sobreconsumos inesperados; al grado que a mediados del año 2021 ya era grave la falta de insumos industriales a nivel global y sobre todo de materiales como la madera primaria y terciaria; afectando al sector industrial, al de construcción, mueblero y prácticamente a todos los ámbitos comerciales, la situación no parecía tener fecha de una solución próxima (González, 2021). Incluso, el presidente de la Cámara Nacional de la Industria de la Madera en México (Ruíz, 2021) comentó:

“Algunos productores de muebles no recurren a la madera de tala ilegal para no incentivar esta situación, mientras incrementa la importación, pero por el COVID19 se ha elevado el costo de los contenedores o bien hay retrasos. Estamos cerca del colapso”.

Esta situación afectó inesperadamente la logística de venta de cables para telecomunicaciones en todo el mundo, ya que la madera, es un material empleado para realizar los pallets de envío nacional e internacional, y se agravó aún más en la elaboración de los carretes de madera, los cuales son empleados como empaque. En el patio de embarques se manejan y da disposición a los productos de Condumex, como se observa en la Figura 1. En esta área se muestran los materiales auxiliares al embalaje de cables que producen.

**Figura 1**

Área de embarques, Planta CONDUMEX, San Juan del Río.



*Nota.* Elaboración propia, 2022.

Así que, por un lado, se tuvo un crecimiento explosivo en la demanda de cables de fibra óptica para instalar las nuevas conexiones requeridas globalmente y por el otro, se presentó el desabasto de un recurso renovable al que se le empleaba en todos los ámbitos comerciales y entornos industriales y de consumo: la madera.

Y debido a que el 95% de los cables de fibras ópticas que se fabrican en CX, emplean carretes (empaques) de madera virgen como se muestra en la Figura 1, y el desabasto de los maderables aumentó a la par de sus precios (Becedas, 2021), fue imperiosa la necesidad de buscar materiales alternativos para suplir el uso de madera sólida en la elaboración de los mismos.

El panorama del desabasto de los recursos maderables, se considera un tema recurrente y que será cada vez mayor conforme continúa la deforestación mundial, como lo menciona Ceoworld Magazine a finales del 2021 (Gourtsilidou, 2021)., donde se señala que México ingresó al listado de los 10 países más deforestados (Brasil, República Democrática del Congo, Bolivia, Indonesia, Perú, Colombia, Camerún, Laos, Malasia y México). Este desabasto se acentúa con el avance del tiempo y a la par lo hace la necesidad de contar con materiales alternativos, similares a la madera virgen, ya que esta es biodegradable, sirve como mobiliario diverso por décadas y al final de su vida útil se emplea como combustible o puede reprocesarse para hacer compostas o materiales aglomerados.

Con la intención de conocer las características tan peculiares de la madera, se investigan sus propiedades mecánicas y principales formas de procesamiento industrial, pues se define como una materia de origen vegetal, obtenida del tronco de los árboles, constituida por fibras de celulosa y lignina, donde la primera otorga la flexibilidad y la lignina proporciona la característica de dureza y rigidez (Aula Virtual, 2015).

La escasez creciente de madera en el mercado, hizo crítica la elaboración de los empaques para los productos de Condumex, por lo tanto, se presenta la necesidad de contar con información acerca de las características y propiedades mecánicas que deben cumplir los materiales alternativos o sustitutos de la madera sólida, para que al conocer estas exigencias de desempeño mecánico mínimo indispensable, se puedan realizar análisis de esfuerzos y desempeño frente a cargas o compresión, a través de la simulación en Solid Works®, pues

este software cuenta con herramientas de cálculo de elemento finito que permiten obtener caracterizaciones de los materiales, muy cercanas a la realidad.

Las diferentes tesis presentadas a continuación, ayudan a tener una mejor idea de los parámetros que se deberán tener en cuenta para la simulación digital de láminas de madera comprimida, que constituyen la parte medular de este proyecto de tesis.

## 1.1 Resistencia mecánica y composición de maderas amazónicas y locales

En los procedimientos de prueba señalados en la norma ASTM D143-22 “Métodos Estándar para Pruebas de Pequeñas Muestras de Madera”, se definen las características mecánicas de la madera, de las que se cobran importancia para esta investigación sólo: Resistencia a los Esfuerzos de Tracción, Compresión, Flexión, Torsión y Cizalla. Y las características constitutivas principales: Densidad y Humedad Relativa. Por ello, la resistencia mecánica de la madera, dependerá del tipo, sus vetas y la dirección de estas, así como el tamaño de la superficie en la que se apliquen las diferentes fuerzas (Aula Virtual, 2015).

En la publicación “Caracterización físico-mecánica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* para el uso estructural proveniente de Restinga, Brasil”, (Nogueira *et al.*, 2018) se pueden observar las características mecánicas de resistencia a la Compresión, Tensión y Flexión, tal como se muestra en la Tabla 1. Esta publicación permite definir los datos generales de desempeño mecánico del Eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*), que es una de las maderas más empleadas en la construcción, esta tabla ofrece la primera estimación de los valores de compresión y tensión a la ruptura que se analizan en este proyecto, y son las principales características que se pretenden cumplir en la simulación digital del material compuesto de virutas de madera y adhesivos para esta investigación.

**Tabla 1**

*Resultados para los módulos de ruptura del Eucalyptus camaldulensis.*

| Característica            | CH (%) | n  | M    | de  | P-valor |
|---------------------------|--------|----|------|-----|---------|
| Compresión Paralela (MPa) | 30     | 17 | 38.8 | 5.1 | 0.0000* |
|                           | 12     | 18 | 48.0 | 6.3 |         |

| Característica          | CH (%) | n  | M     | de   | P-valor |
|-------------------------|--------|----|-------|------|---------|
| Compresión Normal (MPa) | 30     | 16 | 3.8   | 1.7  | 0.0048* |
|                         | 12     | 18 | 6.2   | 2.8  |         |
| Tensión Paralela (MPa)  | 30     | 15 | 67.1  | 32.5 | 0.3088* |
|                         | 12     | 14 | 78.1  | 24.2 |         |
| Tensión Normal (MPa)    | 30     | 16 | 3.4   | 1.5  | 0.0310* |
|                         | 12     | 18 | 4.6   | 1.6  |         |
| Flexión Estática (MPa)  | 30     | 15 | 74.4  | 8.0  | 0.0068* |
|                         | 12     | 18 | 122.5 | 66.0 |         |

*Nota.* CH: Contenido de humedad, n: número de repeticiones, M: medias de las propiedades, de: desviación estándar, \*:  $P < 0,05$  en prueba *t*. Adaptada de “Caracterización físico-mecánica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* para uso estructural proveniente de Restinga, Brasil” (p. 54), por Nogueira et al., 2018, *Revista Forestal del Perú*, 33(1).

En el estudio mostrado por Nogueira *et al.*, (2018)., ante las pruebas de esfuerzos y cargas del *Eucalyptus camaldulensis*, se concluye que es una madera con excelente desempeño mecánico para su uso en pisos, muebles, así como para la elaboración de componentes estructurales en construcciones ligeras y de cargas pesadas. Pero, sobre todo, proporciona una buena referencia de los valores que deben considerarse como propios de las maderas empleadas en la construcción y para aquellas que soportan cargas de ligeras a pesadas.

Según menciona Pimienta de la Torre *et al.*, (2018)., la densidad básica de la madera de *Pinus ayacahuite* var. *Veitchii* Shaw, se clasifica como se muestra en la Tabla 2, basándose en datos de las características mecánicas para las maderas mexicanas, de acuerdo a lo señalado por Sotomayor (2005).

**Tabla 2**

*Criterios de clasificación para las características mecánicas de maderas mexicanas*

| Clasificación | Densidad peso seco / volumen – verde ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|---------------|----------------------------------------------------------|
| Muy baja      | Menor de 200                                             |
| Baja          | 201 – 400                                                |
| Media         | 401 – 600                                                |
| Alta          | 601 – 800                                                |

| Clasificación | Densidad peso seco / volumen – verde (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------------|-----------------------------------------------------------|
| Muy alta      | Mayor de 800                                              |

*Nota.* Se muestra clasificación por diferencia de densidades. Adaptada de “Densidad básica de la madera de *Pinus ayacahite* var. *Veitchii* Shaw en Chiapas, México” (p.13), por D. J. Pimienta de la Torre, et al., 2018, *Avances en Investigación Agropecuaria*, 22(3).

En la industria de muebles y materiales para empaques, se ha vuelto fundamental el uso de laminados y comprimidos de alta densidad a base de residuos y subproductos maderables y adhesivos especiales; pues resultan fáciles de procesar y sus precios son menores que el de la madera virgen o sólida. Son conocidos como MDF (de sus siglas en inglés Medium Density Fiberboard) o aglomerados, Laminados y maderas prensadas.

De la interesante investigación de Silva y Návar (2012), que incluye el análisis de la densidad en árboles de zonas templadas del norte del Estado de Durango, México, se puede asumir que la densidad promedio de los tipos de Pinos mexicanos es de  $0.47 \text{ g/cm}^3 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$  valores coincidentes con los publicados en la investigación “Caracterización Estructural de Madera Aserrada de Pinos cultivados en Uruguay” (Moya, 2015), y la de los Encinos corresponde a un valor promedio de  $0.77 \text{ g/cm}^3 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ , con una Desviación estándar de 0.05 y 0.11 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente (Silva y Návar, 2012).

Por tal motivo se concluye que las características mecánicas que presentan las maderas más comunes suministradas a la industria en México, ofrecen las mismas características mecánicas sin importar su origen o procedencia, esto se puede corroborar con el estudio de maderas amazónicas, en el que se observan especies de árboles similares a los que se tienen en los bosques de México (Batista et al., 2021). Se considera entonces, que las maderas como el pino, encino y eucalipto, que se emplean para la fabricación de MDF en el mundo, son la opción más adecuada para el análisis y la simulación digital a considerar en este proyecto, por durabilidad y abundancia

## 1.2 Resina de fenol formaldehído con nanocelulosa reforzada

El segundo componente fundamental en la elaboración de maderas laminadas o prensadas, es el adhesivo. Y en la actualidad el que se emplea principalmente es el fenol-formaldehído y la urea-

formaldehído, aplicando al proceso de alta presión y temperatura a las fibras, buscando que exista un entre cruce cercano a los 90° entre ellas. (Yuce, 2014).

En el estudio de Lengowski *et al.*, (2021) acerca de reforzar los adhesivos de fenol formaldehído en la fabricación de maderas laminares, señala que el uso de aditivos llamados “nanocelulosas reforzadas”, aumenta la resistencia vertical de las láminas de MDF, pero que al mismo tiempo se tiene el inconveniente de volverlo más rígido en un plano horizontal, por lo que pierde flexibilidad. Adicionalmente se pudo observar que al agregar este compuesto en las resinas formaldehidos que se usan normalmente para la fabricación del MDF, reduce considerablemente su fluidez, por lo que dificulta su aplicación; incrementando el tiempo de fabricación de las hojas de MDF. En este ensayo, los autores emplearon Investigación aplicada, basada en la experimentación, y logrando un estudio Cuantitativo.

Sus resultados se apoyaron de la Estadística Descriptiva, realizando pruebas de homogeneidad y análisis de varianza (ANOVA); por otra parte, cuando la diferencia significativa se detectó entre muestras, se utilizó la prueba de Tukey, al 5% de significancia. Y los datos fueron analizados con el software estadístico Statgraphics 2019. (Lengowski, 2021), el resumen de los hallazgos de este estudio se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Resultados de Nanocelulosa vs viscosidad en adhesivo*

| Propiedad      | CA            | NR1           | NR2           | NR3           |
|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Viscosidad (s) | 127 a (1.57)  | 69 b (4.35)   | 63 c (1.58)   | 53 d (1.08)   |
| Tiempo Gel (s) | 518 a (2.52)  | 384 b (2.36)  | 363 bc (0.57) | 349 c (5.29)  |
| pH             | 11.7 a (1.77) | 12.2 a (1.64) | 12.1 a (1.72) | 11.8 a (0.85) |

*Nota.* CA: Adhesivo de Control; NR: Adhesivo nano-reforzado. Adaptada de “Nanocellulose-reinforced phenol-formaldehyde resin for plywood panel production” (p. 4), por Lengowski *et al.*, 2021, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2021(23).

De este estudio se asume la necesidad de la utilización de aditivos y resinas que deben ser simuladas como una matriz de inmersión para las partículas de madera, y obtener laminados, que permitan realizar evaluaciones digitales de resistencia mecánica.

Por otro lado, aunque los estudios mostrados con Nanocelulosa reforzada en láminas de MDF, ofrecen esta característica de robustez mayor al MDF estándar del mercado, este el valor no es significativo y conseguir estos aditivos es de gran dificultad en México; por lo que siguen siendo mejor opción los adhesivos comercializados en México de manera industrial.

### **1.3 Efecto del tratamiento térmico de las fibras de la madera en las propiedades de prensado plano de compuestos de madera y plástico**

Este estudio muestra por objetivo, mejorar la estabilidad dimensional de los compuestos plásticos de madera prensados planos (WPC), los cuales contienen fibras de madera de hinchado rápido con la aplicación de temperatura. Se consideró interesante, pues aun cuando el proyecto de esta tesis no involucra materiales plásticos para la elaboración de la madera prensada de alta densidad, sí permite comprobar que un factor fundamental sería la temperatura, durante el proceso de prensado, y mejor aún, un posible efecto favorable si se aplica un pre calentamiento de las fibras (virutas y astillas) antes de agregar adhesivos y formar las láminas.

Las fibras de madera fueron tratadas a tres temperaturas diferentes (120, 150 o 180 °C) en autoclave de laboratorio. Los paneles de WPC están hechos de Eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*) mezcladas en seco y polipropileno (PP) en polvo (50:50 en peso), el espesor y el hinchado de los pánels por absorción de agua disminuyeron significativamente al aumentar el tratamiento de temperatura y tiempo de aplicación (Ayrylmis, 2011). Aunque al mismo tiempo, se mostró una disminución en la dureza de penetración en las placas con tratamiento térmico, lo que pudiera asumirse como un debilitamiento de la adhesión entre las fibras de madera y el compuesto plástico. Sin embargo, las características dimensionales fueron más estables en los pánels con el tratamiento térmico previo en las fibras de madera.

El efecto del tratamiento térmico de las fibras maderables sobre las láminas de madera compuesta (plástico y madera) mostraron una significativa resistencia a la absorción de agua; y los resultados son muy interesantes, ya que mostraron que el tratamiento térmico de las fibras de madera condujo a reducciones del 60% y 31% en hinchado y absorción de agua, respectivamente, después de 28 días de inmersión. Y dependiendo de la temperatura y el tiempo de exposición, se favorece la hidrólisis de las hemicelulosas, al momento de aplicar

dicho tratamiento térmico, y por ello, ya no absorben humedad con la misma facilidad que cuando no se aplicaba.

Como se menciona al principio, este estudio, hace hincapié en la importancia que tiene el tratamiento térmico adecuado, en grados y duración, para que la madera prensada adquiera las mejores características de desempeño mecánico y constitutivo en cuanto a densidad en el conformado.

Los documentos analizados anteriormente son referencias útiles, que permiten determinar las variables independientes que deberán contemplarse como variables clave en el desarrollo de un proyecto posterior para la elaboración de láminas de madera prensada. Por su parte, este permite observar la importancia en la resistencia mecánica al impacto y al manejo, al igual que una capacidad higroscópica baja (Honorato, 2001), ambas lo más parecidas a los valores mostrados por la madera virgen y de maderas no porosas (Pérez-Peña, 2011) . De los siguientes apartados, se obtienen parámetros y consideraciones importantes que deberán tomarse en cuenta para el diseño del modelo donde se hará el análisis del desempeño mecánico de la simulación digital.

#### **1.4 Formado de perfiles a partir de preformas de fibras de madera prensadas**

El estudio de los materiales compuestos, y en especial de compuestos a partir de fibras como la madera, es fundamental para comprender la manera en que se obtendrán los resultados en materiales laminados, prensados, curados y con adhesivos, es el caso de la madera prensada que se desea simular digitalmente.

Se han realizado muchos estudios basados en la resistencia a la compresión, a la flexión (doblez) y la relación que tienen estas características de los materiales maderables compuestos, a partir del espesor y las condiciones del curado (proceso de secado con temperatura) en los perfiles de madera de fibras prensadas.

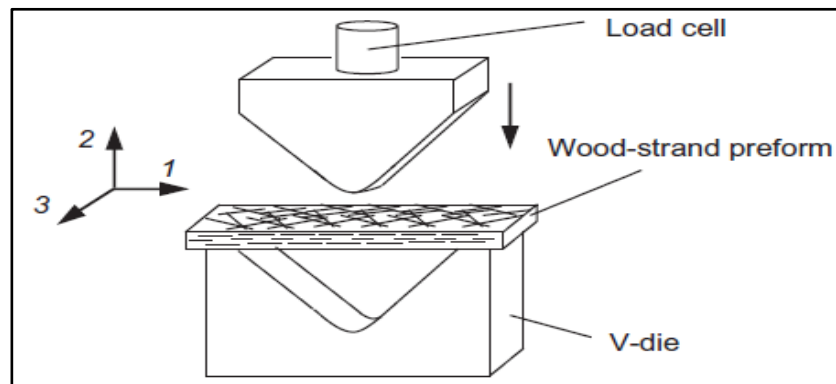
Se describen métodos de análisis de la resistencia que presentan los materiales compuestos, pues estos tienen elementos discontinuos, y los perfiles (e incluso hojas o láminas) de hebras de madera son un ejemplo de este tipo de materiales, cuyo estudio o análisis de su desempeño

mecánico, se verá afectado por el movimiento aleatorio de las hebras como resultado de deformaciones durante el conformado; por lo tanto, los métodos de mapeo no son adecuados para estudiar el tipo de materiales compuestos de fibras de madera.

En la investigación de Wang (2012), se puede revisar una alternativa de análisis en el estudio mecánico de materiales compuestos, tomando en cuenta características físicas como el espesor de las láminas o perfiles y el modelado de los mecanismos de la deformación al doblar. El autor menciona que, aunque analizar los datos de la deformación en maderas laminadas es útil, la aplicación de modelos matemáticos o de computadora, no resultan prácticos al tratar de caracterizar madera prensada fabricada a partir de fibras o virutas, pues la distribución aleatoria de las partículas resulta imposible de predecir. En el artículo, se realizaron pruebas de flexión con una máquina de curvatura en V, como se observa en la Figura 2, y se entiende que, al realizar la prueba, se presentan rupturas o no de las probetas.

**Figura 2**

*Doble en V en láminas de madera prensada.*



*Nota.* La figura representa la disposición del equipo que mide la resistencia de la probeta de madera al doblar en V. Adaptada de "Profile forming of pre-pressed wood-strand preforms" (p.132), por Y. Wang, 2012, *Composites: Part A*, 46(2013).

A través de la investigación de Wang (2012), se desarrolló un método sistematizado para manejar los defectos durante la conformación de las fibras en la elaboración de madera preformada comprimida. Este método está basado en el análisis y control de las condiciones

del proceso de fabricación. Y se evalúan las características de falla (ruptura), resistencia a la flexión en V (MPa) y rigidez (Wang, 2012).

Se pudo determinar que los principales factores de falla (ruptura a la flexión en V) se debía a los deslizamientos de las fibras en el conformado de la madera prensada, y al tipo de entramado o acomodo de las fibras y virutas, además de la importancia de una adecuada distribución uniforme del adhesivo empleado. Así mismo, se puede considera como factor importante en el debilitamiento del material compuesto (madera prensada), el porcentaje de contaminación en cuanto a partículas de tamaño irregular y el hecho de que exista demasiado tiempo requerido de horneado, para reducir la saturación de humedad en el proceso de curado.

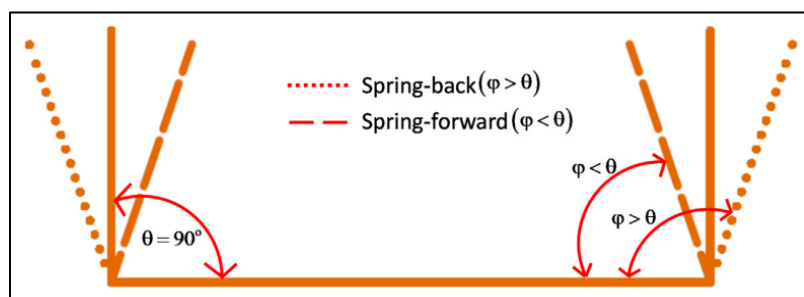
### 1.5 Estudio paramétrico para minimizar el encogimiento del acanalado en laminados de madera

El análisis del estudio paramétrico realizado por Chanda y Bhattacharyya (2021)., para minimizar la contracción de los canales realizados en maderas ranuradas, resulta útil, pues en él se presenta la realización de un contrachapado o laminado de un compuesto de viruta de varios tipos de maderas, por medio de alta temperatura y compresión de esta mezcla; Chanda y Bhattacharyya (2021)., señala de qué manera, pueden reducirse los efectos de contracción en los bordes de este material, y que dichas modificaciones sean parte del diseño, para los ensambles del producto final.

Este artículo fue de interés debido a que concentra en el estudio de dos factores principales del proceso de fabricación de maderas laminadas (aplicable a maderas prensadas): la Temperatura y Tiempo de curado; a partir de las cuales, se pueden modificar los efectos de su contracción y deformación, véase Figura 3; y aunque estos parámetros no se usarían en el modelo digital, sí son importantes para la conformación, plasticidad y resistencia a la compresión del material que se desarrolle en un proyecto posterior a esta tesis.

**Figura 3**

Ilustración del efecto de apertura Spring-Back (SB) y de la contracción Spring-Forward (SF) en laminados

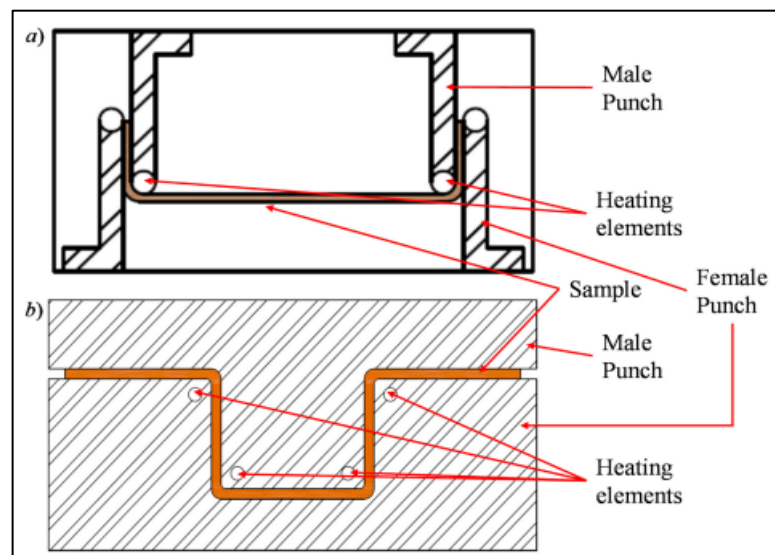


*Nota.* El gráfico representa el regreso a su forma original (SB) o la contracción (SF), en los bordes de maderas laminadas prensadas, al ser acanaladas. Adaptado de “A parametric study to minimise spring-back while producing plywood channels” (p.2), por A. Chanda & D. Bhattacharyya, 2021, *Journal of Cleaner Production*, 304(2021).

La explicación del proceso realizado, fue la siguiente: se tomaron muestras comerciales de triplay de pino (pegamento con una densidad de 250 g/m<sup>3</sup>) con longitud de 120 mm x 30 mm para los estudios estadísticos de flexión en 4 puntos aparejados y hasta 280 mm x 50 mm para las secciones de doblado en “sombrero de copa”, como se observa en la Figura 4 (Chanda & Bhattacharyya, 2021).

#### **Figura 4**

*Representación esquemática de Doble en cuatro puntos aparejados*



*Nota.* (a) Doble en cuatro puntos aparejados (amachimbrado) y (b) Molde en U. Adaptado de “A parametric study to minimise spring-back while producing plywood channels” (p. 4), por A. Chanda & D. Bhattacharyya, 2021, *Journal of Cleaner Production*, 304(2021).

El diseño del estudio estuvo basado en comprender el efecto de  $T_f$  (*Temperatura*) y  $t_i$  (*tiempo de curado y compresión*) en el efecto de contracción o recuperación elástica final del producto después de formar un canal. Para comprender los efectos individuales e interactivos de estos parámetros, se adoptó la técnica estadística denominada Diseño Experimental DoE (JIJU,

2001) y el método principal utilizado para el estudio fue el análisis Taguchi, que se considera como una poderosa herramienta de estudio para observar estadísticamente los efectos de parámetros independientes y de sus interacciones.

El método Taguchi se concentra principalmente en la relación Señal/Ruido (S/N) y por medio de una matriz ortogonal (OA) que ayuda a comprender los efectos de los parámetros en estudio que se consideran responsables en la misma evaluación. El análisis de Taguchi generalmente es seguido por el ANOVA (Análisis de Varianzas), que ayuda a determinar la contribución cuantitativa exacta de cada factor finalmente. (Chanda y Bhattacharyya, 2021).

El método Taguchi se concentra principalmente en la relación Señal/Ruido (S/N) y por medio de una matriz ortogonal (OA) que ayuda a comprender los efectos de los parámetros en estudio que se consideran responsables en la misma evaluación. El análisis de Taguchi generalmente es seguido por el ANOVA (Análisis de Varianzas), que ayuda a determinar la contribución cuantitativa exacta de cada factor finalmente. (Chanda y Bhattacharyya, 2021).

Después de revisar los datos y con ANOVA de los resultados, se concluyó que  $T_f$  tuvo una mayor influencia en la Apertura (SB) final. Es más, Según el estudio, una  $T_f$  de 250°C y un tiempo de curado de 70 s in situ, dieron los mejores valores; considerando un contenido de humedad para el preformado aumentado al 25.7% y teniendo errores de 6% y 5% con respecto a las muestras de estudio estadístico de acuerdo a la ubicación del grano de las láminas de la madera (paralelos o perpendiculares a las fuerzas de compresión para las pruebas).

Una vez más, se observa la importancia del ingreso de las fuerzas de compresión en las pruebas de resistencia de los materiales maderables, y estos datos serán de relevancia al momento de realizar la simulación digital en Solid Works®.

## **1.6 Propiedades mecánicas de la madera comprimida**

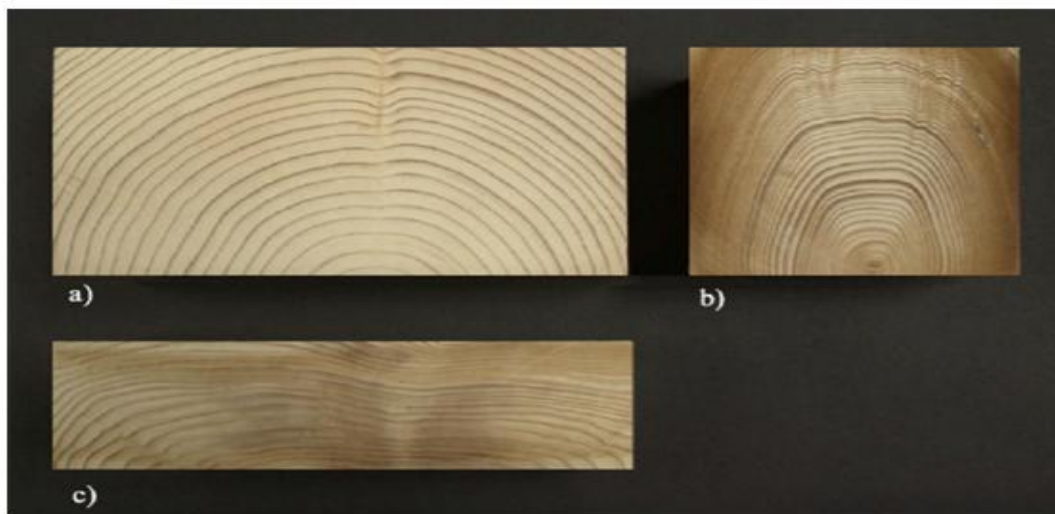
La resistencia mecánica de la madera es la parte medular en el desarrollo de esta tesis, pero debe tener en cuenta, que no lo será en su estado virgen o conocida como sólida o nueva, sino en virutas o astillas, que sean resultantes de otros procesos en la utilización de la madera o incluso de madera recuperada que podrá triturarse para luego prensarse a altas temperaturas y poder conformarla en placas que ofrezcan una gran resistencia, similar a la

que presenta la madera virgen. De manera natural, la madera es un material compuesto que ofrece excepcionales propiedades mecánicas con respecto a su densidad.

En el artículo que presenta Namari *et al.*, (2021)., al que hace referencia de las propiedades de la madera comprimida, se muestra un programa integral de pruebas y la base de datos obtenida con el análisis de más de 720 materiales de Maderas Comprimidas (CW); para ello se realizaron ensayos de compresión, tensión, flexión, empotramiento, momento de fluencia, ruptura e impacto. En la Figura 5, se observa como la madera se puede comprimir en dos de las tres direcciones principales (radial y tangencial), por el contrario, comprimirla en la dirección longitudinal produce daños severos y reducción en fuerza.

### Figura 5

*Imágenes de cortes en pruebas de Compresión en muestras de Abeto*



*Nota.* a) Abeto sin comprimir, b) Compresión Tangencial, c) Compresión Radial. Adaptado de “Mechanical properties of compressed wood” (p.2), por S. Namari et al., 2021, *Construction and Building Materials*, 301(2021).

Cuando la madera sólida se comprime en la dirección tangencial, los primeros anillos de la madera y los últimos, se presionan entre sí y se forman patrones en zigzag, como los mostrados en la figura 5 b); por otro lado, cuando la compresión es en dirección radial, sólo las primeras células de la madera se comprimen, como en la figura 5 c), siendo este tipo de compresión la que normalmente presenta mejores resultados. Reportando que se incrementan

los valores de resistencia a la tensión y flexibilidad (de manera longitudinal) entre 1.4 y 2.4 veces respectivamente.

Estos resultados son de gran importancia para tomarse en cuenta al momento de realizar la simulación digital de los esfuerzos mecánicos sobre los modelos de la madera en el programa, pues así, se define que sólo es útil ejercer las fuerzas de estudio, sobre el plano radial de las capas del diseño, denominadas “Shell” en DSW.

La densificación de la madera mejora significativamente la resistencia y la rigidez, este trabajo contribuyó a entender la mejora sustancial del uso de CW en la industria de la edificación y la construcción con grandes beneficios para el medio ambiente, al propiciar mayor durabilidad en las maderas comprimidas instaladas en construcción. Y también permite fortalecer la idea de buscar alta densidad en el material que se desarrolle en la evaluación digital, para fabricar señalar estas características posteriormente a los fabricantes de carretes de madera prensada, y sumar así, la reducción del empleo de maderas vírgenes para la elaboración de empaques en la industria de las telecomunicaciones.

Ya que la “madera prensada” que se desarrollará, contendrá fibras de madera (virutas y astillas) distribuidas de manera aleatoria, resultará fundamental, buscar que la mayor compresión de las placas del material para conseguir una densidad suficientemente alta que ofrezca valores aceptables de esfuerzo a la tensión y la compresión.

Después de determinar los principales factores para la fabricación de las maderas comprimidas, se analizó la condición de desabasto global que sufrió el ramo industrial de los insumos maderables y el impacto mundial que se presentó por su escasez. Un claro ejemplo de las consecuencias que se suscitan cuando se depende ampliamente de una sola materia prima para cubrir varios rubros en los procesos de fabricación y logística de distribución y envío de los productos elaborados en la Industria, al igual que le pasó a Condumex durante el comienzo y tránsito de la pandemia global, al momento de no contar con los empaques suficientes para la venta de sus productos.

## **1.7 Impacto socio económico de la pandemia de COVID-19: Implicaciones para la posible degradación forestal**

La degradación forestal mundial, pareció agravarse por el uso indiscriminado y cada día mayor, de las maderas vírgenes o sólidas, que son aquellas que sólo están cortadas en aserraderos, sin procesos adicionales, y usadas como materia prima en la industria, como elemento para empaques, muebles, en la construcción, vivienda, entre otros rubros. Además, hubo de sumarse la pandemia de COVID-19 que ha tenido un impacto global, afectando a más de 200 países durante los años 2019 a 2022, entre ellos Indonesia, lugar donde se lleva a cabo este estudio, que sirve para ejemplificar, la manera en que un país de grandes recursos forestales se vio afectado, en diversos sectores productivos, y no sólo en cuestiones de salud.

La afectación social aparece cuando las empresas se ven obligadas a reducir su mano de obra para disminuir sus costos operativos. Además, aquellos que no pueden sobrevivir y cumplir sus necesidades de vida durante el COVID-19 tienen que regresar a su ciudad natal. Una de las razones por las que eligieron regresar a su lugar de origen es que el precio de los bienes está aumentando constantemente mientras que la compra está disminuyendo, y esa situación ocurrió globalmente.

Recordemos que además la reducción en la actividad industrial, también se suspendió el turismo, por reglamentaciones de distanciamiento social y regulaciones a las empresas que podrían permanecer trabajando; esto generó el regreso de un gran número de personas a sus lugares de origen, aumentó el desempleo local y finalmente, estos individuos deberían utilizar y comercializar los recursos maderables a su alcance, ya fueran como combustibles o como artículos de venta para las poblaciones vecinas, e incluso, de manera ilegal.

Tal vez, en el caso de México, Chile o Brasil, el efecto del desempleo por la pandemia, no se manifestó tan directamente como en Malasia, donde el tráfico ilegal de madera se incrementó abruptamente, como fuente alternativa de recursos y combustible debido a la falta de comercialización de insumos y estancamiento de la economía, ni en detrimento directo de los recursos forestales, pero fue un hecho que durante el último trimestre del año 2020 y prácticamente todo el año 2021, en el continente americano, se presentó un gran desabasto en los productos maderables, y un factor crucial, fueron las restricciones de traslados y el confinamiento social. (Golar G, 2020). En la Figura 6 se observan imágenes de la tala clandestina de madera en Indonesia, como consecuencia de falta de combustibles accesibles en algunas comunidades marginadas de ese lugar.

**Figura 6**

*Venta ilegal de madera en Indonesia*



*Nota.* En el gráfico se observan tala montes y el manejo de madera ilegal. Adaptado de “The social-economic impact of COVID-19 pandemic: implications for potential forest degradation” (p. 8), por G. Golar et al., 2020, *Heliyon*, 6(2020).

Si bien se debe considerar como un factor fundamental la ocurrencia de la pandemia, como detonante en el desabasto de muchas mercancías y productos a nivel mundial, debido a la suspensión de tráficos aéreos, marítimos y terrestres en las principales economías globales; también se hizo manifiesto, sobre todo en México, el control de células delictivas para la comercialización de la madera y subproductos maderables, con sobreprecios y sobre explotación para la venta clandestina e incluso exportación. Y aunque de estos datos no se tienen reportes oficiales por dependencias gubernamentales en México, se tuvo esta información de parte de los proveedores de maderables en la planta de CONDUMEX, quienes indicaron como requisito de venta, un incremento de más del 60% en los precios de todos los insumos maderables.

No descartemos que parte del problema, también corresponde a la deforestación o tala sin regulación ni plan de recuperación de los recursos forestales, a nivel nacional.

## **1.8 Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para tableros y productos de madera Particulada**

Estos documentos emitidos por el Grupo del Banco Mundial, son Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad, en los que se orienta a los usuarios respecto a cuestiones generales sobre la materia en que puedan ser utilizadas, en todos los sectores industriales. (IFC, 2007). Las guías sobre medio ambiente, salud y seguridad contienen los niveles y los indicadores de desempeño que se pueden obtener generalmente en instalaciones nuevas, con tecnología existente y a costos razonables.

Los problemas ambientales asociados con la fabricación de tableros y productos de madera particulada incluyen: Prácticas forestales no siempre sostenibles, emisiones a la atmósfera, aguas residuales, materiales peligrosos, residuos sólidos, ruido, entre otros propios de los procesos productivos; todo esto fortalece la idea de realizar la simulación digital de estructuras de madera comprimida y evaluar su desempeño mecánico, previo a la fabricación de manera física; con esto se busca la reducción de todos estos problemas en la elaboración de prototipos para luego ser evaluados esperando un desempeño adecuado con mayor grado de certeza.

Y aunque todos los rubros son fundamentales e importantes, no se integran de manera directa en este proyecto de investigación. Pero se analizan como puntos importantes a considerar para promover prácticas forestales sostenibles, pues al dejar de emplear maderas vírgenes o sólidas (madera sin más proceso que la tala y corte) es un punto que consideramos imprescindible para el desarrollo de nuestra investigación: buscando reducir el impacto forestal al utilizar fibras recicladas o recuperadas en la fabricación de tableros de madera prensada, al mismo tiempo que se debe considerar la disminución de concentraciones de adhesivos empleados en la formulación de los paneles de la madera prensada, y la recuperación de los materiales y partículas de desecho, al momento de la conformación de las placas; esto último se propondrá llevarlo a cabo a través de la utilización de filtros industriales y la decantación de virutas y astillas, para luego disponer de estas, una vez que se compruebe que no tienen residuos de agentes adhesivos u otros, que puedan dañar el subsuelo.

El examen de la información general de los diferentes procesos y composiciones de las maderas comprimidas que se han desarrollado a lo largo del tiempo permite ubicar de manera coherente la factibilidad en el desarrollo de madera comprimida de alta densidad a base de

virutas de madera, como tema de una investigación y proyecto posterior a la simulación digital de la misma.

Y en lo que afecta a la industria de las Telecomunicaciones, y particularmente a Grupo Condumex, sector Cables, es el desabasto de recursos maderables con los que se fabrican los empaques de sus productos; por ende, toma gran importancia investigar y desarrollar un material compuesto que permita sustituir a la madera virgen, que tenga costos accesibles y se pueda elaborar con insumos nacionales, adhesivos y maquinaria disponible en México.

Las la información de las valiosas investigaciones referidas con anterioridad, se obtienen datos importantes y características fundamentales a considerar para el desarrollo de este proyecto de tesis, pues de demuestra que el estudio de las características de las maderas sólidas o vírgenes, es muy importante, a la par de una genuina búsqueda por aminorar su uso desmedido al mismo tiempo que se realiza con mayor ahínco, una auditoría global de los recursos maderables que desaparecen por el consumo humano a pasos agigantados.

## **1.9 Utilización de Tecnologías de la Información para el diseño de empaques de madera y su evaluación mecánica digitalmente.**

Es aquí donde se fundamentan las bases de este proyecto de investigación, que busca formar ser parte de la solución, debido a que Condumex establece en su política de responsabilidad social una “Visión de largo plazo en pro del desarrollo económico, social y el cuidado del medio ambiente, como parte fundamental de nuestra competitividad” (CONDUMEX, S.A. DE C.V., 2022). Y teniendo en mente reducir la cantidad de madera sólida que se emplea para la manufactura de los empaques o carretes de los cables de fibras ópticas, toma gran fuerza la simulación digital con el apoyo del software SOLIDWORKS Professional, para el diseño cad de los productos y el detallado del manejo y resistencia mecánica de los mismos una vez que están en sus empaques.

Y una vez que se analizaron a detalle las propiedades de la madera, como se expresan en múltiples publicaciones y como señala Borja *et al.*, (2010)., refiriéndose a la caracterización tecnológica de la madera, se concluye que, para fines prácticos en cuestiones de cálculo de masa, las maderas de pino y semi-duras similares, presentan una densidad de entre 450 – 500 kg/m<sup>3</sup>, también se obtiene información muy valiosa acerca de la estructura anatómica de

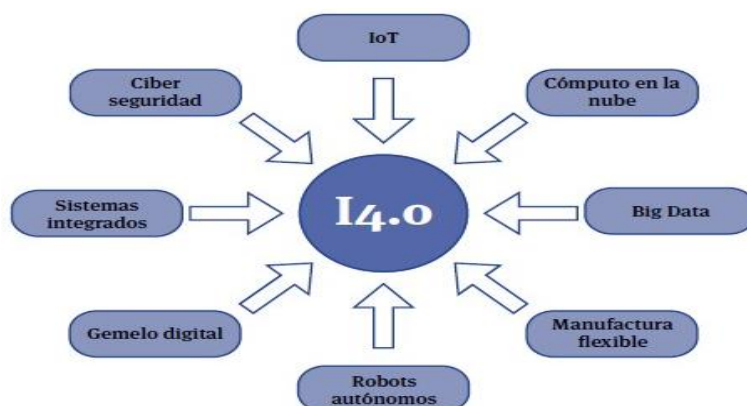
la madera, pues nos permiten observar “matrices” en formas acanaladas y/o reticulares de una manera general (Borja *et al.*, 2010); y estas estructuras serán clave para el desarrollo de los modelos de caracterización digital de la madera, pues de lo contrario, sería prácticamente imposible simular la composición anatómica celular de las fibras maderables.

Por otro lado, en un artículo presentado por Buenrostro (2022), se propone la adopción de tecnologías asociadas a la industria 4.0 en las pymes mexicanas, y expone la importancia que ha cobrado la tecnociencia y la incorporación de las tecnologías de la información, como la digitallización, no sólo en la industria y la educación, sino en la vida diaria de la sociedad a través de los pilares de la Industria 4.0. El estudio, ofrece un valioso análisis de la integración que tiene la automatización y la digitalización de prácticamente todos los procesos en la indistria; y señala la gran ventana de oportunidad que tienen las pymes en México, para implementar tecnologías que las hagan más competitivas.

Buenrostro (2022), señala que en México aún existe mucho rezago en la utilización de tecnologías que intervienen en la modernización de su industria y las pymes, pero que afortunadamente, a mayor cantidad de desarrolladores de tecnología, se mejora la oferta de las mismas de manera global. Estas herramientas son conocidas como Pilares de la Industria 4.0, y se pueden ver en la Figura 7.

**Figura 7**

*Diagrama de los Pilares de la Industria 4.0*



*Nota.* Adaptado de “Propuesta de adopción de tecnologías asociadas a la industria 4.0 en las pymes mexicanas” (p. 4), por E. Buenrostro, 2022, *Entreciencias*, 10(24).

Esta investigación corrobora la importancia que ha cobrado en la industria, la utilización del llamado gemelo digital o digitalización de modelos productivos, diseños o procesos, pues a través de estos modelos digitales o virtuales, se puede simular el mundo físico, para llevar a cabo pruebas reiteradamente, ajustes y diferentes configuraciones en el mundo virtual antes de realizarlas físicamente; esto ahorra valiosos recursos materiales, tiempo de fabricación, mano de obra y evaluaciones, que al final representan ahorros económicos cuantiosos.

En este artículo se hace hincapié en la importancia que tiene la integración de los pilares de la I4.0 en México, pero también muestra un panorama realista con importantes carencias y atrasos, y propone la incursión en la digitalización en métodos de diseño y desarrollo de procesos y productos, para lograr ser más competitivos y productivos.

Con el análisis de los importantes artículos y proyectos antes citados, se establece en primer lugar que es indispensable la mejora en el diseño de empaques y carretes de los productos de FO Condumex, y esto se logrará a través de simulaciones digitales, que permitan a los diseñadores analizar el comportamiento estructural del empaque bajo diversas condiciones de carga. Eso facilitará la optimización del diseño, mejorando la resistencia y durabilidad del empaque, evitando sobredimensionarlo, lo que se traduce en diseños eficientes y ligeros.

En segundo lugar, se deben ofrecer empaques con reducción de costos, pues al optimizar los diseños, que cumplan con el desempeño mecánico sin excesos de materiales, y las simulaciones de elementos finitos contribuyen a la iteración de pruebas sin la necesidad de fabricación física de los materiales o prototipos.

En un tercer lugar, se reducirían los tiempos de desarrollo y se aumentaría la eficiencia en todo el proceso, pues los tiempos de validación se reducirían conforme se fortalezcan los modelos de simulación digital de los materiales y empaques.

En cuarto lugar, y no menos importante, las simulaciones de elementos finitos que se pueden llevar a cabo con el programa SW empleado en esta tesis, permiten validar el rendimiento del empaque o carretes antes de su producción a gran escala, garantizando el cumplimiento de estándares (Normas ISTA), y sobre todo, garantizando la integridad de los productos Condumex durante la logística de envío, recepción, almacenamiento y disposición.

## **CAPÍTULO II. MARCO HISTÓRICO – CONTEXTUAL**

En México, se encuentran compañías proveedoras de servicios de telecomunicaciones y empresas que fabrican los insumos que las primeras emplean para la instalación de sus redes de transmisión e infraestructura y en conjunto se ha logrado a integrar la red de Telecomunicaciones más amplia en Latinoamérica, en donde Condumex (CX) Sector Cables ha logrado destacarse por la calidad de sus productos.

Condumex es una empresa integrada por cinco plantas que fabrican Cables en México y una planta en Brasil, cuenta con más de 60 años de experiencia en redes de telecomunicación y con la mayor participación en el mercado de cables en América Latina, siendo también, la única compañía mexicana de su ramo, con operaciones internacionales en otros continentes.

Con su labor, cubre las necesidades de insumo de cables para las telecomunicaciones en México y Latinoamérica a través de Claro® entre otras compañías de clase mundial. Y debido a que la instalación urbana e interurbana, se realiza principalmente, por medio de la red de cableado coaxial, troncal y de fibras ópticas, en las últimas dos décadas, se ha presentado el aumento exponencial de las líneas telefónicas e instalación de centros de distribución para servicios de telefonía celular, equipos fijos e internet, lo que se traduce en mayor producción y venta de kilómetros de cables en México.

Condumex produce actualmente, un promedio anual de 800,000 km de cables coaxiales para acometida, 140,000 km de cable coaxial troncal y de distribución y hasta 265,000 km de cable de fibra óptica, estos últimos fabricados en su planta de San Juan del Río, Querétaro, para los sistemas de televisión de paga y telefonía (CONDUMEX, S.A. DE C.V., 2022). Estos datos cobraron relevancia, a partir del año 2021, no sólo por el inicio del segundo año de contingencias socio-económicas por cuestiones de la pandemia de COVID19 (Dutta, 2021); sino además, por el desabasto de múltiples servicios y materiales a nivel mundial, su inspección y traslado. A todo esto, se sumó el problema de la escasez de una materia prima auxiliar (commodity) que se había desatendido, por considerarse como un recurso renovable abundante: la madera virgen, nueva o sólida.

## 2.1 México entra al grupo de los 10, más deforestados en el mundo

Como se ha dejado claro en las últimas reuniones globales y tal como lo mencionó Kattosová (2021)., más de 100 líderes mundiales acordarán acabar con la deforestación para 2030, y esto se reiteró en la COP26. Sin embargo, el problema de la deforestación es crítico en la actualidad, y no se podría esperar a resolver hasta la siguiente década. Y como se mencionó anteriormente, en Ceoworld Magazine (2021)., México ingresó en la lista de los 10 países más deforestados en 2021. (Gourtsilidou, 2021).

Y el hecho de que los productos de fibras ópticas de CONDUMEX utilicen empaques (carretes) de madera sólida o virgen, genera problemas de logística y esto se traduce en la imposibilidad de entregar a tiempo miles de kilómetros de cables a nuestros clientes; y se tiene el riesgo de que esta situación se repita en los años siguientes.

## 2.2 Desarrollo de carretes con materiales alternativos a la madera

Desde el año 2018, que se empezó a visualizar la falta de disponibilidad y entregas tardías que tendrían los proveedores de tarimas y empaques en CX, el departamento de Ingeniería del Producto de Fibras Ópticas, se dio a la tarea de desarrollar materiales alternativos para la fabricación de los carretes de cables ligeros (jumpers, distribuidores y algunos para “interiores”) y aunque sólo representan un 5% de la gama total de las líneas de negocio de la empresa, el volumen estimado de piezas de empaque era sobresaliente, y se decidió por el uso de MDF (Medium Density Fiberboard), material que brindó excelentes resultados. En la Figura 8 se pueden observar varias decenas de carretes de MDF con cable de Fibra Óptica.

**Figura 8**

*Carretes de MDF con cables de Acometida Óptico. Condumex SJR.*



*Nota. Elaboración propia, 2022.*

El MDF también es conocido como madera laminada de media densidad y es ampliamente utilizado en la industria de la construcción de muebles; existe comercialmente en espesores diversos y calidades distintas; sin embargo, su capacidad de esfuerzo a la ruptura es baja, y no se puede emplear para carretes que deban soportar más de 40 kg de peso en su contenido de cable enrollado; pues se presenta el riesgo de que se rompan durante su manejo y transporte hasta el destino final con los clientes. Ese es otro de los problemas que se presenta en el departamento de diseño, y fortalece la idea de desarrollar materiales alternativos a la madera sólida para evitar la dependencia de esta en la elaboración de los empaques.

## **2.3 Diseño general de un carrete para empaque de cables ópticos**

Por lo anterior, aumenta la necesidad de contar con un modelo digital que permita simular las evaluaciones de la resistencia mecánica de la madera procesada, en lugar de comprar muestras y prototipos físicos de carretes que requieren de al menos un mes para su fabricación y de entre dos y tres meses más, para realizarle las pruebas de habilidad del proceso y manejo en las líneas de producción de CX.

Tal como se mostró anteriormente, en un estudio llevado a cabo en Chile (Lengowski, 2021)., se experimentó la adición de celulosa nano fibrilada a laminados de madera prensada y de ese reporte se concluye la importancia de dos factores al momento del diseño digital del panel de madera: La temperatura y el tiempo de horneado; sus resultados dan la pauta para considerar la opción de no modificar las concentraciones de resinas, adhesivos ni aditivos especiales, sino que por el contrario, se debe enfocar la atención, en el proceso de fabricación cuidando la temperatura y tiempos de exposición durante el horneado de estas láminas de MDF; por lo tanto, durante el modelado digital de los paneles de madera, se desprecian los valores de curado y humedad de los compuestos, para no agregar más variables al momento de la simulación.

Otro estudio que fortalece la hipótesis de conseguir una madera laminada más resistente, tomando en cuenta sólo la metodología y habilidades del proceso, fue presentado por Chanda y Bhattacharyya, (2021)., donde se puede observar que, el diseño de las láminas de madera estuvo basado en comprender el efecto de tres factores principales en la fabricación de estos paneles: la Temperatura ( $T_f$ ), el tiempo de curado ( $t_f$ ) y la Compresión, en el fenómeno de la

contracción o recuperación elástica final del producto después de formar un canal (láminas amachimbradas o ranuradas para empalme por amachimbre).

Y algo muy interesante que se observa en el análisis de las diferentes publicaciones, es que aparentemente se pueden fabricar láminas comprimidas de virutas (desperdicio de cortes de maderas vírgenes), con el mínimo contenido de adhesivos, tomando en cuenta, valores adecuados de temperatura, tiempo de horneado y suficiente fuerza de compresión, logrando así, un producto con mayor resistencia a esfuerzos mecánicos que las hojas o láminas de maderas comprimidas tradicionales.

Al estudiar proyectos y documentos referentes a la composición de las maderas laminadas o prensadas, se definen como aspectos fundamentales la importancia de la fuerza de compresión y temperaturas durante el proceso de su fabricación, así como los tiempos de curado. Y adicionalmente, se analiza la posibilidad de hacer un precalentamiento de la viruta o astillas que conformarán las placas de madera prensada, para conseguir una mejor cohesión y menos absorción de humedad en las láminas ya conformadas, tal como se menciona en el trabajo de Ayrylmis (2011)., donde toma en cuenta los factores y variables antes mencionados, como ideales durante el desarrollo del modelo digital y considerando a la matriz de las virutas de madera y el adhesivo como el medio de cohesión, solamente.

## **2.4 Banco de Indicadores**

Finalmente, con la intención de conocer el panorama o pronóstico del desabasto de la madera sólida en el ámbito nacional se, buscó información oficial en la página del INEGI, y el Banco de Indicadores, del apartado Geografía y Medio Ambiente/Medio Ambiente/Recursos naturales/Bosques (INEGI., 2014). Se observaron datos desactualizados desde el año 2014. Por tal motivo no se puede determinar con certeza la cantidad real de superficie boscosa en México con reportes oficiales, como se muestra en la Figura 9; esta falta de datos mantiene la incertidumbre acerca de un abasto suficiente de madera en los años siguientes.

Y tampoco se tienen datos de la cantidad de biomasa boscosa estimada en México, según se puede ver en la Figura 10, tomada directamente de la página del INEGI (INEGI, 2023). Desafortunadamente, la información de estadísticos, áreas boscosas, volúmenes de consumo maderables, distribución local y global de bosques, tipos de los mismos, entre otros datos

relevantes, no se pueden acceder en las páginas oficiales de SEMARNAT. Este inconveniente es una de las razones por las cuales la mayoría de las fuentes para esta investigación, sean de origen extranjero.

Figura 9

Banco de indicadores de Geografía y Medio Ambiente del INEGI

| Geografía y Medio Ambiente                                                                                                                                                |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <input type="checkbox"/> Medio ambiente                                                                                                                                   |           |
| <input type="checkbox"/> Recursos naturales                                                                                                                               |           |
| <input checked="" type="checkbox"/> Agua                                                                                                                                  |           |
| <input checked="" type="checkbox"/> Suelo                                                                                                                                 |           |
| <input type="checkbox"/> Bosques                                                                                                                                          |           |
| <input type="checkbox"/> Variación de la vegetación primaria. Serie II (1993). Otros tipos (Kilómetros cuadrados), Estados Unidos Mexicanos, 2014                         | 42,559.86 |
| <input type="checkbox"/> Actividades antrópicas y otros tipos de vegetación. Total. Área desprovista de vegetación (Kilómetros cuadrados), Estados Unidos Mexicanos, 2014 | 649.08    |
| <input type="checkbox"/> Variación de la vegetación primaria. Serie I (1985). Matorrales (Kilómetros cuadrados), Estados Unidos Mexicanos, 2014                           |           |

Nota. Adaptado de *Tablas de Variación de áreas boscosas en México*, 2022, INEGI (<https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/default.aspx?t=215#D215>). CC BY 2.5

Esta falta de información de la SEMARNAT, se muestra en seguida en la Figura 10.

Figura 10

Indicadores de la Biomasa Forestal en México

| Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fecha de consulta: 31/10/2023 00:09:16                                                                                                                                       |     |
| Banco de Indicadores > Economía y Sectores Productivos > PIB y Cuentas Nacionales > Cuentas Satélite > Ecológicas > SCEEM. Anexo 8. Biomasa. Forestal /f1 (Porcentaje) Anual |     |
| Periodos                                                                                                                                                                     |     |
| 2018 /p1                                                                                                                                                                     | NS* |
| 2019                                                                                                                                                                         | NS* |
| 2020                                                                                                                                                                         | NS* |
| 2021                                                                                                                                                                         | NS* |
| *NS : No Significativo                                                                                                                                                       |     |

Nota. Adaptado del Banco de Indicadores de *Biomasa Forestal en México*, 2023, INEGI, (<https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=6207067809&tm=6#D6207067809#D6207067785>). CC BY 2.5

Así mismo, la información de Costos por agotamiento/PIB, sólo está disponible para los años 2018 al 2020, como se señala en la Figura 11. Y estos datos son alarmantes, pues adicionan mayor incertidumbre al panorama del eventual desabasto y escasez de los recursos maderables en México.

**Figura 11**

*Indicadores de Costos por agotamiento/PIB de Recursos Forestales*

| Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)                                      |                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fecha de consulta: 27/11/2022 10:06:59                                                     |                                                                                                                                                                                                                     |
| Periodos                                                                                   | Banco de Indicadores > Economía y Sectores Productivos > PIB y Cuentas Nacionales > Cuentas Satélite > Ecológicas > SCEEM. Anexo 4. Costos por agotamiento/PIB. Recursos forestales /f1 ( <b>Porcentaje</b> ) Anual |
| 2018 /p1                                                                                   | 1.14539112                                                                                                                                                                                                          |
| 2019                                                                                       | 2.389197593                                                                                                                                                                                                         |
| 2020                                                                                       | 3.5                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Fuentes: /f1 INEGI Sistema de Cuentas Nacionales de México. Económicas y Ecológicas</b> |                                                                                                                                                                                                                     |

*Nota.* Adaptado de Banco de Indicadores de *Cuentas Nacionales de México. Económicas y Ecológicas*, 2023, INEGI, (<https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=6207067809&tm=6#D6207067809#D6207067785>). CC BY 2.5

La información presentada por el INEGI (2023), aunque escasa y sin actualizar, centra la necesidad de este proyecto y fortalece la idea utilizar la simulación digital para el desarrollo y evaluación virtual de los prototipos de empaque, evitando así el uso físico de madera, los cuales terminan en su mayoría con daños destructivos que imposibilita su re utilización; y por otro lado, las simulaciones digitales presentan ventaja en eficiencia en utilización de los recursos y responsabilidad social, ecológicamente hablando.

El análisis y estudio de esta investigación, se centra en el diseño y desarrollo de los modelos digitales de prototipos de empaques de madera; esta labor está a cargo del departamento de Ingeniería del Producto en cada planta del sector cables CX. Posteriormente a la simulación y evaluación digital, se indicarán los ajustes al proveedor o fabricante de carretes para que tome en cuenta los requisitos mínimos para su elaboración y con ellos ya pueda fabricar

prototipos que presentarán una eficacia en su desempeño mecánico, de al menos 90% de certeza en campo.

Las publicaciones revisadas anteriormente fortalecen la hipótesis de la eficacia y conveniencia en los modelados digitales y la simulación de pruebas mecánicas de resistencia a los esfuerzos en diseños y prototipos de compuestos maderables y empaques elaborados con éstos; reduciendo en más del 60% los tiempos de desarrollo de nuevos empaques, al no requerirse muestras físicas de los prototipos y permitiendo al mismo tiempo que, Condumex logre ahorrar tiempo y recursos económicos a la par de evitar emplear madera sólida en muestras de empaques. De esta manera, CX muestra su responsabilidad social y compromiso con el empleo eficiente de los recursos naturales, apoyándose de las nuevas tecnologías para conseguir mayor circularidad en los materiales de empaque.

## CAPÍTULO III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante más de treinta años, y hasta el día de hoy, en la industria de telecomunicaciones global y específicamente en el sector de fabricantes de cables en México, se ha empleado la madera virgen o sólida (principalmente de pino), como materia prima en la elaboración de los carretes de empaque y embalajes que se usan para la venta y distribución de los diferentes productos (cables), lo anterior mostrado en la Figura 12, en el patio de embarques Condumex.

**Figura 12**

*Cables de Fibras Ópticas en carretes de madera.*



*Nota.* La imagen muestra la disposición de los cables empacados en carretes de madera, en la planta de Condumex, SJR. Elaboración propia, 2022.

Al mismo tiempo, en la última década, se presentó un crecimiento constante en la demanda de cables para llevar fibra óptica hasta los hogares, colegios, negocios, industrias entre muchos otros y para ello, se desarrollaron empaques ligeros, bobinas o carretes con bridas plásticas, de MDF o de triplay, con centros de cartón o plástico; sin embargo, estos empaques tienen precios elevados debido a su elaboración especial y que, al ser de importación, la mayoría de sus componentes varían de precio conforme al dólar; por otro lado, los fabricados en el país, requieren inversiones costosas iniciales para su desarrollo y en la adquisición de maquinaria, capacitación al personal, moldes y materiales especiales, entre otros.

En Condumex, bajo la premisa de mantener precios competitivos de sus productos, se volvió necesaria la revisión y evaluación de sus empaques desde el año 2005, actualizando sus diseños con la intención de hacerlos más ligeros, sin disminuir sus capacidades de resistencia mecánica, capacidad de almacenamiento y manteniendo la integridad de su estructura después del manejo y transporte, sin presentar daños o deterioro físico; tarea que se lleva a cabo de manera individual a través, de dibujos en CAD, cálculos dimensionales y de capacidad en hojas de Excel, para luego realizar pruebas físicas y evaluaciones visuales de resistencia mecánica a la ruptura directamente con la manipulación física en el área de embarques CX; todo lo anterior, en piezas físicas de prototipos que se compran a los proveedores de carretes.

También se han analizado las nuevas ofertas de materiales disponibles en el mercado, útiles para la elaboración de los empaques, sin perder de vista su resistencia a los esfuerzos mecánicos y el deterioro que presentan por las condiciones ambientales y de almacenamiento, así como el impacto ecológico que pueden causar al momento de ser dechados.

Asimismo, la tecnología de los materiales en el ámbito industrial se apoya de avances tecnológicos y de la informática, que impulsan el uso de herramientas de simulación digital (Buenrostro Mercado, 2022)., lo que permite mantener competitivas a las empresas, al desarrollar metodologías y procesos más eficientes, reflejando sus ahorros en mejores precios sin el detrimento de la calidad en sus productos. Esta optimización de recursos con el sustento de las nuevas tecnologías y una visión basada en la mejora continua, es la base de la Industria 4.0, que forma parte del día a día de la labor empresarial globalmente.

En Condumex, durante el proceso de optimización y re ingeniería en el diseño de los empaques de sus productos, se toman en cuenta dos factores cruciales: el económico y el tiempo de desarrollo. Ambos, se vuelven componentes clave, al solicitar muestras físicas de los prototipos en desarrollo, y esto último suele demorar entre treinta y cuarenta y cinco días por parte del fabricante de los carretes. Para luego programar su procesabilidad y manipulación con cable, en líneas productivas de CX, para que, finalmente se revise su resistencia de manera visual y física en el área de embarques; para un tiempo total que puede ser desde 6 hasta 18 meses.

Otras alternativas evaluadas en CX son las bobinas plásticas, que pueden estar fabricadas con polietileno de alta densidad (HDPE), Poliestireno, Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS),

Polipropileno (PP), o mezclas de estos compuestos, principalmente. Sin embargo, todos estos polímeros, generan un alto impacto ecológico al desocuparse, por ser derivados del petróleo, es decir, tienen Huella de Carbono en su elaboración y como desecho; este tema es de gran relevancia, pues de manera global se sabe la mayor parte de los residuos producidos por los países industrializados y en vías de desarrollo no se reprocesan ni reciclan, a pesar de existir en la actualidad algunos desarrollos que emplean polímeros mezclados con materiales de construcción para evitar que terminen contaminando el medio ambiente, y darle así un segundo uso a los desechos plásticos, como ejemplo, el proyecto realizado en Chile “Análisis Técnico, Económico y Medioambiental de la Fabricación de Bloques de Hormigón con Polietileno Tereftalato Reciclado (PET)” (Infante-Alcalde, 2019).

Además, reciclaje de los compuestos plásticos empleados para la fabricación de los carretes de embalaje, es de un grado de dificultad medio-alto, al necesitar asegurar su recolección en buen estado y luego reprocesarlo, lo que genera un plástico de menor calidad y más quebradizo. También se ha analizado el ciclo de vida de materiales como el MDF, en donde se puede ver que requieren cuidados especiales para mantenerlos en condiciones adecuadas en el caso de querer reprocesarlos o que no se degraden antes de su utilización final (Lopes Silva, 2013).

En los últimos cinco años, el desabasto de la madera virgen o sólida ha generado conflictos de logística y entrega de productos a nivel mundial, lo que provocó un alza en los precios de los pallets y carretes de madera hasta 400% más altos que los mínimos del 2020 de manera global (Becedas, 2021). Y por ello, la realización de pruebas físicas de prototipos de empaques de madera, se han vuelto onerosas, además de consumir mucho tiempo y recursos humanos en Condumex, esto último se resume en la Tabla 4., para los principales códigos de empaque que se desarrollaron entre el año 2022 y el 2023 en la línea de negocios de fibras ópticas.

Se observan periodos de desarrollo muy largos y costos elevados, pues generalmente se requieren 3 piezas para poder realizar las primeras evaluaciones antes de hacer una compra piloto de al menos 50 piezas, y en caso de que funcionen, se pueda autorizar la compra de un lote para una primera corrida industrial del empaque (más de 50 piezas); y aunque este proceso pudiera parecer fallido, resulta eficaz y asegura el correcto desempeño de los carretes desarrollados, aunque a decir verdad, este método de principio a fin, resulta lento y oneroso.

**Tabla 4**

*Precios y tiempos de desarrollo de prototipos de carretes, octubre 2023*

| Modelo CX   | Dimensiones* (cm) | Material** | Precio / pieza<br>(pesos MXN) | Tiempo de<br>desarrollo<br>(meses promedio) |
|-------------|-------------------|------------|-------------------------------|---------------------------------------------|
| 78NA4275MDF | T-42, B-75, C-50  | MDF        | \$704.55                      | 7                                           |
| MS080065E03 | T-35, B-80, C-65  | PRL        | \$1050.30                     | 16                                          |
| 78NA11M     | T-47, B-80, C-60  | MP/C       | \$978.37                      | 12                                          |
| MS080065SG  | T-35, B-80, C-65  | MP         | \$735.69                      | 10                                          |

*Nota.* \*Dimensiones: T-Tambor, B-Brida, C-Carrera. \*\*Material: MDF: Medium Density Fiberboard; PRL: Bobina plástica; MP/C: Madera de Pino/Tambor de Cartón; MP: Madera de Pino. Elaboración propia, 2023

En la empresa Condumex, el diseño y desarrollo de los empaques y productos, también los lleva a cabo el departamento de Ingeniería del Producto, y su evaluación se realiza principalmente con el apoyo del Laboratorio de materias primas; a la par, Ing. del Producto también es responsable realizar las cotizaciones (ofertas y proyectos a clientes), de la generación y migración de las relaciones estructurales y tablas de procesos de todos los productos (de línea y/o prototipos) en los sistemas de manufactura, además de la elaboración de fichas técnicas, respuestas punto a punto, soporte técnico con las oficinas regionales de ventas y asistencia a las juntas de desarrollo de materiales, como las principales tareas; por ende, el tiempo otorgado al desarrollo de los empaques, generalmente se limita y resulta insuficiente, para no desatender el cumplimiento de las demás actividades.

Afortunadamente, con el surgimiento de nuevas herramientas de la tecnología en hardware y la informática en el manejo de datos de la última década, se tiene acceso a programas de diseño gráfico y simuladores digitales de materiales, con paquetes de análisis de elemento finito cada vez más poderosos, y éstos últimos se vuelven de gran ayuda para las empresas, pues al hacer uso de estas nuevas tecnologías se logra la optimización de diseños y desarrollo de los productos y empaques con una mayor eficiencia operativa y con el ahorro de recursos físicos y económicos sin reducir la calidad en el producto final (Buenrostro Mercado, 2022).

Es así como, en este proyecto de tesis, adquiere gran relevancia el desarrollo de un patrón o algoritmo de simulación digital, en el programa de la marca SOLIDWORKS™, que permita modelar láminas compuestas de madera de pino y encino; disminuyendo de esta forma, la cantidad de combinaciones y muestras físicas que se deban comprar a los fabricantes de maderables, y acortando también, el tiempo del diseño, desarrollo y posterior evaluación del desempeño mecánico de los carretes. Ya que a través de la simulación digital se analiza la resistencia mecánica en horas (entre 8 y 16), en lugar de tardar varios meses, como cuando se evalúan prototipos físicamente, como se mostró anteriormente en la Tabla 4.

Se pretende solicitar a los fabricantes de los carretes de maderables, un diseño pre-evaluado digitalmente, con mayor resistencia al manejo durante el embalaje y envío de los productos de la empresa al cliente final; reduciendo de esta forma, hasta un 75% el costo total del proceso de desarrollo de los empaques para los cables de Fibras Ópticas. Para extrapolar este método de desarrollo de empaques en otras líneas de negocio de Grupo Condumex.

### **3.1 Justificación**

En la industria de las Telecomunicaciones y específicamente hablando en el rubro del sector de fabricantes de cables de fibras ópticas, el desarrollo de nuevos productos y materiales en su construcción, va de la mano con la innovación en sus empaques para asegurar la manera más eficiente y económica de poderlos entregar en cualquier parte del país o alrededor del mundo, sin arriesgar su integridad, calidad y funcionalidad al momento de su traslado, instalación y/o almacenaje.

Y aunque en la planta de Condumex San Juan del Río, se han empleado carretes de madera para el embalaje de los cables de fibras ópticas que se venden a todo México y otras partes del mundo por más de 35 años, es innegable que, la deforestación mundial, aunada al evento de la pandemia global a finales del año 2019, disparó de manera inusitada la escasez de recursos maderables globalmente, y esto a su vez, volvió imperiosa la necesidad de buscar materiales alternativos para la elaboración de los empaques y embalajes de los productos, y que se presentó también, la carencia de los materiales auxiliares como tarimas y cajas de madera, duelas, entre otros, bloqueando así los traslados de materiales y productos en todo el mundo.

La acreditación de este trabajo de investigación y tesis se fundamenta en la necesidad de contar con un proceso ágil en el diseño y evaluación de materiales compuestos de madera, que sirvan en el desarrollo y elaboración de empaques para los cables de fibras ópticas en Condumex, y al mismo tiempo reducir los costos de los mismos y disminuir el tiempo de evaluación para su liberación como material de insumo sin falla. Esto se logra a través de la simulación digital con análisis de elemento finito que proporciona el programa SOLIDWORKS™, ya que al ser un software con el que ya se cuenta licencia de uso a nivel corporativo, su acceso es posible actualmente.

Y es así como surgen las siguientes premisas que argumentan esta investigación:

1. Reducción del costo y tiempo en la elaboración de los diseños:

La disminución de los costos y el tiempo requerido en el diseño y la compra de las de muestras físicas de carretes en desarrollo, representan un rubro de relevancia para contar con ofertas competitivas en el mercado y para la elaboración de nuevos productos, ya que, en la actualidad, no se cuenta con un modelo de simulación digital que permita analizar las propiedades mecánicas que presentará un prototipo de carrete, antes de comprar una muestra física del mismo. Este análisis digital previo, permitirá recabar información anticipada de resistencia mecánica de las bridas de los carretes, reduciendo en más del 50% la cantidad de muestras físicas que se requieran comprar y mandar fabricar.

2. Reducción de tiempo de evaluación en líneas de producción:

El proceso de evaluación de las muestras físicas de carretes de madera que se compran con un diseño nuevo, requiere pruebas de funcionalidad y de su resistencia mecánica. Para evitar que presenten fallas o rupturas durante la fabricación de los cables, el empaclado, su manejo y envío; este proceso es laborioso y tardado, ya que deben etiquetarse, inspeccionarse y hacerse un seguimiento individual de las muestras piloto de los carretes para rastrear su desempeño hasta el momento de la entrega con el cliente y su manipulación durante la disposición de los cables que contengan.

Por ello, al contar con carretes pre evaluados mecánicamente con simulación digital, se incrementa la certeza de un desempeño adecuado durante la vida útil de los mismos. Y se reduce el tiempo del personal y laboratorios para dichas evaluaciones de manera física.

### 3. Incremento en el indicador de satisfacción del cliente final:

El principal valor agregado de los productos que ofrece una empresa, es el nivel de satisfacción de sus clientes, que se fortalece con la reducción en los tiempos de entrega de los pedidos. La reducción del tiempo de respuesta para la recepción de los productos por parte del cliente fortalece la relación comercial con Condumex. Además, que se ofrece una percepción de prontitud en desarrollo para nuevos productos, y la confianza de que estos llegarán en un empaque robusto y optimizado. Por ello, es fundamental agilizar todo el proceso de elaboración y aprobación de nuevos empaques, reduciendo tiempos de evaluación física de estos carretes con el apoyo de las simulaciones digitales previas, lo que también minimiza la cantidad de códigos diferentes al optimizar la cantidad de diseños requeridos por proyecto.

#### **3.1.1 Social**

El desarrollo de esta investigación está impulsado por el desabasto sostenido de recursos maderables que actualmente sufre México y el mundo (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022). Entendiendo con ello, la falta intermitente en la disponibilidad de maderas sólidas o vírgenes para su uso industrial; las cuales, cada día son más escasas y a su vez, más costosas, peligrando incluso su excedencia como parte de los pallets que se emplean en el envío de mercancías de una parte del mundo a otra. (Redacción, 2021). Y debido a que los carretes (empaques) para los cables de fibras ópticas se elaboran de madera, se torna necesario el desarrollo de alternativas para sustituir el uso excesivo de maderas sólidas, pues la vida útil de los carretes suele ser de un año o menos, y se desechan en cuanto se instala el cable que contienen.

#### **3.1.2 Teórica**

Esta investigación aporta de manera teórica y práctica en el ámbito empresarial, directamente en el ámbito administrativo y técnico de CX, empleando herramientas de la tecnología computacional y el software de diseño internos de la compañía, que permiten ahorrar: tiempo, recursos materiales y humanos. Ya que la manera en que se realizan las diferentes configuraciones constructivas y evaluaciones digitalmente de los diferentes materiales compuestos de madera, permiten iteraciones virtuales que no requieren la compra de muestras físicas, y al momento de hacer la comparación de los resultados de la simulación digital con las muestras físicas, se confirman los resultados teóricos obtenidos. Además, se

cuenta con el apoyo del distribuidor de SOLIDWORKS® en Querétaro para revisar a detalle la posibilidad de análisis de resistencia mecánica, optimización de diseños, reducción de espesores de las láminas de madera y análisis de frecuencias (resonancia).

### **3.1.3 Metodológica**

La metodología empleada en esta investigación, se detalla en el apartado IV de esta tesis, en el que se expresa el análisis de los esfuerzos mecánicos de compresión, flexión, elasticidad y tracción de la materia sólida con análisis vectorial matemático, para cruzar dicha información con los datos comprobados en bibliografía existente de las características de la madera sólida y compuesta, al mismo tiempo que se toman como parámetros de referencia, los valores de requerimientos mecánicos de los empaques de madera en la planta de Condumex. Todo esto se procesa y evalúa en la generación de un modelo digital con la ayuda de un software profesional empleado para la simulación digital de piezas industriales, automotrices, mecánicas, de empaque, entre muchas otras.

### **3.1.4 Institucional**

Grupo Condumex Sector Cables, está conformado por cinco plantas en México, y la investigación de este proyecto sin duda será compartido con las demás cableras para que desarrollen y evalúen sus carretes y empaques de manera digital, permitiéndoles hacer los ajustes más convenientes para cada línea de negocios, y ahorrar tiempo y recursos materiales y humanos de manera sustancial de acuerdo al nivel de implementación que vayan adquiriendo y conforme sus requerimientos más apremiantes de optimización, sin tener que adquirir muestras físicas de los diferentes carretes, hasta que cuenten con una mayor certeza de su funcionalidad.

### **3.1.5 Personal y profesional:**

La aportación de esta investigación al entorno industrial y de manera más directa, al proceso del desarrollo y diseño de empaques para cables, es de gran relevancia, ya que el tiempo que actualmente se emplea en la gestión para el proyecto de un carrete nuevo es de más de 8 meses en promedio, además de la necesidad del recurso humano y de las líneas de producción es costosa y consume estos recursos en tiempo y espacio. De tal forma, que al llevar a cabo el desarrollo en simulación digital del material que conforma la estructura de los

empaques y su evaluación en el mismo entorno digital, agiliza la labor individual del diseñador o Ingeniero de Producto. Ofreciendo de manera directa, una optimización de los recursos y la adquisición del menor número de muestras físicas, las cuales cumplirán con mayor certeza los requerimientos mecánicos buscados para nuevos empaques.

### **3.2 Objetivo General**

Desarrollar un modelo digital en el programa SOLIDWORKS® (DSW), de un material compuesto a base de madera y resina, para que, a través de Evaluación de Elemento finito, se logren emular digitalmente pruebas físicas de resistencia mecánica. Sustituyendo así, el uso de muestras físicas de probetas de madera, y ahorrando recursos físicos, económicos y de personal.

#### **3.2.1 Pregunta Central de investigación**

¿Es factible emular digitalmente pruebas físicas de resistencia mecánica, en un modelo de un material compuesto de madera y resina, programado en SOLIDWORKS (Dsw), con la herramienta de Análisis de Elemento Finito?

### **3.3 Variables de investigación**

Al estudiar algunas maderas compuestas y comprimidas existentes en el mercado, se observa una gama muy amplia de diferentes compuestos, como por ejemplo: aquellos en los que se agregan polímeros poli olefínicos (como cauchos, etileno, polipropileno, entre otros) (Arylmis, 2011) o minerales como la Wollastonita (Taghiyari, 2015.) para darles mayor rigidez o mejores características de impermeabilidad al agua; además de que en su mayoría, emplean pino (75%), eucalipto (15%) y el resto de otros residuos maderables de los aserraderos más adhesivos (Rangel, 2017). Sin embargo, estas adiciones al material natural, convierten a la madera en un subproducto con posibles emanaciones de vapores que se han relacionado con afectaciones a la salud en las personas que están en contacto directo.

Además, el proceso para integrar compuestos plásticos y adhesivos, suele requerir de maquinaria especializada y varios pasos para conseguir las hojas o láminas deseadas.

De lo señalado anteriormente, se pueden discernir las variables de carácter cualitativo y cuantitativo, que se relacionan directamente con el desempeño mecánico y resistencia a la

tracción de los materiales maderables de estudio en este proyecto, y sobre todo, la definición de los elementos que representan la parte medular como entradas en la simulación digital de la madera compuesta que se desea evaluar virtualmente, para poder cotejar los resultados de simulación virtual, con los carretes físicos que actualmente se desarrollan y emplean en los productos de Condumex.

### **3.3.1 Variables Independientes**

Al tratarse de una estructura fibrosa compuesta de diferentes tejidos con funciones distintas, la madera presenta una composición no homogénea, cuya resistencia mecánica debe ser estudiada tomando en cuenta sus características anisotrópicas. Partiendo de lo anterior, las variables independientes para esta investigación son las siguientes:

- Densidad ( $\text{kg/cm}^3$ ): Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo o cantidad de sustancia celular existente en una unidad de volumen de madera.
- Dureza: Es la resistencia que opone un material a la penetración de cuerpos extraños en su estructura. Existen maderas blandas, semiduras y duras. Y de esta característica mecánica, se definen las siguientes variables, de acuerdo a la dirección en que se ejerce el esfuerzo con respecto a la disposición de las fibras de la madera:
- Compresión paralela a las fibras ( $\text{kgf/cm}^2$ ): Corresponde a la resistencia de la madera al recibir cargas o esfuerzos en dirección longitudinal o paralela a sus fibras estructurales.
- Compresión perpendicular a las fibras ( $\text{kgf/cm}^2$ ): Se refiere a la resistencia a +romperse o deformarse que presenta la madera cuando sufre cargas en dirección perpendicular (radial) a las fibras de su estructura.

Y debido a que estas variables corresponden a los datos inherentes de los materiales maderables y son conocidos, se tuvo que trabajar con los valores precargados en el módulo básico de Evaluación de Elemento Finito de DSW.

### **3.3.2 Variables Dependientes**

- Precisión del modelo matemático: la fidelidad del modelo programado en el software con respecto a las características físicas de la madera, es crucial para equiparar el desempeño real de las hojas de madera compuesta y aglutinantes.

- Utilerías del software: la versión del software determinará la cercanía con la realidad en cuanto al desempeño mecánico de la madera que se pretenda simular digitalmente.
- Costos de los prototipos: El precio físico de los diferentes modelos realizados, puede resultar oneroso, dependiendo de los compuestos utilizados en la simulación.

### **3.4 Hipótesis central de investigación**

El diseño, análisis y simulación digital de láminas de madera compuesta, a través de la evaluación con Elemento Finito en SOLIDWORKS, permitirá optimizar en tiempo y costo, el desarrollo de empaques con bridas de maderas compuestas, para los cables de telecomunicaciones, en la empresa Condumex y sus filiales de Grupo.

### **3.5 Objetivos Específicos**

- Definir las características específicas: mecánicas y estructurales de la madera; especialmente del pino y del encino, para compararlas con los valores de la madera disponible en la base de datos de SOLIDWORKS®.
- Analizar y determinar los valores de esfuerzo mecánico que soportan cotidianamente los carretes de empaque de cables, en Condumex. Y definir qué valores mínimos de esfuerzo mecánico debería obtenerse de la probeta digital desarrollada.
- Establecer los parámetros físicos y matemáticos necesarios para implementarlos en un modelo digital, que permita la simulación a esfuerzos mecánicos de madera compuesta, con el software SOLIDWORKS®.
- Definir una matriz estructural dentro del modelo digital, que simule la constitución orgánica de la madera compuesta.
- Examinar los resultados del Análisis de Elemento Finito realizado (AEF) por el software SOLIDWORKS® y cotejar con la resistencia física que ofrecen los materiales empleados actualmente para la construcción de los carretes físicos, que se usan como empaques de productos de línea en Condumex.
- Definir el costo – beneficio del desarrollo y pre-evaluación de la simulación digital de los esfuerzos mecánicos de los empaques, evitando el uso de muestras físicas.
- Proyectar la metodología de diseño digital, su análisis y evaluación a través de elemento finito, de los empaques de los productos en las demás filiales cableras de Grupo Condumex.

### **3.5.1 Preguntas Secundarias de Investigación**

- ¿Se pueden representar o simular en el software SOLIDWORKS® (DSW), todas las características constitutivas y mecánicas de la madera sólida y compuesta?
- ¿Es posible representar digitalmente en SOLIDWORKS® (DSW), la resistencia a los esfuerzos mecánicos de un material particulado de madera, dentro de una matriz de adhesivos?
- ¿Es posible programar los parámetros necesarios en DSW, para que, a través del Análisis de Elemento Finito (AEF), se genere un modelo digital de una probeta de madera compuesta?
- ¿Qué estructura deberá tener la probeta digital, para simular a la madera compuesta?
- ¿Cómo se pueden interpretar los resultados de la simulación digital del AEF del modelo de madera compuesta, comparados con la madera virgen o el MDF?
- ¿Existe un beneficio económico en la simulación y evaluación digital, comparativamente con las pruebas físicas?
- ¿Es posible utilizar en todas las plantas filiales de Condumex, este modelo de simulación digital para el diseño de materiales de empaque?

### **3.5.2 Supuestos Teóricos Secundarios de Investigación**

#### **3.5.2.1 Hipótesis central**

H<sub>1</sub>: Un modelo digital de material compuesto de virutas maderas y adhesivos, se puede diseñar y pre-evaluar a través del Análisis de Elemento Finito, para conocer su resistencia mecánica a los esfuerzos de compresión y pronosticar así, diseños robustos en muestras físicas de madera compuesta.

H<sub>0</sub>: Un modelo digital de material compuesto de virutas maderas y adhesivos, no se puede diseñar ni pre-evaluar a través de Análisis de Elemento Finito en el software SOLIDWORKS®; ni para conocer su resistencia mecánica, ni permite pronosticar digitalmente diseños robustos en muestras físicas de madera compuesta.

3.5.2.2 ¿Se pueden representar o simular en el software SOLIDWORKS® (DSW), todas las características constitutivas y mecánicas de la madera sólida y compuesta?

H<sub>1</sub>: Se deben caracterizar sólo las principales particularidades y propiedades constitutivas de la madera en el software SOLIDWORKS®, para un AEF representativo.

H<sub>0</sub>: No se deben caracterizar sólo las principales particularidades y propiedades constitutivas de la madera en el software SOLIDWORKS®, para un AEF representativo.

3.5.2.3 ¿Es posible representar digitalmente en SOLIDWORKS® (DSW), la resistencia a los esfuerzos mecánicos de un material particulado de madera, dentro de una matriz de adhesivos?

H<sub>1</sub>: El modelo digital de una matriz de adhesivo en forma de rejilla y virutas, es una representación válida, para evaluar mecánicamente, por medio de un AEF, la resistencia de una lámina física de madera compuesta.

H<sub>0</sub>: El modelo digital de una matriz de adhesivo en forma de rejilla y virutas, no es una representación válida, para evaluar el desempeño mecánico por medio de un AEF, de una lámina física de madera compuesta.

3.5.2.4 ¿Es posible programar los parámetros necesarios en DSW, para que, a través del Análisis de Elemento Finito (AEF), se genere un modelo digital de una probeta de madera compuesta?

H<sub>1</sub>: Es factible programar cada parámetro e instrucción necesaria en DSW, para la simulación de los esfuerzos mecánicos de una probeta de madera compuesta.

H<sub>0</sub>: No es factible programar cada parámetro e instrucción necesaria en DSW, para la simulación de los esfuerzos mecánicos de una probeta de madera compuesta.

#### 3.5.2.5 ¿Qué estructura deberá tener la probeta digital, para simular a la madera compuesta?

H<sub>1</sub>: La gran diversidad de estudios previos de las características anisotrópicas de la madera y maderas compuestas, permitirán diseñar digitalmente, una estructura similar a las maderas físicas.

H<sub>0</sub>: La gran diversidad de estudios previos de las características anisotrópicas de la madera y maderas compuestas, no permitirán diseñar digitalmente, una estructura similar a las maderas físicas.

#### 3.5.2.6 ¿Cómo se pueden interpretar los resultados de la simulación digital del AEF del modelo de madera compuesta, comparados con la madera virgen o el MDF?

H<sub>1</sub>: Un modelo digital adecuado permite, al Análisis de Elemento Finito, arrojar resultados de resistencia mecánica similares a los conocidos en las muestras de madera sólida o MDF.

H<sub>0</sub>: Un modelo digital adecuado no permite, al Análisis de Elemento Finito, arrojar resultados de resistencia mecánica, similares a los conocidos en las muestras de madera sólida o MDF.

#### 3.5.2.7 ¿Existe un beneficio económico en la simulación y evaluación digital, comparativamente con las pruebas físicas?

H<sub>1</sub>: La pre-evaluación mecánica de un modelo digital a través de AEF, ofrecerá reducción de tiempos de evaluación y costos, al eliminarse 90% de las pruebas en muestras físicas de empaques, para los productos de Condumex.

H<sub>0</sub>: La pre-evaluación mecánica de un modelo digital a través de AEF, no ofrecerá reducción de tiempos de evaluación y costos, al eliminarse 90% de las pruebas en muestras físicas de empaques, para los productos de Condumex.

3.5.2.8 ¿Es posible utilizar en todas las plantas filiales de Condumex, este modelo de simulación digital para el diseño de materiales de empaque?

H<sub>1</sub>: La evaluación y diseño de materiales a través del Análisis de Elemento Finito en SOLIDWORKS®, es una herramienta que puede emplearse de manera inmediata en todas las Plantas filiales de grupo Condumex.

H<sub>0</sub>: La evaluación y diseño de materiales a través del Análisis de Elemento Finito en SOLIDWORKS®, no es una herramienta que puede emplearse de manera inmediata en todas las Plantas filiales de grupo Condumex.

### **3.6 Alcances y Limitaciones**

La tesis exhibida, presenta el estudio y generación de un modelo digital en el software SOLIDWORKS®, a través del cual, se obtiene una valoración multifactorial en el diseño y evaluación de un material compuesto de madera y una matriz adhesiva, que se lleva a cabo con el Análisis de Elemento Finito del modelo. Con dicho modelado virtual del material compuesto, se logrará pre-evaluar su resistencia mecánica a la compresión o falla, con lo que se reducirá sustancialmente el tiempo de pruebas físicas de este material con el que se fabricarán los carretes de empaque en la empresa Condumex, consiguiendo también la reducción de costos al evitar la destrucción de muestras de empaques físicos y optimizando así de manera general el desarrollo de empaques.

#### **3.6.1 Recursos Materiales**

A continuación, se enlistan los recursos materiales empleados en la realización de este proyecto:

- Computadora(s) con sistema operativo Windows10™ o superior.
- Software Microsoft Office®
- Acceso a Internet con velocidad mínima de 30Mbps.
- Software SOLIDWORKS®, con utilerías de AEF.
- Software Autodesk® AUTOCAD® 2019.
- Software de análisis de datos, analítica predictiva y mejora de procesos, Minitab®.

- Sistema ERP SYMIX® (SyteLine™), con licencia en Condumex.
- Equipo de laboratorio para pruebas mecánicas, de la Marca Zwick/Roell®, en laboratorio de materias primas, Planta Condumex.

### **3.6.2 Recursos Financieros**

Se mencionan como un factor de gran importancia en cualquier desarrollo o investigación, y los gastos totales en la adquisición de los materiales, proceso, evolución y finalización de este proyecto, fueron a cargo del que suscribe.

### **3.6.3 Acceso a la información**

Las primeras fuentes de información corresponden a los datos técnicos y características de las maderas sólidas obtenidas de publicaciones de investigación documental, pues corresponden al material medular del proyecto. La segunda parte de la información, se origina de los datos económicos propios del costo de los empaques para los cables de fibras ópticas de Condumex, obtenida de la base de datos de su principal ERP SyteLine, y el tiempo que se emplea para el desarrollo de los mismos. Por último, se obtienen datos generales del funcionamiento y resultados del Análisis de Elemento Finito que emplea el programa SOLIDWORKS®, ya que con él se realizará la simulación y pre-evaluación de los diseños de empaques de esta tesis.

### **3.6.4 Permisos**

Se cuenta con la autorización del manejo de la información propiedad de Condumex y el uso de los diferentes softwares señalados anteriormente, pues se cuenta con las previas licencias de uso a nivel empresarial, y su empleo no será con el afán de lucro personal ni ajeno a los intereses de la empresa.

### **3.6.5 Limitaciones de la investigación**

El proyecto de investigación que se presenta, está limitado temporalmente al periodo comprendido entre el mes de septiembre del año 2022 hasta el mes de agosto del año 2024. El desarrollo del producto a evaluar, se limita a los alcances del análisis de elemento finito que ofrece el programa SOLIDWORKS® y con ello, su alcance original será sólo para el desarrollo y pre-evaluación de empaques para la empresa Condumex, planta San Juan del Río, Qro. Y

se concluye que los resultados obtenidos de la simulación digital de la madera compuesta, mostrarán la delimitación conceptual, y al evaluar físicamente los resultados de resistencia mecánica de la madera sólida y compuesta, se tendrá la delimitación física empírica y práctica o comprobación de la virtualización del compuesto desarrollado.

## **CAPÍTULO IV. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL**

Este apartado presenta el cúmulo de la información que se requiere observar globalmente, y que explica al desarrollo de esta investigación.

### **4.1 Generalidades de la madera y su importancia en industria de las telecomunicaciones**

La madera se ha empleado durante siglos para un sinnúmero de aplicaciones en los hogares, las edificaciones, la industria y prácticamente en todos los espacios habitados por la humanidad. Se ha empleado como un recurso fundamental para la fabricación de muebles, soportes estructurales, como recurso auxiliar del transporte, manejo y envío de productos y materias primas, entre otros; así como en la construcción de casas y edificios. Y a pesar de su gran importancia en la industria, la madera es considerada como un material auxiliar, para usarse principalmente en la elaboración de empaques, tarimas y demás sub productos que permitan el manejo, transporte y/o almacenamiento de los productos que serán enviados al cliente final; siendo esta última aplicación, algo de gran importancia en todo el sector productivo industrial.

Ahora bien, este uso indiscriminado de los recursos maderables a nivel global, ha traído consigo, un gran desabasto de madera y sus derivados, que se incrementa año con año (Redacción, 2021); pues no sólo la deforestación mundial, pone en riesgo el acceso a estos recursos, sino que también, el cambio climático agudiza a pasos agigantados este problema de escasez, generando muchos más incendios forestales agudizando el problema de manera intrínseca. Y a pesar de lo señalado en los reportes del 2022 de la FRA (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022) acerca de la situación de los bosques en el mundo, y que se puede observar una ligera reducción en el índice de deforestación mundial de aproximadamente 5% en la última década (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022).

Es un hecho que la deforestación global no se ha detenido, y al ritmo actual, en menos de cien años, probablemente no exista ni una hectárea de bosques primarios en el mundo.

Estos ciclos de altibajos en la disponibilidad de recursos maderables y al finalizar los grandes conflictos bélico militares mundiales, propiciaron de manera casi forzada que, desde finales del siglo XIX se buscaran alternativas de materiales como la madera compuesta, y fue en Alemania, donde surgió el término Madera Comprimida [Compressed Wood. s.f.]. para hacer referencia a los incipientes aglomerados, a base de virutas de madera y pegamentos que surgieron en la industria; y después de la segunda Guerra Mundial, fue cuando la escasez generalizada de materiales, empezó a fortalecer la tecnociencia y con ello, la fabricación de maderas comprimidas, también conocidas como prensadas, aglomeradas o particuladas.

Pero no es, sino hasta finales del siglo XX y durante los siguientes años, cuando se vuelve fundamental la búsqueda de alternativas al uso de madera virgen o sólida; debido al desabasto mundial de recursos maderables (Sanchis, 2021) agudizado por la deforestación global (Kattosová, 2021); y no se debe menoscabar el impacto que tuvo en los recursos forestales la pandemia mundial de COVID-19, pues ciudades que antes mantenían un ingreso económico por su labor industrial y comercial, tuvieron que aprovechar la venta y consumo de madera como combustibles y materiales de construcción, pero esta utilización se hizo en gran medida, de manera desordenada y sin regulación de las oficinas correspondientes de cada país en donde se presentó la tala ilegal de recursos forestales (The social-economic impact of COVID-19 pandemic: implications for potencial forest degradation., 2020).

#### **4.1.1 Ecosistemas Forestales y desabasto de maderables en la industria**

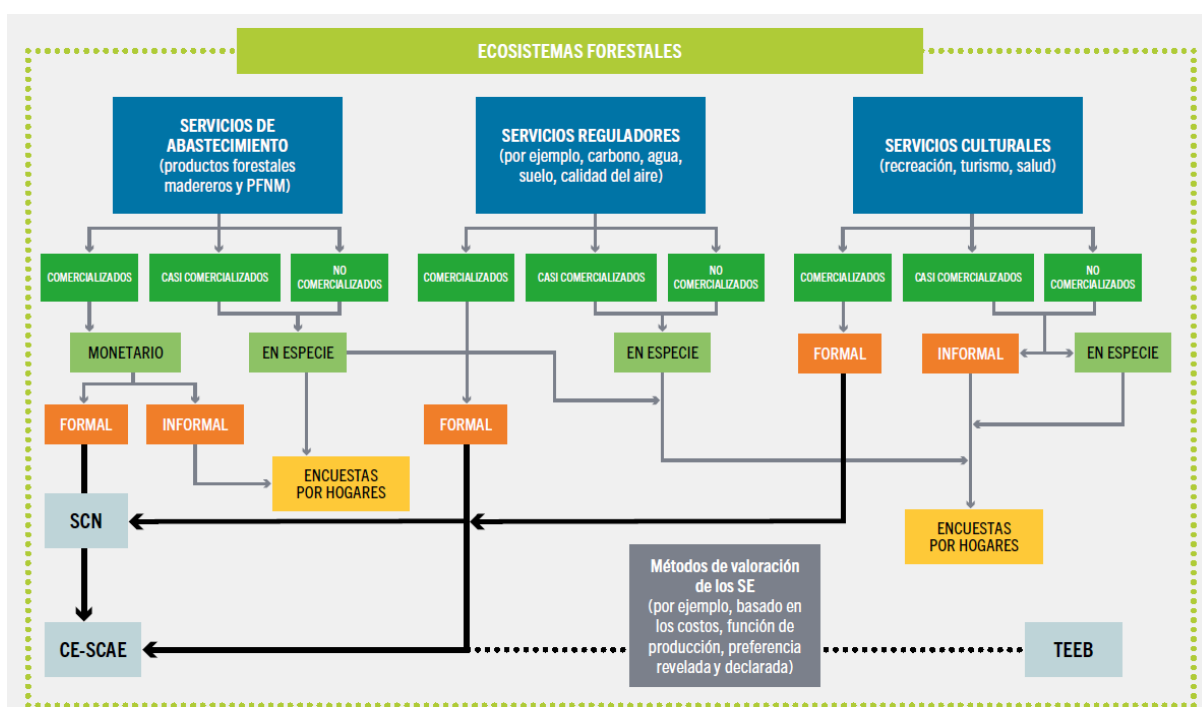
En México, el problema de desabasto de recursos maderables, se agudizó a partir del segundo semestre del año 2019 (Becedas, 2021), afectando a todos los sectores industriales, pues la madera es uno de los principales insumos llamados materiales básicos auxiliares para el embalaje, transporte y almacenaje a través de empaques y entarimados o pallets; en la empresa Condumex, dicha escasez presentó grandes retos para resolver el inconveniente, pues la demanda de fabricación de cables para Telecomunicaciones en México y América latina de incrementó drásticamente con la llegada de la pandemia de COVID19, pues se disparó la necesidad mundial de redes de distribución con cables de fibras ópticas, para la instalación de nuevos enlaces de internet en las ciudades de todo México y Latinoamérica.

Esta repentina urgencia y necesidad por la conectividad digital se agudizó, debido al confinamiento de gran parte de la fuerza trabajadora y del alumnado en todos los niveles, nivel global. Al mismo tiempo, se incrementó el uso de embalajes de madera para poder distribuir los insumos que se emplean para la instalación de estas redes de internet en los hogares, tiendas, centros de servicio, escuelas, oficinas entre otros y fortalecer los enlaces industriales (Dutta, 2021).

De tal manera que el sobreconsumo de recursos maderables fue global e intensificó el círculo de insuficiencia. A través de la Figura 13 se logra visualizar y entender a los Ecosistemas Forestales, y en qué parte se ubica la demanda por la madera, en el ramo empresarial:

**Figura 13**

*Diagrama global de los Ecosistemas Forestales*



**Nota.** SE= Servicios económicos; PFM= Productos forestales no madereros; CE-SCAE= Contabilidad de los ecosistemas, sistema Contable ambiental y económica; SCN = Sistema de cuentas nacionales; TEEB= economía de los ecosistemas y la biodiversidad. Adaptado de *El Estado de los Bosques del Mundo 2022*, por Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022, FAO <https://openknowledge.fao.org/items/cc62f03d-01c7-401f-8260-89cd916c6b3f>. CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Con el incremento en la demanda y producción de cables de fibras ópticas en Condumex, y cubrir con ello, los requerimientos de las compañías de internet y televisión por cable, se agudizó la escasez de recursos maderables, provocando así tiempos de entrega muy grandes para los productos de la industria de las Telecomunicaciones, pues no se contaba con pallets y empaques suficientes a nivel global. En otras palabras: comenzó a escasear la madera sólida en todo el mundo, y ésta última, como se menciona al principio, ha sido empleada durante décadas, como material auxiliar para la construcción de tarimas, pallets y empaques finales, para los cables. (Redacción, 2021)., al igual que cientos de miles de productos en el mercado mundial.

Y desde siempre, la madera y recursos forestales que han servido a las diferentes ramas productivas en el mundo, se encuentran infravalorados en los sistemas económicos (Rametsteiner, 2022)., y esto inevitablemente provoca la volatilidad en su precio y su intermitencia de disponibilidad y regulación gubernamental.

#### **4.1.2 Calidad de maderables en la industria**

Durante el periodo comprendido desde finales del año 2019 a la fecha, CX detectó calidad inferior en los insumos maderables recibidos, como se muestra en las Figuras 14 y 15, donde pueden verse duelas con hongos y carretes mal ensamblados, ambos con tablas de tercera clase, esta calidad deficiente provoca rechazos en la gestión de Calidad de Condumex.

**Figura 14**

*Tarimas con hongos*



*Nota. Elaboración propia, 2020*

**Figura 15**

*Carrete con brida con falla estructural*



*Nota. Elaboración propia, 2020*

Y la justificación de los proveedores fue siempre que había un desabasto crítico de la madera virgen y que no podrían suministrar, tarimas, duelas ni carretes con la misma calidad recibida anteriormente, ni aseguramiento en la cantidad que se recibía hasta antes del comienzo de la pandemia de COVID19 (finales del 2019 en América). La situación se tornó grave, pues no se dispuso de suficientes empaques y pallets de madera para el envío de los productos de Condumex a sus clientes, generando un desfase mayor a 10 días en los tiempos de entrega.

## **4.2 Materiales sustitutos de la madera sólida**

En la actualidad, se cuenta con varios tipos de maderas comprimidas y aglomerados en el mercado industrial, y que son variantes modernas y optimizadas de aquellas que surgieron originalmente como una alternativa después de la segunda guerra mundial. Estas maderas, también llamadas particuladas, suelen ser más ligeras y otrora más económicas, comparadas con las maderas sólidas o naturales (Buenrostro Mercado, 2022).

Se tienen maderas comprimidas como los MDF (Medium Density Fiberboard), prensadas, aglomeradas y particuladas. Y todas ellas tienen en común la utilización de adhesivos para su conformación con temperaturas elevadas bajo un proceso de compresión de varios cientos de lbf/cm<sup>2</sup>.

### **4.2.1 Generalidades del MDF o Aglomerados de madera**

El término MDF corresponde a las siglas de Medium Density Fiberboard, y con éste se identifican a la mayoría de las láminas de maderas comprimidas que se elaboran a partir de pequeñas virutas, desperdicio y polvo de madera, que se muelen en una máquina llamada desfibradora, hasta conseguir un polvo homogéneo, el cual se mezcla con resinas a base de formaldehído, y se les aplica presión a altas temperaturas para crear hojas de este material.

Este material conocido comercialmente como MDF, obtiene diferentes cualidades de dureza o densidad, dependiendo de la composición de la mezcla de maderas empleada y de la cantidad de adhesivos o películas protectoras que se le apliquen como producto terminado. Y en todos los casos, una de las principales características del MDF es su apariencia tersa y uniforme como puede notarse en la Figura 16; pero, sobre todo, suelen ser materiales de precios asequibles y que ofrecen gran facilidad de manejo para la fabricación de muebles.

**Figura 16**

*Hoja de MDF comercial*



*Nota.* Adaptado de *MDF ARAUCO*, por THE HOME DEPOT, 2023, THE HOME DEPOT <https://www.homedepot.com.mx/s/arauco?marca=arauco>. CC BY 2.5

#### **4.2.2 Características de otras maderas comprimidas**

Al igual que el MDF, para su elaboración se emplean virutas de madera; pero la diferencia principal de las llamadas *maderas comprimidas*, radica en el tamaño de las partículas que las constituyen, y estas tienen de 3 a 7 milímetros de longitud; estos materiales buscan formar una especie de retícula con el acomodo aleatorio de las fibras. De la misma forma que se procesan las maderas particuladas, a este material se le adicionan resinas con base formaldehído y adhesivos, con concentraciones muy bien conocidas, tal como se menciona en el capítulo 5 del libro *Reactive Polymers Fundamentals and Applications (Second Edition)*. (Fink, 2013). Estas suelen ser del rango entre 1.2 a 1.9 mol de formaldehído por mol de fenol, y catalizadores del 0.5% al 3%.

Los paneles de Fibra de Media Densidad Particulada (MDP) o aglomerados, están compuestos por una matriz adhesiva sintética y una fase de refuerzo que se integra por las partículas de las virutas o granos y polvo de la madera, que son compactados por la aplicación de calor y presión a la consolidación del panel; generalmente las partículas se disponen en capas, y el

adhesivo sintético está compuesto por resinas termoestables a base de urea-formaldehído, que es el aglutinante, emulsión de parafina, que mejora la propiedad no higroscópica del panel; y un catalizador como el cloruro de amonio, cuya función es la de agilizar el curado de la resina durante el proceso y ciclo de prensado con calor. (Lopes Silva, 2013). Esta composición tan peculiar de las maderas aglomeradas y comprimidas les otorga una apariencia más gruesa y rugosa, aunque al tacto no necesariamente lo sean, como se puede observar en las Figuras 17 y 18.

**Figura 17**

*Ilustración de maderas aglomeradas*



**Figura 18**

*Ilustración de maderas comprimidas*



*Nota.* Adaptadas de *MDF o Tablero DM: Ventajas y Desventajas*, por MAJOFESA maderas, 2020, MAJOFESA, <https://www.majofesa.com/mdf-o-tablero-dm-ventajas-y-desventajas/>. CC BY 2.5

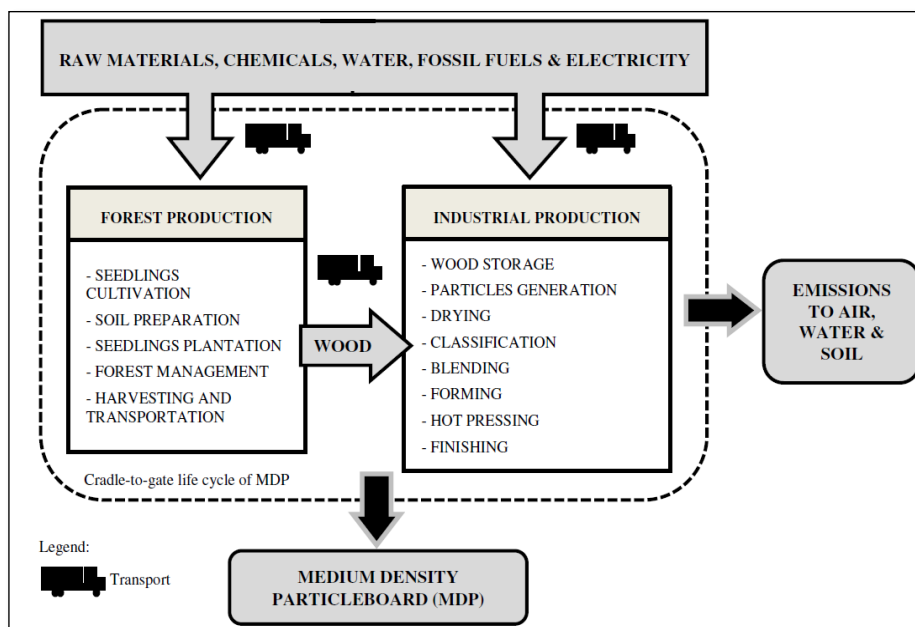
También es de importancia, conocer el ciclo de vida de los paneles o tableros de madera de media densidad, mostrado en la Figura 19; ya que, debido a su constitución, la vida promedio de utilidad es mucho menor al que ofrece la madera natural o sólida, y esta situación contrapone su precio contra su desempeño y durabilidad en la industrial.

El diagrama anterior resume el ciclo vida de las maderas particuladas o aglomeradas por sectores, desde los suministros de las materias primas, hasta la disposición del transporte para su distribución una vez conformadas en MDP, y debido a la uniformidad de las láminas que se obtienen, éstas pueden transportarse y almacenarse con mayor facilidad y estar disponibles para diferentes ramas de la industria, ocupando espacios perfectamente delimitados, gracias a que presentan características bien definidas y bajo estándares de composición y calidad, lo

que representa una ventaja cualitativa con respecto a la madera sólida, ya que esta última tiende a deformarse al irse deshumidificando o al estar en contacto con fuentes de calor o la luz solar directa.

**Figura 19**

*Ciclo de vida de los tableros de MDP*

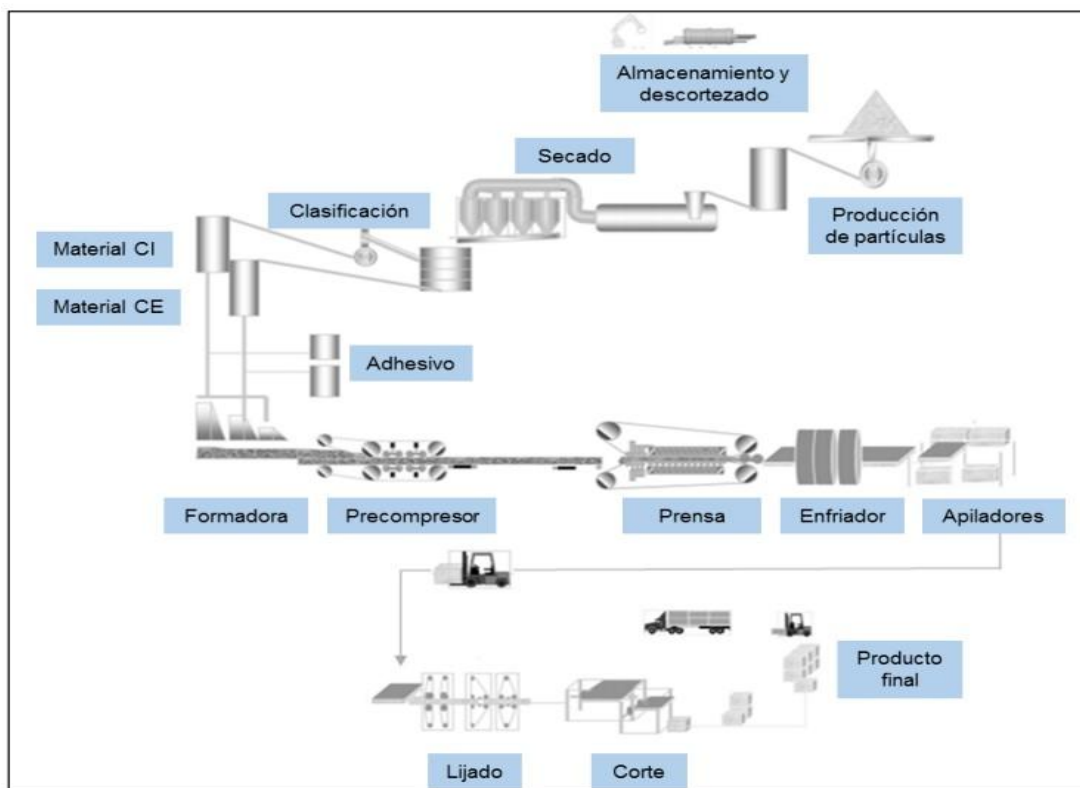


*Nota.* El gráfico representa el ciclo completo de la fabricación, los insumos para su elaboración y los desechos que produce, hasta su distribución. Tomado de “Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil” (p. 1406), por D. Lopes, et al., 2013, *Springer*, 18(13).

Así mismo, la elaboración de maderas comprimidas, permite el aprovechamiento de virutas y sobrantes de maderas diversas, logrando circularidad en los recursos maderables y permitiendo la fabricación de las láminas o paneles a partir de residuos de maderas que de otra forma, terminarían como desechos, combustibles o composta en el medio ambiente; es decir, las maderas procesadas, corresponden a un subproducto terciario, que aprovecha al máximo la vida útil de la madera una vez que ya no puede ser empleada como tablonos o vigas, entre otros usos de primer orden (Biberos *et al.*, 2019). Los pasos para la elaboración de las MDP se pueden visualizar en la Figura 20.

**Figura 20**

*Proceso de fabricación de tableros MDP*



*Nota.* El esquema representa muestra el proceso de la fabricación, de los tableros de MDP. Tomado de “Actividad 9: Análisis de Ciclo de Vida de Mobiliario de Melamina” (p. 33), por K. Biberos, et al., 2019, PUCP, 9(19).

#### **4.2.3 Materiales compuestos (maderas compuestas)**

Al grupo de maderas prensadas o procesadas, al que se le agregan diferentes materiales o compuestos, se les conoce como Maderas Compuestas (S.N.); y estos compuestos adicionados a la mezcla de la viruta, polvo de maderas y adhesivos para la conformación de MDF y/o maderas comprimidas, generalmente son nano partículas de celulosa, polímeros poliolefínicos (esencialmente mezcla de varios cauchos amorfos como el etileno, propileno, de plásticos de poli olefinas semicristalinos, tales como el polipropileno (entre otros) o de minerales (como la Wollastonita). Resulta interesante estudiar cómo se ha buscado la manera de incrementar el rendimiento de la cantidad del material maderable para la fabricación de

empaques o pallets y tarimas, al mismo tiempo que se busca incrementar la resistencia de estas maderas procesadas o prensadas, y en gran medida se ha conseguido a través de la adición de diferentes materiales o compuestos, como los señalados anteriormente.

#### **4.2.3.1 MDF con Nano Wollastonita**

Uno de los materiales compuestos más interesantes y desarrollado en MDF, es el presentado por Taghiyari y Nouri (2015)., en *Effects of nano-wollastonite on physical and mechanical properties of medium-density Fiberboard*, donde explican que utilizando diferentes concentraciones de nano-wollastonita (NW): 5, 10, 15 y 20 g/kg y un tamaño de partículas de entre 30 y 110 nm de wollastonita, en una mezcla de fibras secas de virutas de madera, éste mineral del grupo de los silicatos (con fórmula  $\text{CaSiO}_3\text{-Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$  ), se adhiere con gran facilidad sobre la superficie de las láminas del MDF sin modificar su densidad de 0,67g/cm<sup>3</sup> (promedio); cumpliendo con lo señalado en la norma ASTM D-1037 en cuanto a desempeño mecánico e inclusive, que aumenta la resistencia y la integridad entre las fibras de madera en los paneles NW-MDF. Esta placa de MDF puede verse en la Figura 21, antes de ser comprimida.

**Figura 21**

*Placa de MDF con NW, antes de la compresión*



*Nota.* Adaptado de “Adsorption of Nanowollastonite on Cellulose surface: Effects on physical and mechanical properties of medium-density fiberboard (MDF)” (p.2), por R. Majidi, et al., 2016, *CERNE*, 22(2).

En este estudio de Taghiyari y Nouri (2015)., se replica con algunos detalles adicionales en el trabajo presentado por Majidi (2016), y se concluyó que la NW mejoraría las propiedades mecánicas en los paneles de MDF como material compuesto de madera (con mayor resistencia de hasta un 27%), además de ser eficaz para mejorar su resistencia al ataque biológico por hongos, aumentar su capacidad de aislamiento térmico y disminuir la permeabilidad de los líquidos (hasta en un 15%), resultados comparados con el MDF sin NW. (Majidi, 2016.).

#### **4.2.3.2 MDF con polipropileno en polvo (PP)**

Este es uno de los materiales compuestos de gran comercialización para la fabricación de tarimas o pallets en la industria. Consiste en mezclar PP en polvo con viruta y polvo de madera (generalmente eucalipto y maderas de crecimiento rápido), en proporción de 50:50, logrando obtener una reducción de hasta 31% en la cantidad de absorción de agua y un 60% en la reducción de expansión del espesor de la hoja de MDF compuesto; lo anterior con precalentamiento de las fibras de la madera, pues se pudiera concluir que las partículas de madera más secas se adhieren con mayor eficacia al polvo de PP. Pero, por otro lado, este proceso debilita las hojas de MDF compuesto, demostrando una reducción de hasta el 11% del Módulo de Elongación en las hojas de MDF en los cuales se hizo el pre-tratamiento térmico de las partículas de madera antes de mezclarse con el PP. (Ayrylmis, 2011).

#### **4.2.4 Procesos industriales para fabricar maderas comprimidas**

Se sabe que, para lograr hojas de maderas procesadas o particuladas, laminadas o comprimidas, se requiere de dos elementos principales: virutas, residuos de madera virgen y adhesivos; así como de dos variables del proceso: compresión y temperatura adecuadamente altas; comúnmente, la composición y el aspecto que tienen la mayoría de estas láminas de madera comprimida muestran virutas de gran tamaño y de medidas irregulares y aleatorias, como puede observarse en la Figura 22.

Esta combinación de adhesivos a base de formaldehído, urea y fenol como lo menciona Fink (2013), hace que las maderas comprimidas no sean atacadas por los insectos, como lo hacen regularmente a la madera sólida; sin embargo, se sabe que pueden emanar gases considerados como cancerígenos.

## Figura 22

*Apariencia superficial de Madera Comprimida*



*Nota.* Adaptado de *Pedazos de madera en Lámina de madera comprimida*, por dreamstime.com, 2023, <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-textura-de-madera-tablero-osb-para-la-decoraci%C3%B3n-del-fondo-image99487954>, LIBRE DE DERECHOS FOTO DE STOCK.

En general se puede partir de condiciones de proceso para la compactación, tal como lo señala RANGEL (p.376. 2017)., con una presión aproximada de 14,71 MPa (150kg/cm<sup>2</sup>) y con una temperatura promedio de los platos de la prensa de 180°C a 200°C, con un tiempo de prensado total de 9 minutos para una densidad teórica de 750kg/m<sup>3</sup> y 18 minutos para una densidad teórica de 850 kg/m<sup>3</sup>.

Por otro lado, reportes como los de Chanda y Bhattacharyya, (2021)., señalan que se puede dar mejor desempeño mecánico y mostrar menos contracción de aglomerados machihembrados, aplicando temperaturas de hasta 250 °C, pero en tiempos breves de 1.34 minutos, en promedio. Por su parte, Wang (2012) señala que un preformado de los colchones de madera aglomerada antes de ser curada con la aplicación de temperatura, se le puede agregar una mayor resistencia mecánica a la fractura de estas hojas; este preformado se logra, ejerciendo presión durante algunos segundos (hasta 60) a temperatura ambiente, sobre los paneles; aunque en sus resultados, ambos autores concluyen que sólo se logró desplazar la humedad en las muestras, por lo que se obtuvieron valores poco confiables, respecto al aumento en sus características de resistencia a la deformación bajo presión axial de las muestras.

Con la información general de las diferentes maderas procesadas, prensadas o comprimidas, con las que se cuenta en el mercado, observa que todas llevan un proceso estándar en su elaboración y que sólo varía su desempeño mecánico básicamente por 2 factores en el proceso de fabricación: la temperatura y el tiempo de compresión o curado; y un tercer factor fundamental es el adhesivo empleado, ya sea puro o mezclado con materiales plásticos, minerales o de origen vegetal, este último, será crucial para las propiedades de desempeño mecánico que presentarán las láminas de madera comprimida.

#### **4.2.5 Análisis de adhesivos para maderas comprimidas**

Como ya se ha mostrado anteriormente, las características y especificidad de los adhesivos, es medular, para la elaboración de las maderas comprimidas o particuladas; y estos, se han desarrollado desde 1896, donde Víctor Moritz Goldschmidt describió precipitados en soluciones de urea y formaldehído cuando se hacían reaccionar en un ambiente ácido. Goldschmidt identificó de manera empírica el precipitado primario como  $C_5H_{10}O_3N_4$ . (Fink, 2013). Según a Fink (2013) las soluciones acuosas para formación de estos adhesivos, varía en cantidad de Formaldehído desde un 37% hasta un 50%, más Urea en solución acuosa, Amoníaco en concentración típica del 28%, con pequeñas adiciones de Di cetonas y Dimetoxi Etanol (pp. 179-180). También se señalan los residuos de los adhesivos basados en formaldehídos por otros autores, quienes indican los diferentes componentes con mayores emanaciones (Little, 2012).

### **4.3 Responsabilidad Social y Ambiental**

Por otra parte, desde hace más de una década, se han buscado mejoras y nuevos componentes en los adhesivos para las maderas industrializadas; pues se sabe que el formaldehído emite gases que pueden ser cancerígenos, por ello, se han hecho desarrollos, como el mencionado por (Yang, 2009.), quien comenta en su estudio, que la okara, que es el residuo de la elaboración de tofu, se ha empezado a desarrollar como un adhesivo biológico, pero se tiene que hidrolizar con solución de ácido sulfúrico al 1% y solución de hidróxido de sodio al 1%; este adhesivo dio excelentes resultados después del reticulado por calor, en el proceso normal de la elaboración de MDF. Este estudio sólo quedó en fase de pruebas pues no se tiene reporte de algún producto de madera comprimida, disponible comercialmente, que utilice este adhesivo a base de okara.

También se han realizado estudios del ciclo de vida en el proceso de manufactura del MDF, tal como lo muestra Piekarski (Piekarski, 2016), quien señala que los recursos más costosos para su elaboración, es el gas natural o combustibles que se deben emplear para el horneado o curado de las láminas de maderas comprimidas y sin dejar de tomarse en cuenta los recursos personales y los tiempos de traslado de la viruta para realizarlas. Diferentes autores han presentado el análisis del ciclo de vida de las maderas procesadas, y en general, lo hacen bajo el marco metodológico del Análisis del Ciclo de Vida como lo presenta Biberos *et al.*, (2019)., tomando en cuenta el marco de la gestión ambiental basado en los requisitos de ISO 14040:2006. (5, 2006) e ISO 14044:2006. (/1, 2006), donde se puede revisar el listado y valoración de las entradas, salidas y los potenciales impactos ambientales del proceso de producción de estas maderas industrializadas.

Dicho lo anterior, y debido a que CX es una compañía con el distintivo de Empresa Socialmente Responsable (**CONDUMEX, S.A. DE C.V., 2022**), en lo referente a la Gestión Ambiental, se encuentra evaluada bajo la norma ISO 14001:2005, y por ello busca cubrir con acciones y participación en programas ambientales como Industria Limpia, Cumplimiento Ambiental Voluntario y Programa de Liderazgo Ambiental para la Competitividad, llevando a cabo actividades locales en cada ciudad donde tiene gestión empresarial.

Todo el contexto mundial referente al cuidado ambiental y la responsabilidad social de las empresas en el uso de los recursos y sus emisiones, permeó desde hace años en Grupo Carso, al grado de generar conciencia en el proceso de diseño y desarrollo de los carretes para empaque de sus productos, y se le dio importancia a la búsqueda de la reducción del desperdicio de madera virgen y procesada, así como el interés en mejorar los tiempos de desarrollo en los prototipos de nuevos diseños, basados en los datos mostrados en la Tabla 4 (*Precios y tiempos de desarrollo de prototipos de carretes, octubre 2023*). Pues es imperiosa la necesidad de disminuir el gasto en desarrollos físicos de empaques y al mismo tiempo el desperdicio de maderas que se produce con estas muestras físicas.

#### **4.4 Activos involucrados en el desarrollo del modelado virtual**

Al conocer con mejor detalle la situación comercial y de disponibilidad de los recursos maderables en México, así como el creciente desabasto que presentan a nivel global, se analizan diferentes áreas de oportunidad para la optimización de los recursos financieros de

Conдумex disponibles de manera específica para el rubro que representan los empaques de los cables de fibras ópticas en la Planta de San Juan del Río, Qro., y a su vez se definen los activos y pasivos que intervienen directamente en el proceso del desarrollo de dichos empaques. Es así como se fortalece la idea de llevar a cabo la digitalización y simulación del diseño y pruebas mecánicas de desempeño de los empaques de madera procesada, a través de un programa de computación que ofrezca el Análisis de Elementos Finitos.

#### **4.4.1 Activos**

Por definición, los activos de una empresa, corresponden a los bienes y/o recursos con los que cuentan en su totalidad; y se clasifican en:

**Circulantes** como: el efectivo, valores negociables, inventarios, inversiones, entre otros.

**Fijos** como: la Planta (edificios), los equipos, software y hardware, principalmente (Block, 2013).

Pero también se han integrado a los análisis administrativos y de ingeniería, los bienes que no ni materiales ni de inversión, éstos son:

**Intangibles**, como: el conocimiento operativo de los empleados, patentes, lealtad clientelar, el conocimiento acumulado del personal en áreas de diseño y desarrollo, principalmente. Y estos últimos recursos ayudan y dan soporte para la supervivencia y la toma de decisiones, para beneficios a largo plazo de las empresas, este capital es llamado Capital Humano (Hellriegel, 2009).

Esta tesis demostrará reducción de costos en el desarrollo de los empaques de madera para los productos de fibras ópticas de Conдумex, que derivará en beneficios económicos, así como la optimización del diseño y reducción en el número de muestras físicas de los carretes en estudio, durante su desarrollo y evaluación. Esto resulta muy valioso, no sólo en el ámbito administrativo al requerir menos horas-hombre en Planta para el proceso, sino también, en la reducción del uso de subproductos maderables que, a su vez, se reflejará beneficio para disminuir el consumo de recursos forestales. Y para lograr todo lo anterior, será fundamental emplear los Activos Fijos de la empresa y, sobre todo, los Activos Intangibles, pues con ambos, se realizará la simulación digital que se explicará en el capítulo V.

## 4.5 Estudio de la resistencia mecánica de la madera

Este proyecto se basa en el diseño virtual de un material que sustituya a la madera sólida y al MDF convencional con los que se fabrican los carretes de empaque de los cables de fibras ópticas. Por ello, es indispensable definir de manera concisa las características a evaluar en el modelo digital que se elaborará, así como entender por qué se vuelve una herramienta confiable el AEF del software SOLIDWORKS® que será usado con este fin.

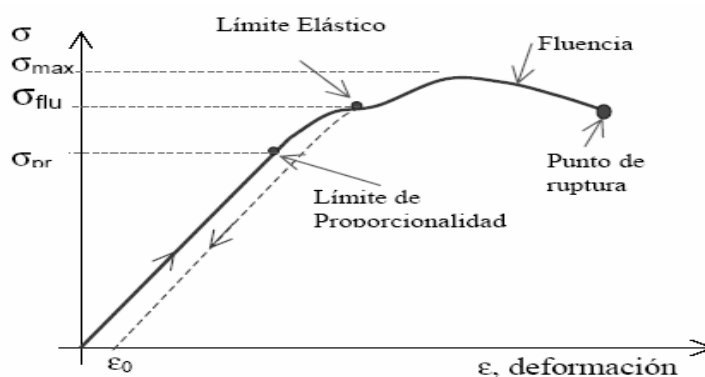
A continuación, se definen las características mecánicas de la madera y la fundamentación del AEF, por ello, es conveniente entender los siguientes conceptos teóricos de la resistencia a los esfuerzos que presenta la madera virgen en general.

### 4.5.1 Características mecánicas de la madera

Como se ha definido en antecedentes, las características de resistencia de la madera varían dependiendo de la dirección con la que se aplican las fuerzas, respecto a las fibras constitutivas de la misma. En la Figura 23., se puede observar la representación general del desempeño mecánico que sufren las maderas nominalmente, considerando una humedad relativa del 12% en la muestra.

**Figura 23**

*Gráfica de carga vs deformación general de la madera*



Nota. Adaptada Curva esfuerzo-deformación, por RESEARCHGATE, 2006, <https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Montoya-Arango-2/publication/237041185/figure/fig1/AS:393095817515009@1470732754996/Figura-1-Curva-esfuerzo-deformacion.png>, CC BY 3.0

Se debe tomar en cuenta que la tenacidad o resistencia a la deformación de las maderas, dependerá en gran medida al espesor celular, y la variación de los resultados que se presentan dependen de la dirección en la que se ejerce la fuerza con respecto a la orientación de los anillos, así como la cantidad de humedad (CH) (Dávalos *et al.*, 2010); y estas características o pueden ser definidas de manera detallada en ningún software disponible comercialmente, para el realizar análisis de deformación o resistencia, aún con AEF. Y debido a que se realizará un modelo digital del material alternativo a la madera sólida, el problema radica en establecer la programación que arroje un valor más cercano al requerimiento de la simulación digital en SOLIDWORKS, para la caracterización de madera comprimida compuesta de pino, encino y adhesivos.

#### **4.5.2 Características anisotrópicas de la madera**

La madera, al igual que la mayoría de los materiales cristalinos, muestra características anisótropas, es decir, que posee propiedades físicas distintas según la dirección en la que se mide o se ejercen fuerzas externas sobre sí (RAE, 2023).

##### **Compresión paralela a las fibras**

Se refiere a la resistencia que presenta la madera a cargas aplicadas en el mismo sentido de sus fibras o axialmente. Los valores nominales obtenidos para diversos tipos de maderas y muestras con humedad relativa del 10% al 12%, van desde 100 kgf/cm<sup>2</sup> hasta 1600 kgf/cm<sup>2</sup>; y para coníferas en México (Dávalos *et al.*, 2010), se han reportado valores promedio de 450 kg/cm<sup>2</sup>, con proporcionalidad del 75% para deformaciones de hasta el 60%.

##### **Compresión perpendicular a las fibras**

Corresponde a la resistencia que ofrece la madera cuando se somete a una carga aplicada perpendicularmente a sus fibras estructurales, también se conoce como carga radial laminar.

Esta resistencia se modifica o altera de acuerdo las condiciones de las siguientes propiedades:

- Mayor o menor humedad. Suele aumentar hasta un máximo de 30% su resistencia cuando la madera muestra un punto de saturación.
- El valor de compresión axial es quince a diecisiete veces mayor al registrado de la resistencia en dirección perpendicular a las fibras.

- Como en todas las pruebas mecánicas, los valores arrojados dependen directamente de la calidad del corte, y de la especie de la madera. Mientras mayor densidad, mayor serán los resultados de resistencia a las fuerzas que reciben.

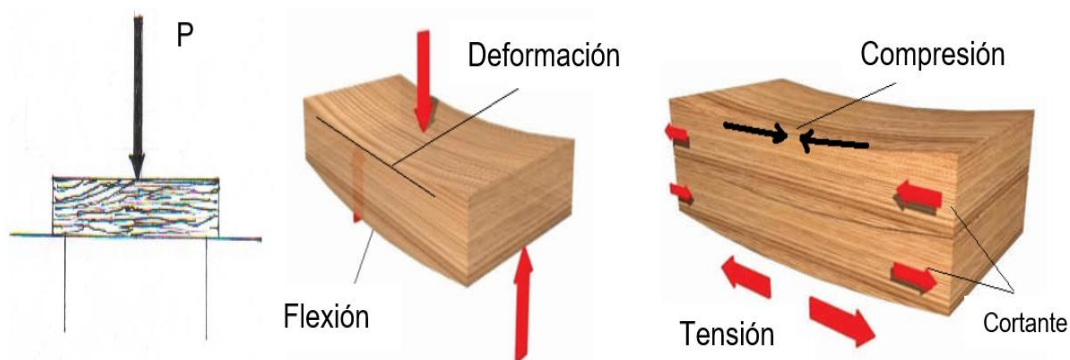
### Resistencia a la flexión estática

Esta característica es una, que en la práctica, se lleva al máximo desempeño al momento de diseñar un carrete de empaque de madera, pues corresponde a la resistencia que ofrece una viga o tabla recibe una carga puntual en el centro de su claro o longitud (Nogueira M. C., 2018).

En donde los valores de la resistencia también se expresan en  $\text{kg/cm}^2$ . Y corresponde al esfuerzo presentado al momento de la ruptura. Para el efecto completo de este esfuerzo, se debe considerar el factor del tiempo de aplicación de la carga. Si tiene un módulo de elasticidad alto, lo mismo se dice de su rigidez y las posibles deformaciones. Las representaciones gráficas de las deformaciones generales de la madera se pueden observar en la Figura 24.

**Figura 24**

*Gráfica de carga vs deformación general de la madera*



*Nota.* Adaptado de *Resistencia mecánica de la madera de pino*, por MaderaPedia.com, 2023, <https://www.maderapedia.com/madera/pino/resistencia-de-la-madera-de-pino.html>, CC BY.3.0

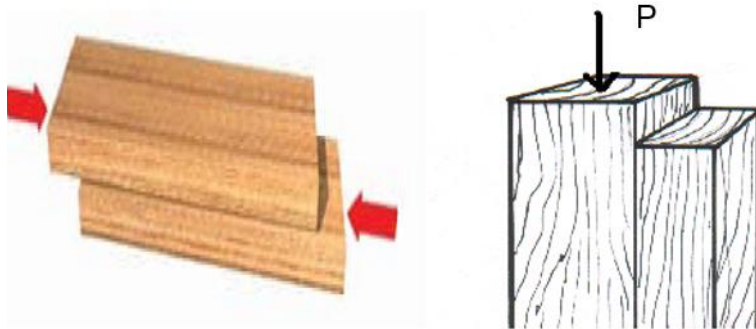
Durante pruebas de flexión, el módulo de la elasticidad no se debe tomar como una resistencia absoluta, ya que los efectos de acción cortante y flexión, siempre se presentan simultáneamente, delimitándose mutuamente.

## Resistencia al esfuerzo cortante

Esta cualidad corresponde al valor de la capacidad que presenta una pieza de madera para resistir cargas que tienden a deslizar un segmento de la madera sobre la otra pieza, tal como se muestra en la Figura 25.

**Figura 25**

*Resistencia de la madera al esfuerzo cortante y plano paralelo.*



*Nota.* Adaptado de *Resistencia mecánica de la madera de pino*, por MaderaPedia.com, 2023, <https://www.maderapedia.com/madera/pino/resistencia-de-la-madera-de-pino.html>, CC BY.3.0

## Rigidez o Dureza de la madera

Esta propiedad es crucial para el uso que se le da a una madera, pues corresponde a la oposición que ofrece esta, a los diferentes esfuerzos que recibe, para tratar de conservar su forma y tamaño original. A mayor rigidez o módulo de elasticidad, ofrece mayor resistencia a la deformación.

Está definida por

$$E = \frac{f}{\epsilon} \quad (4.1)$$

donde:

$E$  = módulo de elasticidad en  $\text{kg/cm}^2$

$f$  = esfuerzo en  $\text{kg/cm}^2$

$\epsilon$  = deformación unitaria adimensional

## Módulo de Elasticidad

Y es aquí, donde se comienza a visualizar la complejidad del análisis de las deformaciones en la madera, ya que su anisotropía, dificulta la determinación de su módulo de elasticidad (E), pues influirán muchos factores como: el tipo o especie de la madera, la dirección de aplicación del esfuerzo con respecto a las fibras de la madera, la duración de la carga aplicada y la humedad de las muestras, principalmente (Crespo Outes, 2021). Sin embargo, se manejan valores globalmente aceptados:

|                                       |                               |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| Elasticidad en dirección Axial:       | E= 100,000 kg/cm <sup>2</sup> |
| Elasticidad en dirección Transversal: | E= 5,000 kg/cm <sup>2</sup>   |

## Deformación unitaria ( $\varepsilon$ )

Se refiere a la deformación y cambios en sus valores dimensionales originales, que muestra la madera, al momento de aplicarse una fuerza externa.

$$\varepsilon = \Delta l / l \quad (4.2)$$

donde:

$\varepsilon$  = deformación unitaria

$\Delta l$  = deformación absoluta en cm

$l$  = dimensión original en cm

En definitiva, se observa que el estudio de la resistencia de la madera sólida, a las fuerzas externas, se complica debido a sus propiedades anisotrópicas. Y tal como lo menciona Dávalos *et al.*, (2010), en la revista Chapingo: Ciencias Forestales y del Ambiente (p.223), la madera presenta diferente resistencia a la deformación física o rigidez, dependiendo de su densidad sobre la tenacidad, y se acentúa esta relación proporcional, dependiendo del espesor de la pared celular (especie de la madera), y del resto de los valores particulares de las maderas, como humedad, la longitud del segmento en prueba y obviamente, la dirección en la

que se aplican las fuerzas en relación con la dirección de las fibras naturales de la madera (Borja de la Rosa, 2010).

#### **4.6 Análisis matemático del esfuerzo en superficies**

En el desarrollo de este trabajo de investigación se ha expresado la relevancia que tiene la madera en la industria y prácticamente en todos los ámbitos sociales y de la construcción, y que a pesar de los grandes avances tecnológicos, no existen materiales artificiales que cumplan con las mismas características de la madera natural, por lo que, realizar un análisis numérico que asemeje su desempeño mecánico y al mismo tiempo, lograr diseños virtuales con un comportamiento mecánico similar, se vuelve muy complicado, (Schmidt, 2009); y esto es atribuible sin duda, a la anisotropía de la madera (Tsai, 1971), situación que se torna mucho más compleja, en cuanto se desarrollan modelados virtuales de maderas comprimidas o granuladas. Y para la mejor comprensión de la nomenclatura de las fórmulas, se puede revisar el ANEXO 1.

De esta manera, se hace imprescindible para el desarrollo de esta tesis, el empleo del Análisis de Elemento Finito en la plataforma del software SOLIDWORKS®, para el diseño y evaluación de la resistencia mecánica de un modelo virtual de madera comprimida. Por lo tanto, es necesario definir los conceptos básicos de clasificación de las estructuras materiales y el estudio matemático de la forma en que se analizan los esfuerzos mecánicos sobre estas.

##### **Estructuras discretas o reticulares y continuas**

Las primeras son aquéllas que están formadas por un ensamblaje de elementos claramente diferenciados unos de otros y unidos en una serie de puntos bien definidos; de tal forma que el sistema tiene forma de retícula, red o malla. La característica fundamental de las estructuras discretas, es que su deformación puede definirse de manera exacta mediante un número finito de parámetros, como por ejemplo las deformaciones de los puntos de unión de unos elementos y otros. De esta manera el equilibrio de toda la estructura puede representarse mediante las ecuaciones de equilibrio en las direcciones de dichas deformaciones.

Como contrapartida, en los sistemas continuos no es posible separar anticipadamente el sistema, en un número finito de elementos estructurales discretos. Si se toma una parte cualquiera del sistema, el número de puntos de unión entre dicha parte y el resto de la estructura es infinito, y es por lo tanto imposible utilizar el mismo método que en los sistemas discretos, pues los puntos de unión entre los distintos elementos, que allí aparecían de manera natural, no existen ahora.

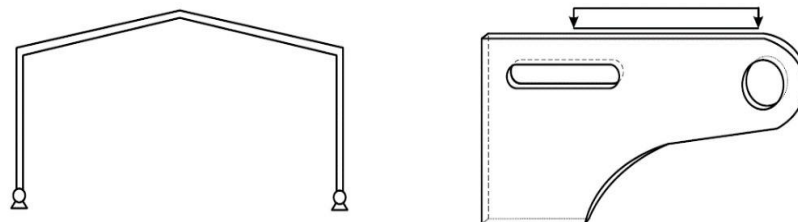
Las estructuras continuas son muy frecuentes en ingeniería, como, por ejemplo: bastidores de máquinas, carrocerías de vehículos, losas de cimentación de edificios, vasijas de reactores, elementos de máquinas (bielas, poleas, carcasas entre muchos otros elementos), y para su análisis es necesario disponer de un método que tome en cuenta la naturaleza continua de las superficies, bordes y de las estructuras en general.

#### **4.6.1 Análisis del comportamiento elástico-lineal de sistemas continuos**

Hasta la llegada del Método de los Elementos Finitos (MEF), los sistemas continuos se abordaban analíticamente, pero por esa vía sólo es posible obtener solución para sistemas con geometría muy sencilla, y/o con condiciones de contorno simples. También se han utilizado técnicas de diferencias finitas, pero éstas plantean problemas cuando los contornos son complejos o con múltiples abordes con formas intrincadas, y el cálculo de una representación matemática se torna compleja, aún para figuras relativamente sencillas como las mostradas en la Figura 26, donde los vértices y los orificios complican su formulación.

**Figura 26**

*Estructura reticular Discreta y estructura Continua*



*Nota.* Las figuras dibujadas en SOLIDWORKS. Elaboración propia, 2023.

Se debe tener en cuenta que, para la determinación de las deformaciones con bajos niveles, alejados de la carga de rotura, es adecuado utilizar un modelo elástico y lineal del material en las tres direcciones, sin embargo, pueden pasar desapercibidas pequeñas fracturas por debajo de las deformaciones (Crespo Outes, 2021)., que no se muestren como rupturas estructurales.

Para el estudio de las deformaciones en una estructura debidas a la acción de cargas, es imprescindible contemplar la Teoría de la Elasticidad (Vázquez, 2001)., a través de ecuaciones diferenciales llamadas *ecuaciones de campo o de gobierno*. Sin embargo, como ya se ha mencionado, los cálculos se vuelven muy complejos en cuanto se trata de estructuras diferentes a las articuladas o reticuladas.

A continuación, se presentan imágenes de las figuras de elementos finitos sobre los que se hace el estudio de la elasticidad, desde los más básicos hasta los multidimensionales, que son base del Análisis de Elemento Finito; donde este último, conviene realizarse con ayuda de softwares computacionales, por la gran complejidad de las matrices de datos y el volumen de los cálculos e iteraciones, que sólo pueden ejecutarse eficientemente y con precisión, con equipos de cómputo.

Se muestran entonces, elementos típicos, considerando como *nodos* las partes terminales o en donde existe un vértice; estos nodos son representados con círculos, y sobre ellos se lleva a cabo el estudio de las deformaciones en los elementos (Zienkiewicz y Taylor, 1994), pues al existir desplazamiento en los nodos para dos elementos contiguos, propiamente habrá el mismo desplazamiento a lo largo del contorno de separación.

### **Elasticidad unidimensional**

Se muestra en la Figura 27, los elementos de Elasticidad Unidimensional pueden presentar varios nodos, pero no presentan cambios de dirección.

**Figura 27**

*Elemento para estudio de Elasticidad Unidimensional*



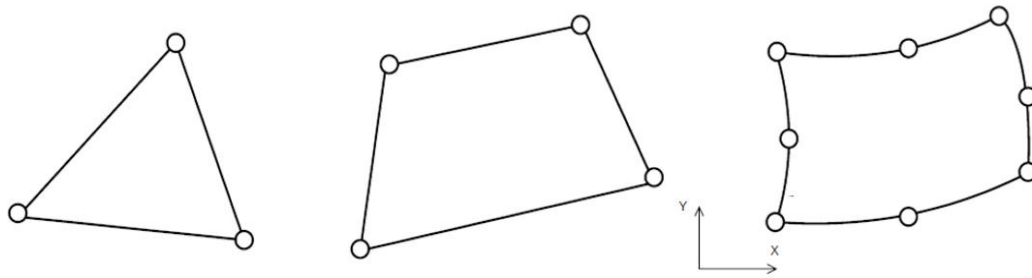
*Nota.* La forma del Elemento Unidimensional, puede llevar nodos intermedios, sin presentar vértices.  
Elaboración propia, 2023.

## Elasticidad bidimensional

En la Figura 28, se muestran los elementos bidimensionales, denominados como figuras planas o en planos de dos dimensiones ( $x, y$ ).

**Figura 28**

*Elementos para estudio de Elasticidad Bidimensional*



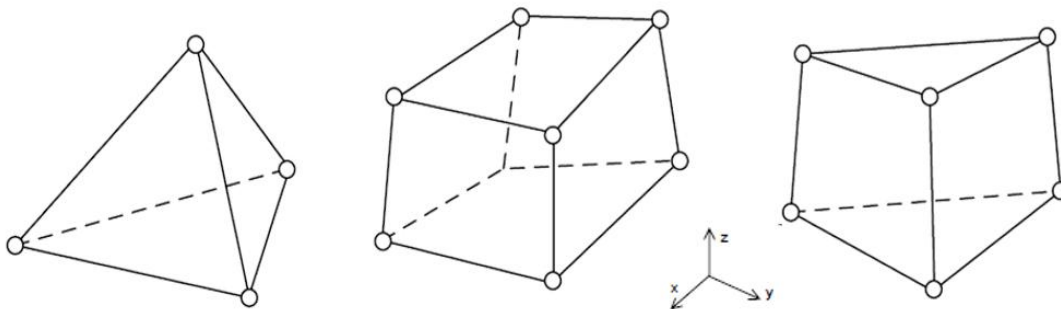
*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 4), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

## Elasticidad tridimensional

Los Elementos con volumen o en tres dimensiones ( $x, y, z$ ) presentan, por obvias razones, mayor cantidad de nudos o nodos como se observa en la Figura 29.

**Figura 29**

*Elementos para estudio de Elasticidad Tridimensional*



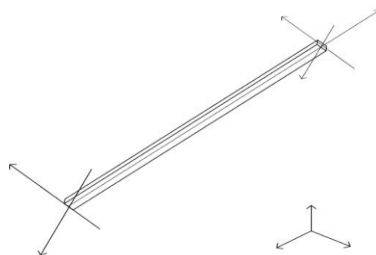
*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 4), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

## Elementos tipo Viga

Donde se pueden observar la suma de puntos de torsión o flexión del cuerpo, donde los extremos y la longitud del elemento determinan, la mayor o menor deformación sobre la elasticidad del elemento y esto se puede observar en la Figura 30; donde, además se puede presentar efectos de torsión, lo que hace más complejo su estudio.

**Figura 30**

*Elemento tipo Viga*



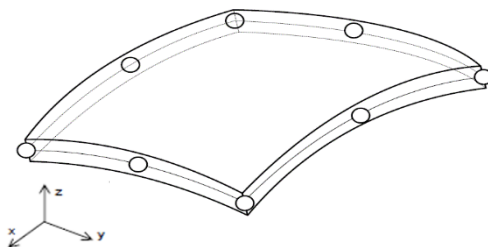
*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 5), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

## Cáscaras laminares curvas

Este tipo de elemento es muy importante, porque contiene volumen y al presentar curvatura en su estructura, la tensión superficial es distinta dependiendo del punto desde el cual se analice, como lo muestra la Figura 31.

**Figura 31**

*Elemento cáscara curva*



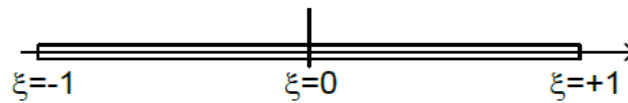
*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 6), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

#### 4.6.2 Funciones de interpolación

Para realizar el análisis de deformaciones, esfuerzos, gastos, flujos, entre muchas otras variables, en figuras con más de dos planos o superficies, se emplean las funciones de interpolación, útiles en elementos generales con tres nodos o más, y con este fin resulta conveniente utilizar una coordenada  $\xi$  local al elemento en estudio, considerando que ésta siempre tendrá una variación de -1 en el nodo inicial y de +1 en el nodo final, donde el elemento en este sistema de coordenadas locales, siempre será de longitud igual a 2. Lo anterior explica esquemáticamente en la Figura 32, como si fuera una recta numérica simple.

**Figura 32**

*Elemento de coordenadas locales o de longitud*



*Nota.* Adaptado de *EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS aplicado al análisis estructural* (p. 10), por M. Vázquez. 2001, Noela.

Y así, para un elemento con dos nodos, las funciones de interpolación quedan de la siguiente manera:

$$N_1 = \frac{1-\xi}{2} \quad N_2 = \frac{1+\xi}{2} \quad (4.3)$$

Suponiendo un elemento finito cualquiera, determinado por un número,  $n$ , de nodos; y para su análisis se considerará un problema de elasticidad plana. Un punto cualquiera del elemento tiene un desplazamiento definido por un vector  $\mathbf{u}$ , que en este caso tiene dos componentes:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

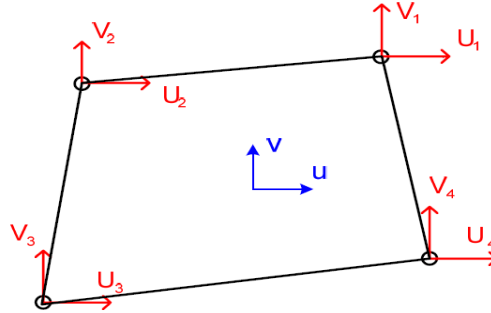
Los nodos del elemento tienen una serie de grados de libertad, que corresponden a los valores que adopta en ellos el campo de desplazamientos, y que forman el vector denominado  $\delta^e$ . Para el caso plano este vector es (Celigüeta Lizarza, 2011).:

$$\delta^e = [U_1 \ V_1 \ U_2 \ V_2 \ \dots \ U_n \ V_n]^T \quad (4.5)$$

En el ejemplo se supone que como deformaciones de los nodos se emplean sólo los desplazamientos, pero no los giros, lo cual es suficiente para analizar la elasticidad plana, como se explicará posteriormente (Celigüeta Lizarza, 2011), esto se puede ver en la Figura 33. En los elementos antes descritos, como vigas o cáscaras se emplean, además, los giros nodales.

**Figura 33**

*Deformaciones en un elemento finito*



*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 7), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

Aquí los nodos del elemento, se desplazan a nuevas posiciones en un sistema coordenado ( $u$ ,  $v$ ) que a su vez es referenciado al origen de coordenadas ( $x$ ,  $y$ ). El campo de deformaciones en el interior del elemento se aproxima haciendo uso de la hipótesis de interpolación de deformaciones (Vázquez, 2001):

$$u = \sum N_i U_i \quad v = \sum N_i V_i \quad (4.6)$$

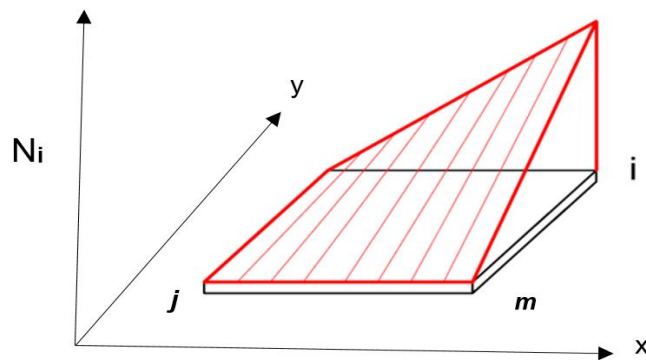
donde  $N_i$  son las funciones de interpolación del elemento, que en general corresponden a funciones de las coordenadas  $x$ ,  $y$ . Obsérvese que se emplean las mismas funciones para interpolar los desplazamientos  $u$  y  $v$ , y que ambos desplazamientos se interpolan separadamente, el campo  $u$  mediante de las  $U_i$  y el campo  $v$  mediante las  $V_i$ . Es decir que la misma  $N_i$  define la influencia del desplazamiento del nodo  $i$  en el desplazamiento total del punto  $P$ , para las dos direcciones  $x$  e  $y$  (Celigüeta Lizarza, 2011). La interpolación de deformaciones, puede ponerse en la forma matricial general, de la siguiente manera:

$$u = N\delta^e \quad (4.7)$$

Las funciones de interpolación están definidas únicamente para el elemento, y son nulas en el exterior de dicho elemento (Vázquez, 2001). Estas funciones tienen que cumplir determinadas condiciones y aunque éstas se verán en detalle más adelante, con la expresión anterior se puede deducir que la función de interpolación  $N_i$  debe valer 1 en el nodo  $i$  y 0 en los restantes nodos. Esta condición resulta válida si se tiene en cuenta que los términos del vector  $\delta^e$  son grados de libertad y por lo tanto son independientes, y pueden corresponder a cualquier valor (Celigüeta Lizarza, 2011). Lo anterior se visualiza en la Figura 34.

**Figura 34**

*Figura de función de interpolación*



*Nota.* Se muestra que, la función de interpolación es una línea recta; y en dos dimensiones, sería un plano. Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 8), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

A medida que los elementos o estructuras se hacen complejas, el estudio de su elasticidad, se complica; por lo que resulta conveniente, realizar el estudio a partir del análisis de las fuerzas que se ejercen sobre un paralelepípedo en equilibrio se definen en los tres ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , como se muestra en la Figura 35., donde la acción de las fuerzas que actúan sobre cada lado y de las fuerzas de volumen  $\mathbf{q}dx\,dy\,dz$ , tal como el peso del paralelepípedo, se deben contemplar conjuntamente.

Se establecen entonces, las ecuaciones de la Estática  $\sum X = 0$ ,  $\sum Y = 0$ ,  $\sum Z = 0$ , y se obtienen las ecuaciones de equilibrio del cuerpo:

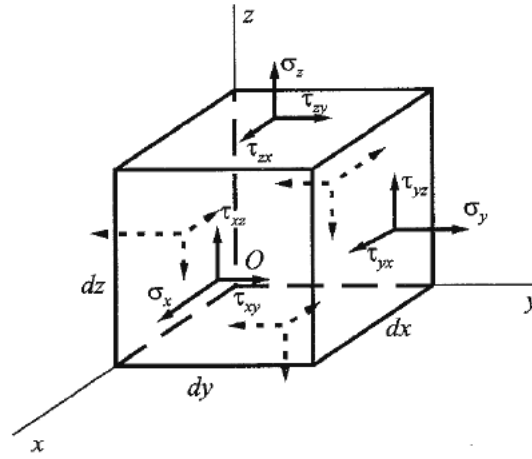
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + qx = 0, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + qy = 0, \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + qz = 0. \quad (4.10)$$

**Figura 35**

*Paralelepípedo elemental*



Nota. Adaptado de EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS aplicado al análisis estructural (p. 3), por M. Vázquez. 2001, Noela.

Donde las ecuaciones estáticas  $\sum M_x = 0$ ,  $\sum M_y = 0$ ,  $\sum M_z = 0$ , permiten determinar las relaciones siguientes:

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}, \tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (4.11)$$

que corresponden a la expresión analítica del teorema de Cauchy, el cual reduce a sólo seis las componentes individuales de los esfuerzos, las cuales actúan en el vector de esfuerzos denominado por  $\{\sigma\}$ .

Como se ha mencionado anteriormente en este trabajo de tesis: los materiales anisótropos, como la madera, presentan problemas peculiares, ya que su coeficiente de dilatación y elasticidad, se ve afectada por la dirección en la que reciben las cargas (Zienkiewicz y Taylor,

1994)., ambos autores también señalan, que se considera de manera general para materiales de este tipo y se emplean al menos 21 constantes elásticas independientes, para poder definir con mayor certeza las relaciones entre tensiones y deformaciones en estructuras, lo cual se define a continuación, partiendo de la base teórica unidimensional hasta la tridimensional.

### Elasticidad Unidimensional

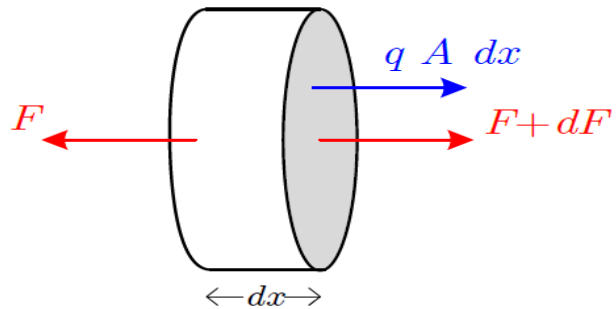
Este problema se vio anteriormente y su solución parte de un elemento diferencial como se observa en la Figura 36. Donde el valor de la fuerza en función de la tensión, se puede definir de la siguiente manera:  $F = \sigma A$  y esta última, en función de la deformación unitaria, nos proporciona:  $\sigma = E \varepsilon$

Con ambas ecuaciones, obtenemos:

**Figura 36**

*Equilibrio de fuerzas en elasticidad Unidimensional*

$$(4.12) \quad \frac{d}{dx} \left[ EA \frac{du}{dx} \right] + qA = 0$$



*Nota. Adaptado de Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural (p. 27), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.*

El problema de dos nodos, se obtiene al suponer una solución de la forma:  $u = ax + b$

Cuyas funciones de interpolación son líneas rectas que valen 1 en el nodo  $i$  y 0 en el otro nodo:

$$N_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \quad y \quad N_2 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (4.13, 4.14)$$

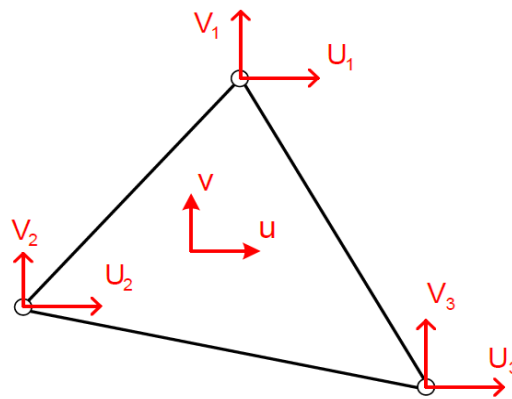
## Elasticidad Bidimensional

En un plano o elemento bidimensional se tienen los vectores de los vértices, como los principales que determinarán las deformaciones del mismo o desplazamientos  $u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3$ , como muestra en la Figura 37, de donde surge la siguiente matriz de funciones de interpolación:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & : & N_2 & 0 & : & \dots & 0 & : & N_n & 0 \\ 0 & N_1 & : & 0 & N_2 & : & 0 & \dots & : & 0 & N_n \end{bmatrix}$$

**Figura 37**

*Equilibrio de fuerzas en elasticidad Bidimensional*



Nota. Adaptado de EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS aplicado al análisis estructural (p. 37), por M. Vázquez. 2001, Noela.

Se debe recordar que la matriz  $\mathbf{N}$  tiene tantas filas como desplazamientos se consideren para un punto continuo (dos para un plano), como comenta Celigüeta (2011), y tantas columnas como grados de libertad haya entre todos los nodos del elemento en estudio. La estructura de esta matriz, siempre es la misma como se muestra arriba de este párrafo.

Las deformaciones unitarias en un punto del elemento finito son representadas de la forma:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{u} \quad (4.15)$$

Donde la deformación angular  $\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$  (4.16)

Por otra parte, se origina la matriz **B**, la cual relaciona las deformaciones de los nodos con las deformaciones unitarias en cualquier punto del elemento en estudio:

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{N} \quad (4.17)$$

Y de acuerdo con la estructura de **N**, la matriz **B**, se puede escribir de la forma:

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{N} = \boldsymbol{\partial} \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \vdots & \vdots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \vdots & \vdots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \vdots & \vdots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \dots \quad \mathbf{B}_n]$$

En donde, a su vez, cada una de las matrices **B<sub>i</sub>**, tiene la forma siguiente:

$$\mathbf{B}_i = \partial \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Estas matrices son fundamentales en el análisis del método en estudio, y debido a la complejidad que adquieren cuando se desean analizar mayor cantidad de nodos o puntos de deformación en algún elemento, se vuelven de gran ayuda los ordenadores cada vez más potentes, que han permitido evaluar un número gigantesco de datos, en periodos de tiempo muy cortos.

También se deben tener en cuenta las ecuaciones que permiten evaluar la relación entre Tensión-Deformación que sufren los elementos, y para ello tomaremos en cuenta las siguientes fórmulas y matrices.

#### 4.6.2.1 Relaciones de Tensión y Deformación en los Elementos

El estado de tensiones en dos dimensiones es:

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.20)$$

La ecuación constitutiva, en ausencia de temperaturas, es:

$$\sigma = D \varepsilon \quad (4.21)$$

Las deformaciones o desplazamientos  $u$  tienen que depender solamente de  $u_1, u_2, u_3$ . De la misma forma que los desplazamientos  $v$  dependerán sólo de  $v_1, v_2, v_3$  y ambas dependencias tiene que ser iguales (Vázquez, 2001). Por ello, la matriz de forma del elemento  $[N_e]$  sería la siguiente:

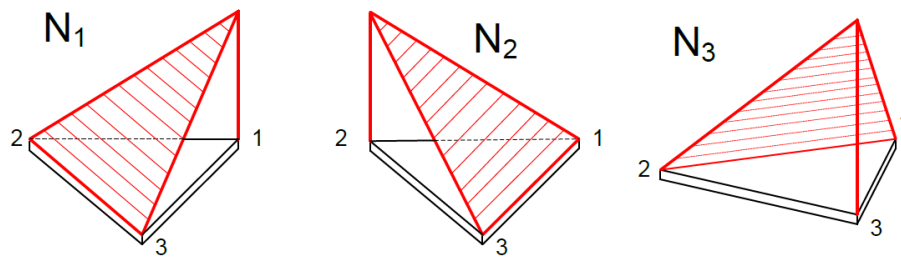
$$[N_e] = \begin{bmatrix} N1 & 0 & N2 & 0 & N3 & 0 \\ \dots & & \dots & & \dots & \\ 0 & N1 & 0 & N2 & 0 & N3 \end{bmatrix}$$

Y las tres funciones de interpolación correspondientes a los tres nodos serían como se muestra en la Figura 38:

$$N_1 = \frac{a_1 + b_1 x + c_1 y}{2A} \quad (4.22) \quad N_2 = \frac{a_2 + b_2 x + c_2 y}{2A} \quad (4.23) \quad N_3 = \frac{a_3 + b_3 x + c_3 y}{2A} \quad (4.24)$$

**Figura 38**

*Interpolación de Elemento Triangular*



*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 46), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

Tomando en cuenta que la matriz  $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \ \mathbf{B}_2 \ \mathbf{B}_3]$  es constante, y las deformaciones nodales unitarias  $\epsilon$  son constantes, y del mismo modo lo serán las tensiones proporcionales entre sí, La matriz de rigidez del elemento bidimensional se puede expresar de la siguiente manera, dada la estructura de  $\mathbf{B}$  (Celigüeta Lizarza, 2011):

$$\sigma = \mathbf{D}_\epsilon = \mathbf{D} \mathbf{B} \delta^e \quad (4.25)$$

$$\mathbf{K} = \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv = \int \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^T \\ \mathbf{B}_2^T \\ \mathbf{B}_3^T \end{bmatrix} \mathbf{D} [\mathbf{B}_1 \ \mathbf{B}_2 \ \mathbf{B}_3] t dx dy \quad (4.26)$$

siendo  $t$  el espesor del cuerpo o elemento. Y a la matriz  $\mathbf{K}$  es posible dividirla en 3x3 sub matrices, que relacionan a los tres nodos mutuamente:

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} K^{11} & K^{12} & K^{13} \\ K^{21} & K^{22} & K^{23} \\ K^{31} & K^{32} & K^{33} \end{vmatrix}$$

Y el estado de tensiones, del elemento, en un punto cualquiera es:

$$\sigma = \mathbf{D}_\varepsilon = \mathbf{DB} \delta^e \quad (4.27)$$

#### 4.6.2.2 Interpolación rectangular

Como menciona Celigüeta (2011)., para describir con mayor sencillez la formulación de un elemento rectangular, se emplea el mismo análisis del triángulo, donde se define al vector columna de desplazamientos nodales de la siguiente manera:

$$\delta^e = [U_1 \ V_1 \ U_2 \ V_2 \ U_3 \ V_3 \ U_4 \ V_4]^T \quad (4.28)$$

Donde las distintas funciones de interpolación son del tipo bilineal, y se definen de la siguiente manera:

$$N_1 = \frac{(b+x)(c+y)}{A} \quad (4.29)$$

$$N_2 = \frac{(b-x)(c+y)}{A} \quad (4.30)$$

$$N_3 = \frac{(b-x)(c-y)}{A} \quad (4.31)$$

$$N_4 = \frac{(b+x)(c-y)}{A} \quad (4.32)$$

Y de la matriz de rigidez de este elemento, resulta de 4x4, obteniendo sus valores con la misma expresión extendida para  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{K} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{DB} \, dv = \int \begin{bmatrix} B_1^T \\ \dots \\ B_4^T \end{bmatrix} \mathbf{D} [B_1 \ \dots \ B_4] t \, dxdy \quad (4.33)$$

Se debe visualizar que el campo de las deformaciones en un punto cualquiera del dominio, en cualquier elemento de estudio, está definido por un vector  $\mathbf{u}$  que tiene tambas componentes como deformaciones existen en el dominio del mismo. Esto se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix}$$

Como explica Vázquez (2001), si se considera un elemento finito cualquiera, el campo de deformaciones que presenta se logra aproximar, con el uso de la hipótesis de interpolación, asumiendo el promedio ponderado del total de las deformaciones en cada uno de los  $n$  nodos del elemento en estudio, considerando así, los factores de ponderación de las funciones de interpolación siguientes:

$$u = \sum N_i U_i \quad v = \sum N_i V_i \quad w = \sum N_i W_i \quad (4.34)$$

y la forma matricial se puede definirse como:

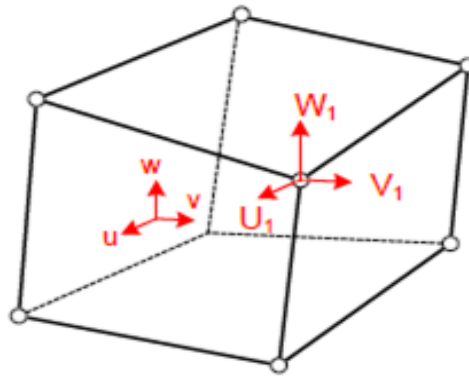
$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \delta^e \quad (4.35)$$

donde  $\delta^e$  es el vector de todas las deformaciones nodales del EF cúbico, véase Figura 47.

$$\delta^e = [U_1 \ V_1 \ W_1 \ U_2 \ V_2 \ W_2 \ \dots \ U_n \ V_n \ W_n]^T \quad (4.36)$$

**Figura 39**

*Deformaciones en un elemento finito*



*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 16), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

Estas funciones resultan especialmente útiles, pues los problemas de elasticidad en tres dimensiones son frecuentes en la ingeniería, y su análisis se presentará más adelante en este trabajo para la comprensión de los parámetros que se deben definir al emplear MEF con la finalidad de conocer los esfuerzos en la estructura de elementos con volumen.

De esta manera resulta conveniente la explicación de los tipos de elementos a considerar en el estudio de los esfuerzos a la tensión y las deformaciones en los cuerpos o elementos de análisis. Tal como lo mencionan Zienkiewicz y Taylor (1994)., es conveniente suponer que, durante el inicio del análisis, un cuerpo puede estar sometido a un sistema conocido de tensiones iniciales (residuales)  $\sigma_0$ , que puede medirse a través de la ecuación:

$$\sigma = \mathbf{D}(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (4.37)$$

donde:

- **D**, que es la matriz de Elasticidad que, para un material elástico lineal, resulta de valor constante y dependerá únicamente de dos parámetros: el módulo de elasticidad  $E$  ( $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$ ) y el módulo de Poisson  $\nu$ . Matricialmente se define como:

$$D = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad \lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.38)$$

- $\varepsilon_0$ , es el vector de las deformaciones unitarias iniciales en el material, considerando el punto de análisis, incluidas aquellas atribuibles a las temperaturas, e incluyendo las deformaciones o errores de consideración en la forma, entre otras.
- $\sigma_0$ , que corresponde a las tensiones iniciales presentes en el material, de valor conocido.

#### 4.6.3 Tipos de Elementos

En las funciones de interpolación de tipo de la matriz **B** (Ec. 4.51), que tienen un orden de derivación basado en la unidad, es suficiente el uso de funciones de interpolación con

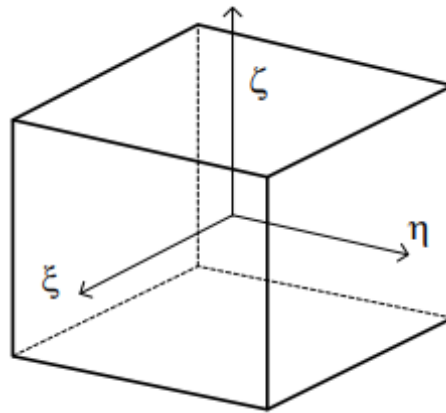
continuidad  $C^0$ . Y estas funciones a su vez, se rigen básicamente en la definición de la configuración del prisma rectangular.

#### 4.6.3.1 Elementos de prisma rectangular

La definición de esta figura permite comprender las funciones de interpolación cuando se utilizan tres coordenadas locales,  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ , con límites entre -1 a +1. A continuación se representa en este sistema de ejes locales, el elemento, que corresponde a un cubo de lado 2 (Celigüeta Lizarza, 2011) , tal como se muestra en la Figura 40.

**Figura 40**

*Coordenadas locales normalizadas en el espacio*



*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 89), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

#### 4.6.3.2 Elementos de ocho nodos

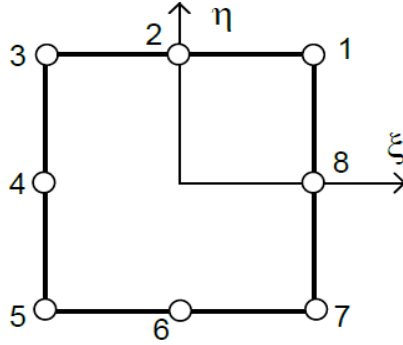
Como lo menciona Calderón (2011)., conforme se van interpolando las ecuaciones de elementos con mayor número de nodos, estas lo hacen cuadráticamente, pero se analizan los nodos en segmentos con tres nodos, como se muestra esquemáticamente en la Figuras 41 y 42, y las funciones para los nodos centrales por cada lado son:

$$N_k = \frac{1}{2} (1 - \xi^2) (1 + \eta\eta_k) \quad k = 2 - 6 \quad \xi_k = 0 \quad (4.39)$$

$$N_k = \frac{1}{2} (1 - \eta^2) (1 + \xi \xi_k) \quad k = 4 - 8 \quad \eta_k = 0 \quad (4.40)$$

**Figura 41**

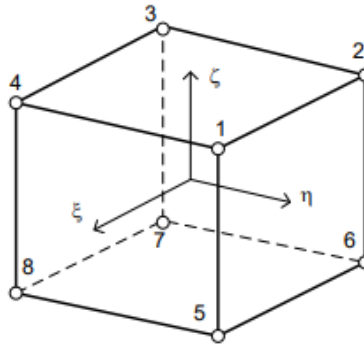
*Elemento plano de ocho nodos*



*Nota.* En la figura se observa la distribución de los nudos o nodos del elemento. Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 89), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

**Figura 42**

*Elemento tridimensional o prisma de ocho nodos*



*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 90), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

En la Figura 42, se define el rectángulo plano de cuatro nodos, en donde cada una de sus caras representa un elemento rectangular de cuatro nodos, y sus funciones de interpolación se resumen con la siguiente expresión:

$$N_i = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) (1 + \zeta \zeta_i) \quad i = 1, 8 \quad (4.41)$$

Donde  $\xi_i, \eta_i, \zeta_i$ , son las coordenadas del nodo (nudo)  $i$ .

De la misma forma, se pueden analizar cuerpos y no sólo superficies, tomando en cuenta composiciones de múltiples aristas, en las que se interpolan los nodos y puntos intermedios en los límites del cuerpo. Por ejemplo, podría hablarse de elementos tetraédricos.

#### 4.6.3.3 Elemento tetraédrico cuadrático de diez nodos.

Este elemento nos acerca más, al estudio de áreas triangulares que se analizan  $n$  veces en los cuerpos tridimensionales con el uso del AEF. Se tienen tres nodos por arista y el doble por cara, y las funciones de interpolación en las esquinas se definen por las ecuaciones siguientes y por la Figura 43 mostrada después de las ecuaciones:

$$N_1 = (2L_1 - 1)L_1 \quad N_2 = (2L_2 - 1)L_2 \quad (4.42a)$$

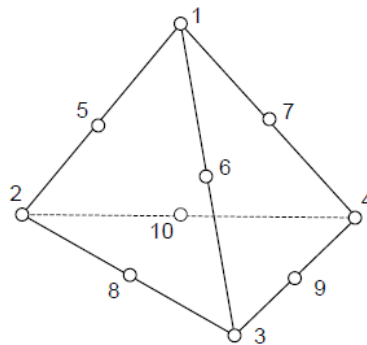
$$N_3 = (2L_3 - 1)L_3 \quad N_4 = (2L_4 - 1)L_4 \quad (4.42b)$$

Y para los nodos intermedios de los vértices, se tiene que:

$$N_5 = 4L_1L_2 \quad N_6 = 4L_1L_3 \quad (4.43)$$

**Figura 43**

*Elemento tetraédrico de 10 nodos*



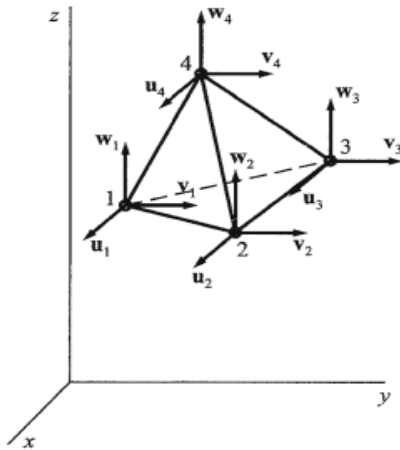
*Nota.* El elemento de 10 nodos permite la evaluación de esfuerzos en un cuerpo con volumen. Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 93), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

#### 4.6.4 Funciones tridimensionales

El estudio de los esfuerzos en cuerpos o elementos con volumen, se vuelve fundamental para el desarrollo de esta tesis. Y existen formulaciones que permiten modelado de dichos esfuerzos y las deformaciones que producen. Por ejemplo, Vázquez (2001) define que, en el caso de un elemento tridimensional con  $n_n$  nodos y cada nodo con 3 parámetros  $u_i, v_i, w_i$  y esto se muestra en la Figura 44, el vector de desplazamientos del elemento se define de acuerdo a la fórmula (4.44)

**Figura 44**

*Elemento tetraédrico de 10 nodos*



$$\{u_e\} = [N_e] \{ \delta_e \} \quad (4.44)$$

donde  $[N_e]$  es la matriz de interpolación o matriz de forma del elemento en análisis:

$$[N_e] = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_{n_n}] \quad (4.45)$$

*Nota.* Adaptado de *EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS aplicado al análisis estructural* (p. 38), por M. Vázquez. 2001, Noela.

Estas funciones resultan especialmente útiles, para el estudio de valores de elasticidad, es decir, los datos de resistencia mecánica antes de las fracturas estructurales, en objetos de tres dimensiones; estos análisis son frecuentes en la ingeniería, al permitir conocer capacidades de carga y esfuerzo mecánico en elementos cuya desempeño requiere ofrecer características de trabajo especiales o resistencias mecánicas a la ruptura por pesos o cargas específicas, para ser considerados como materiales aprobados para ser empleados como empaques, contenedores de productos, entre otras aplicaciones de transporte.

Se definen a continuación otros conceptos matemáticos útiles en la conceptualización de la forma en que se realizan el análisis de fuerzas a través del método del análisis finito.

#### 4.6.4.1 Interpolación Isoparamétrica

De la misma manera en que se hace la interpolación bidimensional, la formulación isoparamétrica en tres dimensiones, se realiza a través de los mismos pasos, añadiendo, además, la coordenada  $z$ .

Y esta interpolación se define con una matriz, de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ \dots \end{Bmatrix} \quad (4.46)$$

$$X = N x^e \quad (4.47)$$

donde el vector  $x^e$  agrupa a las coordenadas  $(x, y, z)$  de todos los nodos del elemento o cuerpo en estudio. Como lo señala Celigüeta (2011), con la definición espacial (4.44) estará definida por el tipo de funciones de interpolación que se empleen, donde cada cara o lado del elemento, estará definido a su vez, por el número de nodos en esa cara: por ello, los lados con dos nodos son rectos, con tres pueden ser parábolas y con cuatro nodos pueden ser curvas cúbicas. Al mismo tiempo, las caras con tres nodos serán planas, con cuatro superficies bilineales, y así sucesivamente.

Las derivadas de las funciones de interpolación respecto de las coordenadas locales, se pueden obtener mediante la regla de Derivación en cadena como lo muestra Celigüeta (2011) en la siguiente relación matricial entre derivadas aplicadas en los sistemas de coordenadas que están siendo analizados:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = \mathbf{J} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (4.48)$$

Y de la expresión (4.48) se pueden despejar las derivadas por coordenadas generales, como se indica a continuación:

$$\mathbf{B}_i = \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} \quad (4.49)$$

En donde, el vector a la derecha de la igualdad, es obtenido al derivar las  $\mathbf{N}_i$  respecto a  $\xi, \eta, \zeta$ . Y conociendo  $\mathbf{J}$ , se pueden conocer de la expresión (4.49) todas las derivadas que forman la matriz  $\mathbf{B}_i$ .

Por lo que el valor de  $\mathbf{J}$  se realiza a través de la interpolación de coordenadas como se muestra en 4.49 y 4.50:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \sum \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \sum \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i & \sum \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \\ \sum \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \sum \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i & \sum \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \\ \sum \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} x_i & \sum \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} y_i & \sum \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} z_i \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Y esta expresión (4.50) puede desarrollarse, ya que las funciones  $\mathbf{N}_i$  respecto a  $\xi, \eta, \zeta$  y  $x_i, y_i, z_i$ , son las coordenadas de los nodos que definen la forma del elemento en estudio.

Y recordemos que la expresión de la Matriz de Rigidez es:

$$\mathbf{K} = \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv \quad (4.51)$$

En los apartados anteriores se han mostrado análisis de elementos finitos sencillos, a base de definir un polinomio interpolante de las deformaciones para después determinar los coeficientes de dicho polinomio, y ajustarlo a los valores nodales de las deformaciones que pudieran presentarse al soportar tensión en algún punto. Una vez ajustado este polinomio y

determinadas las funciones de interpolación  $N_i$ , el proceso de cálculo de las propiedades del elemento es siempre el mismo, con independencia del tipo de elemento. Como lo señala Celigüeta (2001)., la definición de las funciones de interpolación es por lo tanto el paso fundamental en el análisis por el MEF, y de él depende en gran manera la precisión de los resultados obtenidos.

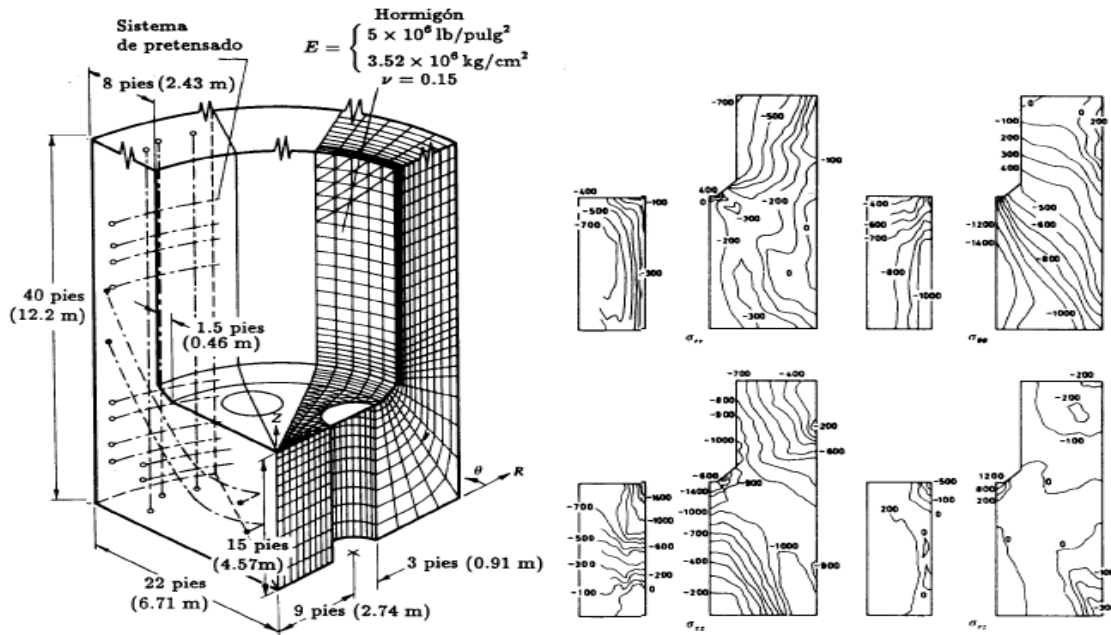
Por otro lado, conviene tener en cuenta lo que señalan Zienkiewicz y Taylor (1994)., en “El método de los Elementos Finitos”, al referirse que la distribución de tensiones ejercidas alrededor de un orificio circular en los materiales isótropos, puede seguir un proceso de ponderación de los valores medios, tomando en cuenta las proximidades de las superficies de la estructura en estudio, y con ello manejar una malla que permita simular los esfuerzos con ayuda de software, dándole mayor importancia a los bordes donde se localiza el orificio y ponderando la variación de sus espesores.

De lo anterior se desprende de igual manera, el análisis de las deformaciones que producen las tensiones en cuerpos anisótropos, y el mismo Zienkiewicz y Taylor (1994) también señalan que los materiales estratificados, como la madera, se pueden estudiar por sectores, considerando isotropía transversal, longitudinal o radial en cada estrato donde se realice el análisis de las cargas o tensiones aplicadas, para luego realizar la matriz de tensiones que represente el elemento en estudio completo, a través de la obtención de la sumatoria total de tensiones de los nodos, considerando la media de los valores adyacentes, todo esto, con la ayuda de un ordenador para efectuar así, una cantidad elevada de iteraciones y cálculos en poco tiempo.

Un ejemplo para el estudio de elasticidad y resistencia de estructuras complejas o tridimensionales, puede verse en la Figura 45., donde se muestra la manera en la que se realizan subdivisiones de una vasija de presión de un reactor nuclear, para realizar el cálculo, y basándonos en el modelo de elementos compuestos de 8 nodos, y ajustando el grado de libertad e iteraciones, midiendo las tensiones en los pequeños bloques o “ladrillos” para crear una red compleja y considerando la densidad deseada del material, este armado de triángulos o rectángulos contiguos en la representación de los elementos de estudio se llaman, mallas.

**Figura 45**

*Análisis de Vasija de presión de un reactor nuclear*



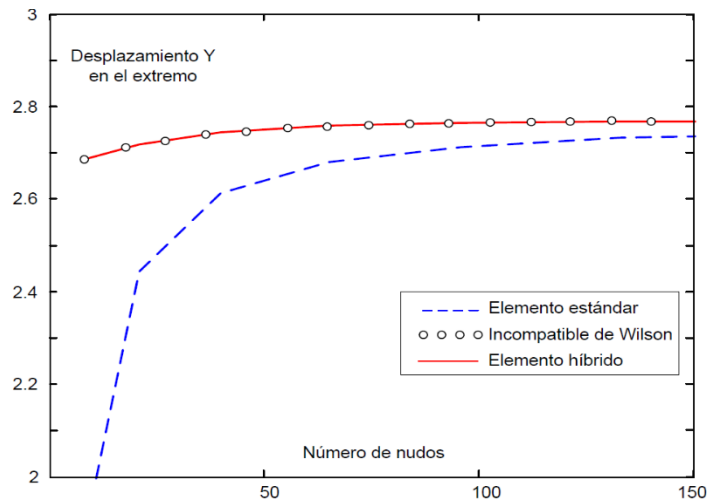
*Nota.* En la figura se desglosa el análisis de una vasija de presión de un reactor nuclear, por tetraédricos; Geometría, subdivisión y valores de las tensiones. Adaptado de *El Método de los Elementos Finitos Vol.1* (p. 105), por O.C. Zienkiewicz, 1994, McGraw-Hill.

La convergencia del MEF depende del tipo y tamaño de la malla, en la gráfica siguiente se puede apreciar que a medida que disminuye el tamaño de la malla el método converge. Sin embargo, en muchas ocasiones se pueden combinar diferentes tipos de malla que se consideran híbridas y la convergencia es mayor. Esto sucede porque dependiendo de las diferentes secciones que tenga el producto o las diferentes partes de un ensamble, requiere diferente tipo de mallado, como puede observarse el ejemplo de la Figura 46.

Cabe mencionar que el mallado de un modelo que se desea analizar por medio del elemento finito, consta de gran cantidad de iteraciones matemáticas y hacerlas a mano resultaría poco práctico además de estar sujeto a la acumulación de errores que al final del proceso matemático, pudiera presentar datos poco realistas o equivocados de acuerdo a lo esperado.

**Figura 46**

*Convergencia de la deformación al refinar la malla*



*Nota.* En el gráfico se puede observar la cercanía de los datos resultantes en un mallado respecto a la cantidad de nodos o nudos establecidos. Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 83), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

## 4.7. Elasticidad tridimensional

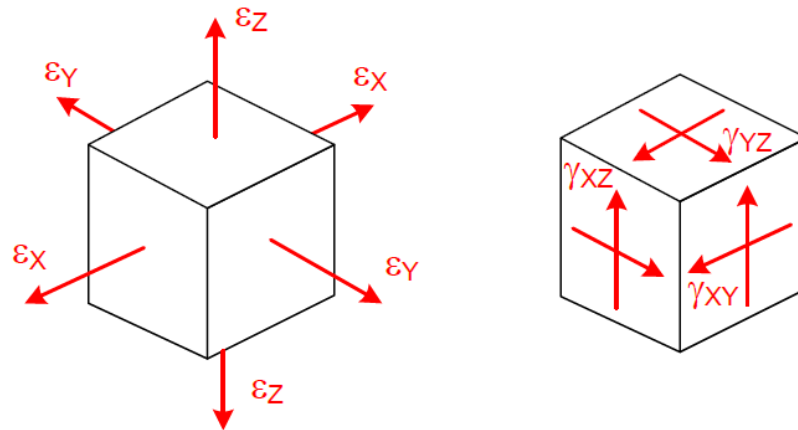
Los problemas de elasticidad en tres dimensiones son bastante frecuentes en la práctica de la ingeniería y se presentan sobre todo en elementos que, por su proceso de fabricación, o necesidades funcionales no pueden tener una dimensión mucho menor que las otras dos. Esto ocurre con piezas fundidas o forjadas (p.ej. carcasas de maquinaria, bancadas de máquinas herramienta, soportes y aparatos de apoyo, entre muchos otros), con elementos estructurales en hormigón para apoyo y cimentación (apoyos de puentes, cimentaciones de máquinas, obras hidráulicas y similares), y en general en cualquier estructura en la que no pueda asumirse la hipótesis de que la tensión en la dirección del espesor sea nula.

El cálculo de las deformaciones y de las tensiones mecánicas en un sólido tridimensional es un problema que no tiene mayor complejidad conceptual al llevar su análisis al plano bidimensional, pero al realizar el cálculo de estas variables en tres dimensiones es fundamental el MEF para lograr resultados confiables.

Recordemos lo señalado al anteriormente respecto a la ubicación y dirección de los vectores, lo cual queda ejemplificado en las Figuras 47 y 48, donde se muestran dichos vectores:

**Figura 47**

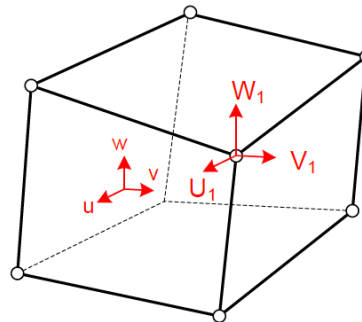
*Deformación unitaria en elemento tridimensional*



*Nota.* Adaptado de *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (p. 87), por J. T. Celigüeta, 2011, UNICOPIA C. B.

**Figura 48**

*Deformaciones en un elemento finito*



*Nota.* Se observa un Elemento finito tridimensional de 8 nodos, Adaptado de *EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS aplicado al análisis estructural* (p. 379), por M. Vázquez. 2001, Noela.

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} \quad (4.52)$$

Los desplazamientos se interpolan en función de los desplazamientos nodales mediante las funciones de interpolación ( $u$  y  $v$  son las mismas que para el caso bidimensional):

$$w = \sum N_i W_i \quad (4.53)$$

Y recordemos que las tensiones en un punto cualquiera del dominio están definidas por el tensor de tensiones en dicho punto, cuya expresión general para elementos tridimensionales es:

$$\sigma = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx}\}^T \quad (4.54)$$

Asimismo, se conoce la ecuación constitutiva del material que forma el dominio, y que relaciona las tensiones con las deformaciones unitarias. Para un material elástico lineal esta ecuación constitutiva se puede poner en la forma:

$$\sigma = \mathbf{D} (\varepsilon - \varepsilon_o) + \sigma_o \quad (4.55)$$

- $\mathbf{D}$  la matriz elástica, que para un material elástico lineal es constante y depende de sólo dos parámetros: el módulo de elasticidad  $\mathbf{E}$  y el módulo de Poisson  $\nu$ .
- $\varepsilon_o$  el vector de las deformaciones unitarias iniciales existentes en el material en el punto considerado, que deben ser conocidas. Las más habituales son las debidas a las temperaturas, aunque pueden incluirse en ellas las debidas a los errores de forma, etc.
- $\sigma_o$  las tensiones iniciales presentes en el material, que normalmente son tensiones residuales debidas a procesos anteriores sobre el material (p.ej. tratamiento térmico) y que por lo tanto son conocidas.

Las expresiones particulares de la matriz elástica  $\mathbf{D}$  y de los vectores  $\varepsilon_o$  y  $\sigma_o$  dependen del tipo de problema considerado y serán estudiadas en cada caso particular. Sin embargo, se observa que se trata de las mismas ecuaciones bidimensionales, pero con la adición de los parámetros en el tercer plano.

#### 4.8. Cálculo de Esfuerzos Principales

Debido a la complejidad que adquieren los arreglos matriciales y sus iteraciones durante la evaluación, la integración y derivadas de los valores de los vectores de esfuerzos inter nodales, conviene tomar en cuenta sólo conceptos fundamentales en el análisis de las deformaciones en cuerpos tridimensionales, que se encuentran bajo la acción de fuerzas mecánicas.

Por tanto, se explican a continuación, los principales conceptos que toman en cuenta los programas de diseño digital, para la simulación de esfuerzos y deformaciones.

#### 4.8.1 El Círculo de Mohr

Se trata de un método desarrollado por el ingeniero alemán Charles Otto Mohr a finales del siglo XIX, es una herramienta de importante para la resolución de problemas en el ámbito de la Resistencia y la Mecánica de Materiales.

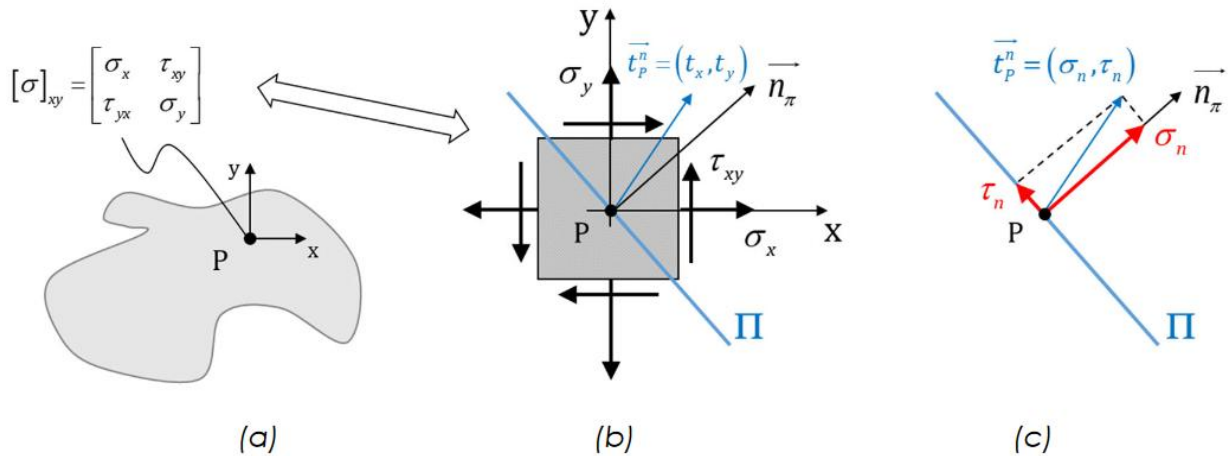
Sirve como base para el estudio de un medio elástico en un dominio bidimensional, considerando la matriz de tensiones de Cauchy  $[\sigma]_{xy}$  en un punto P, y esta es referida a un sistema cartesiano  $xy$ , como se muestra en la Figura 49.a, esta matriz se corresponde biunívocamente con un estado en tensión en el punto P. El estado tensional se obtiene haciendo pasar en la proximidad de P cuatro planos ortogonales a los ejes  $x$  e  $y$ , definiendo un elemento diferencial plano. En el punto P, asociado a cada uno de tales planos, existe un vector tensión, cuyas componentes intrínsecas normal ( $\sigma$ ) y tangencial ( $\tau$ ) se representan en las caras del elemento, véase en la Figura 49.b.

De esta forma, si por el punto P se hace pasar un plano  $\Pi$  cualquiera, caracterizado a través de su vector normal  $\vec{n}_\pi$  en P aparece un nuevo vector tensión  $\vec{t}_P^\pi$  asociado al plano  $\Pi$ , cuyas coordenadas cartesianas son  $(t_x, t_y)$ . Sin embargo, la expresión del vector tensión en función de sus componentes intrínsecas  $(\sigma_n, \tau_n)$  reviste un mayor interés en el ámbito de la ingeniería, ejemplificado en la Figura 49.c.

Tomando en cuenta este punto de partida, el Círculo de tensiones de Mohr, es una herramienta que permite la representación gráfica del infinito conjunto de vectores tensión  $\vec{t}_P^\pi = (\sigma_n, \tau_n)$  en el punto P, expresados a partir de sus componentes intrínsecas referidas a una orientación  $\vec{n}_\pi$  (el vector normal al plano  $\Pi$ ).

**Figura 49**

*Estado de esfuerzos en un punto P, Círculo de Mohr.*



*Nota.* En la figura se muestran los diferentes vectores en el Círculo de Mohr. Adaptado de “Guía metodológica para el trazado del Círculo de Mohr de tensiones” (p. 2), por A. Lapuebla, 2019, *RiuNet.UPV* (10251/12272)

#### 4.8.2 Procedimiento de Trazo del Círculo de Mohr

Para la construcción del Círculo de Mohr, se supone conocido el estado tensional en un punto P (véase la Figura 57.b). El procedimiento más común es el siguiente:

1. Disposición de los ejes  $\sigma_n - \tau_n$ .
2. Ubicación de los puntos de referencia.
3. Cálculo del centro y del radio.
4. Trazado del círculo.
5. Cálculo de las tensiones principales.
6. Orientación de las direcciones principales de tensión.
7. Orientación de las direcciones de tensión tangencial máxima.
8. Lectura de un vector tensión en cualquier orientación.

En el eje  $x$  se trazan las tensiones normales  $\sigma_n$  y en el eje  $y$  los esfuerzos cortantes  $\tau_n$ , los puntos de referencia  $x$  e  $y$ , tendrán coordenadas  $(\sigma_x, \tau_{xy})$  y  $(\sigma_y, \tau_{yx})$  respectivamente. En lo que respecta al centro del círculo, se calcula como:

$$\overrightarrow{OC} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (4.56)$$

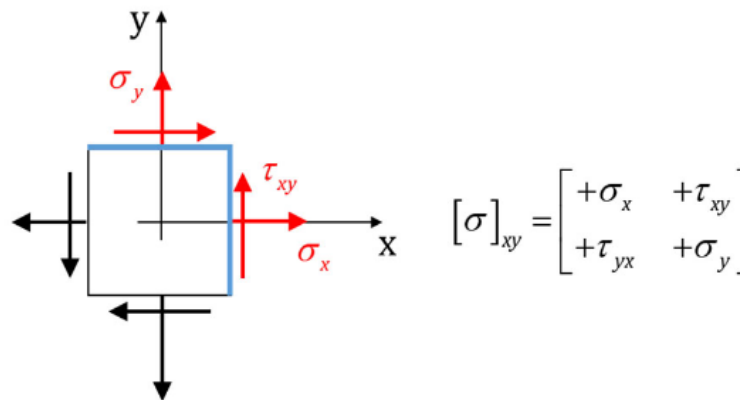
Y el radio

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (4.57)$$

Es importante tomar adecuadamente los signos de los esfuerzos, según el criterio de Cauchy, tanto las tensiones normales  $\sigma_n$  como las tensiones tangenciales  $\tau_n$  son positivas si, estando en una cara vista, su sentido es positivo según el eje coordenado al que son paralelas, tal como puede observarse en la Figura 50.

**Figura 50**

*Criterio de signos de los esfuerzos*



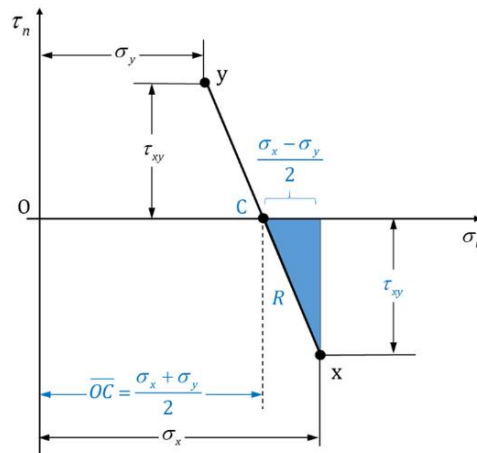
$$[\sigma]_{xy} = \begin{bmatrix} +\sigma_x & +\tau_{xy} \\ +\tau_{yx} & +\sigma_y \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

*Nota.* Adaptado de “Guía metodológica para el trazado del Círculo de Mohr de tensiones” (p. 4), por A. Lapuebla, 2019, *RiuNet.UPV* (10251/12272)

Se debe tomar en cuenta que el Teorema de Cauchy, hace la reducción a 2 las componentes independientes de esfuerzos que corresponden a las componentes que intervienen en el vector de esfuerzos  $\sigma$ , para cada plano en análisis; a partir de los puntos de referencia señalados, se puede obtener el sistema mostrado en la Figura 51 a continuación.

**Figura 51**

*Puntos de referencia x e y, en el Círculo de Mohr*

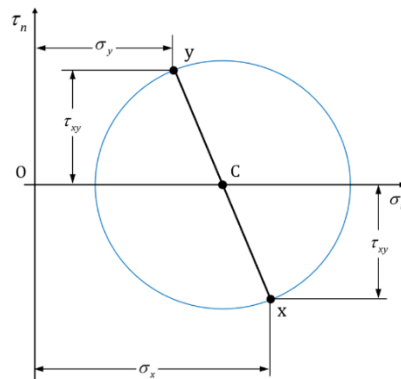


*Nota.* Puntos de referencia x e y, en el sistema  $\sigma_n - \tau_n$ . Adaptado de “Guía metodológica para el trazado del Círculo de Mohr de tensiones” (p. 5), por A. Lapuebla, 2019, *RiuNet.UPV* (10251/12272)

De la Figura 51, tomando el centro y el radio a partir del punto “C”, es posible trazar gráficamente el Círculo de Mohr como se muestra en la Figura 52.

**Figura 52**

*Círculo de Mohr y sus vectores*



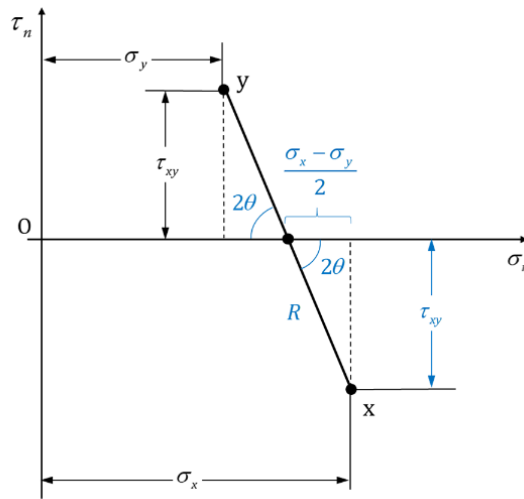
*Nota.* Adaptado de “Guía metodológica para el trazado del Círculo de Mohr de tensiones” (p. 6), por A. Lapuebla, 2019, *RiuNet.UPV* (10251/12272)

### 4.8.3 Orientación de las direcciones principales de tensión

En la Figura 53., se observa que las direcciones de los vectores principales se pueden obtener del Círculo de Mohr, girando  $2\theta$  el ángulo, desde el eje x (para obtener la dirección principal 1) o alternativamente, desde el eje y (para obtener la dirección principal 2).

**Figura 53**

*Direcciones principales en gráfico de Mohr*



*Nota.* Adaptado de “Guía metodológica para el trazado del Círculo de Mohr de tensiones” (p. 6), por A. Lapuebla, 2019, *RiuNet.UPV* (10251/12272)

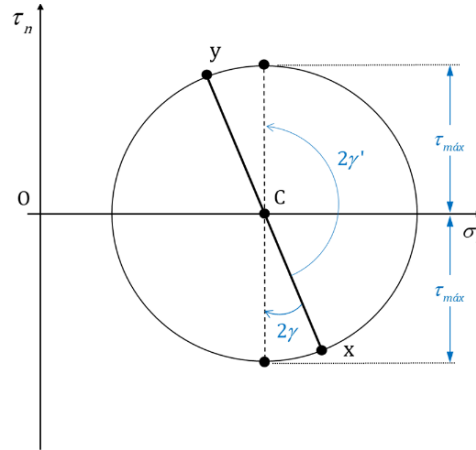
En la realidad, el ángulo físico a girar será la mitad del ángulo girado en el círculo:

$$\tan 2\theta = \left| \frac{\tau_{xy}}{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}} \right| \quad \rightarrow \quad \theta = \frac{1}{2} \arctg \left( \left| \frac{\tau_{xy}}{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}} \right| \right) \quad (4.59)$$

Lo que permite dibujar propiamente el Círculo de Mohr, y se conoce entonces, la orientación de las direcciones de  $\tau_{max}$ ; como se representa en la Figura 54.

**Figura 54**

*Planos de Tensión tangencial máxima de Mohr*



*Nota.* Adaptado de “Guía metodológica para el trazado del Círculo de Mohr de tensiones” (p. 7), por A. Lapuebla, 2019, *RiuNet.UPV* (10251/12272)

Y de las figuras anteriores, se definen las siguientes formulaciones que determinan el valor de los vectores:

$$\tau_{max} = \mp R \quad (4.60)$$

$$\sigma_n : \tau_{max} = \overrightarrow{OC} \quad (4.61)$$

$$2\gamma = 2\theta \mp 90^\circ \quad (4.62)$$

Con los planteamientos teóricos anteriormente expuestos, se concibe de manera general el papel que juegan los esfuerzos en los diferentes elementos de estudio, así como la manera en que se hace la vectorización de los datos para poder hacer una malla que una por medio de nodos o nudos, los diferentes puntos de tensión, y saber en qué parte del elemento en estudio se ejercen las principales cargas. Todos estos datos e iteraciones dan origen al análisis y cálculo de Tensiones a través del Método del Elemento Finito.

## 4.9 El MEF y el equipo de cómputo para su desarrollo

Como se ha explicado a lo largo de este proyecto, el Análisis del comportamiento de esfuerzos y resistencia de cuerpos o elementos tridimensionales, se logra representar con precisión

aceptable a través del uso del Método de Elemento Finito; y para ello, se requieren evaluar un gran número de datos y ecuaciones, que resultaría imposible hacer sin el apoyo de los equipos de cómputo.

#### **4.9.1 Uso de equipos de cómputo en el análisis numérico de elementos finitos**

Es indiscutible la enorme ventaja que trajo el desarrollo de los equipos computacionales en el análisis de alto número de datos o volúmenes de datos antes jamás evaluados por un mismo ordenador y en una fracción del tiempo que tomaba al principio de los años 80. Así mismo, el uso de problemas con matrices generales como las ecuaciones (4.48) y (4.49), requieren definir las funciones de la forma del elemento en estudio, señalar el orden de la integración y el grado de libertad y precisión de los resultados, y para esto suele requerirse un gran número de operaciones, por lo que, al realizarlas con equipo de cómputo y algún programa especial para diseño, se agiliza todo el proceso y eliminan errores en el cálculo.

El uso de programas o lenguajes de cómputo para el estudio de la mecánica de esfuerzos en elementos tridimensionales empleando Análisis de Elemento Finito lleva más de veinte años perfeccionándose, y ejemplos de estos softwares son: FORTRAN, Femap (herramienta independiente del CAD), CATIA, PTC CREO, NX, HyperWorks, Solid Edge, Patran, SOLIDWORKS (apoyado en Abaqus) y AutoCAD, siendo estos de los más reconocidos entre los principales usuarios a nivel global.

Después de entender las bases matemáticas con las que se han estructurado las ecuaciones de manera general en los programas de diseño con MEF, también se revisaron estudios recientes sobre la resistencia a la tracción mecánica de la madera o de sus diferentes sub productos aglomerados, teniendo como requisito el uso del AEF. Aparentemente el desabasto mundial de los recursos maderables, debido a la pandemia global de COVID19, propició que a partir del 2020 se presentaran diversas publicaciones científicas al respecto, en las que se demostró la versatilidad y precisión de los diferentes programas o softwares de diseño, en el modelado digital de la madera y sus características mecánicas.

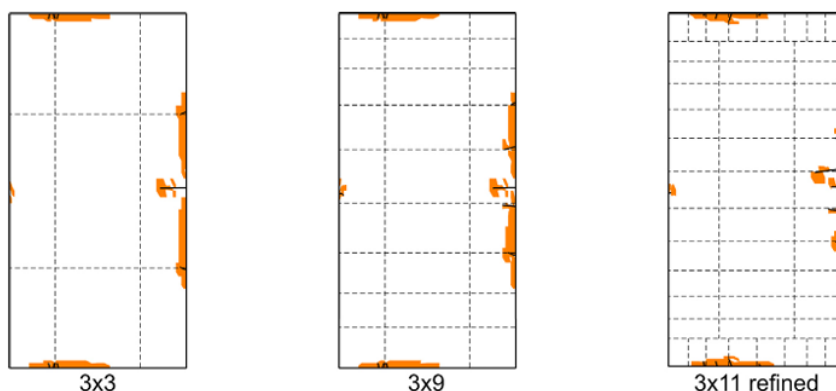
De esta forma, actualmente se pueden revisar publicaciones recientes referentes al análisis de la resistencia mecánica o elasticidad de la madera sólida y de paneles como el MDF o

aglomerados, con ayuda del MEF usando equipos modernos de cómputo, los cuales resultan de gran ayuda para este proyecto de investigación ya que a través de estos estudios, se confirma que, la simulación digital del comportamiento de la madera (sólida y aglomerada) a esfuerzos mecánicos, puede simularse con gran consistencia y precisión con respecto a los resultados físicos en pruebas mecánicas de laboratorio.

Uno de las publicaciones que permite ver el avance tecnológico en la simulación digital del comportamiento de la madera ante el efecto de las condiciones ambientales, lo muestra Autengruber et al., (2020), en su publicación acerca de la predicción a través de elemento finito, de fallas en maderas laminadas compuestas de virutas y adhesivos; donde los resultados del estudio a través del AEF confirman que los valores estimados respecto a los puntos de quiebre de las muestras de láminas de madera, eran mayores en los bordes, justo como se presentó en las muestras físicas del estudio, señalando en la simulación digital los puntos donde se mostraría mayor área de deformación a la tensión mecánica (en color naranja), en la Figura 55 se muestran las imágenes reportadas por Autengruber et al., (2020).

**Figura 55**

*Grietas presentadas por zonas, de probetas de maderas con adhesivo*

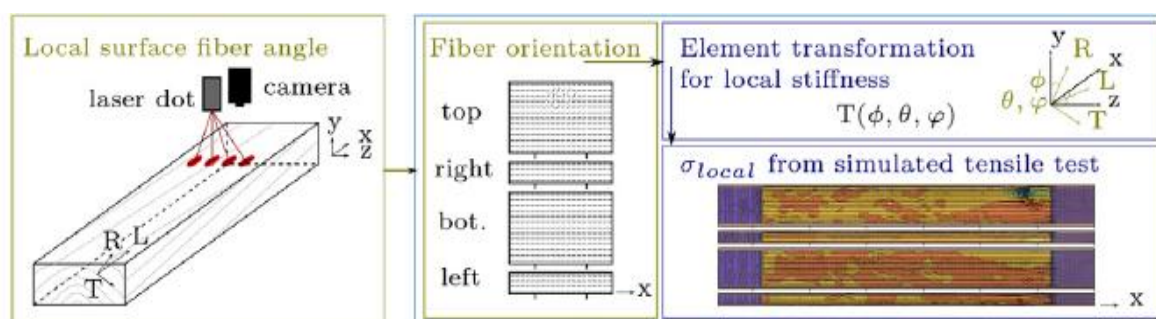


*Nota.* En la imagen se muestran diferentes configuraciones: los bordes con adhesivos adicionales, reducen la propensión a grietas (marcas en color naranja). Adaptado de “Finite-element-based prediction of moisture-induced crack patterns for cross sections of solid wood and glued laminated timber exposed to a realistic climate condition” (p.8), por M. Autengruber, et al., 2020, *Construction and Building Materials*, 271(2021).

Otro estudio realiza una estimación de la resistencia mecánica a través del escaneo láser, presentado por Seeber et al., (2023) en “A numerical strength prediction approach for wood using element-wise local fiber directions from laser scanning”, y permite comprobar que, la caracterización digital de la madera sólida, arroja valores prácticamente iguales a los datos conseguidos en pruebas mecánicas de esfuerzo a la tensión sobre muestras físicas de madera laminada de diferentes tipos de pino y abedules; en la Figura 56, se muestra esquemáticamente cómo se realizó el escaneo físico y la simulación digital de las probetas:

**Figura 56**

*Datos de entrada y simulación digital del escaneo láser*



*Nota.* Adaptada de “A numerical strength prediction approach for wood using element-wise local fiber directions from laser scanning” (p. 1), por Seeber et al., 2023, *Materials & Design* 226(2023).

Y después de revisar los resultados, los autores pueden corroborar que el modelado numérico digital, junto con el análisis de regresión múltiple, predice de manera satisfactoria con una aproximación del valor de la resistencia a la elongación y a la ruptura 26% más alta, con respecto a los datos obtenidos físicamente; lo que se podría ajustar, con la interpolación de los datos con un factor de seguridad menor, dicen los autores.

Uno de los detalles que se logran dilucidar es que, el programa de simulación, considera a las probetas con vectores sin interrupción en toda la longitud de las muestras y excluye matemáticamente la presencia de los nudos de las mismas, y con ello se desprecia la reducción de resistencia de la madera en los puntos cercanos a los nudos que contienen las muestras de estudio.

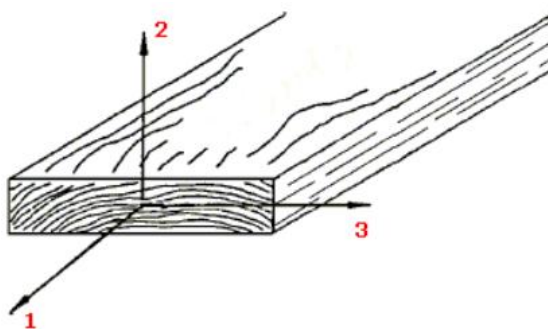
Como se mencionó anteriormente, el aumento en el uso de los recursos maderables para la construcción, producción de muebles y empaques, entre otras aplicaciones se incrementó

aceleradamente en cuanto se regresó a la normalidad la comercialización a nivel global después de la pandemia de COVID19 y con ello también se realizaron proyectos de simulación digital de la madera y sus características, como en el caso de la publicación realizada por Huber et al., (2021)., donde presentan la elaboración de modelos generados por software de diseño, a partir de rayos X computarizados y apoyados en análisis de elemento finito. Este estudio se realizó con la intención de obtener de manera expedita con la ayuda de un escáner de rayos-X y la digitalización de las imágenes obtenidas, los valores de densidad, rigidez y resistencia mecánica, de la madera.

Al igual que en la publicación de Huber, (2021)., este proyecto de tesis toma en consideración la facultad del AEF para poder simular el comportamiento en cuerpos anisotrópicos u ortotrópicos, como la madera, como se puede visualizar en la Figura. 57, la resistencia de la madera dependerá del eje sobre el cual se ejerza el esfuerzo.

**Figura 57**

*Propiedad ortotrópica de la madera en sus 3 ejes*



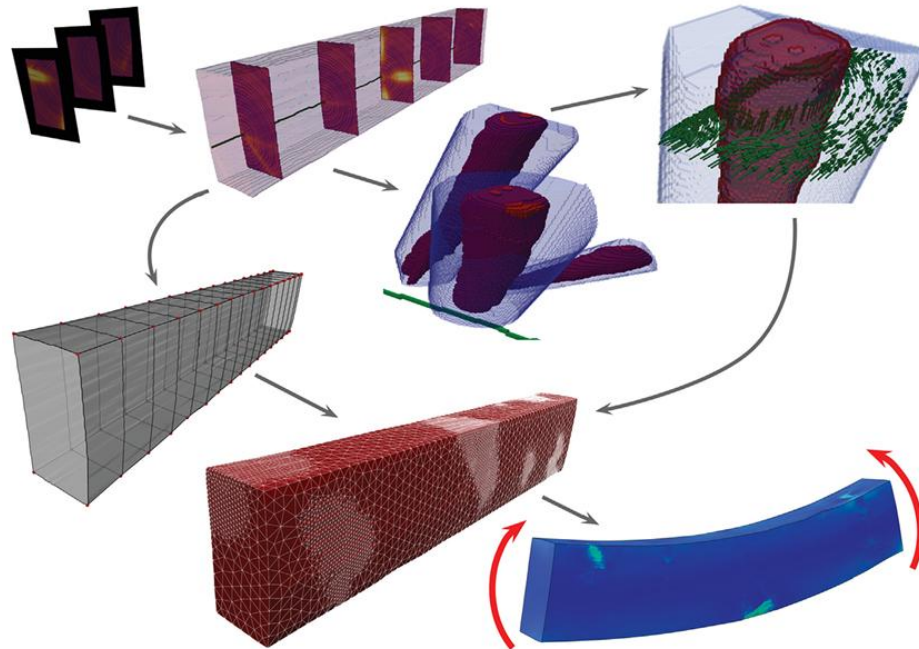
*Nota.* Se muestra la propiedad ortotrópica de la madera en sus 3 ejes: Longitudinal (1), Radial (2) Tangencial (3). Adaptado de *Propiedades de la madera*, por MaderaPedia.com, 2020, [https://www.maderapedia.com/madera/propiedades\\_de\\_la\\_madera.html](https://www.maderapedia.com/madera/propiedades_de_la_madera.html), CC.BY.3.0.

Es así como las propiedades mecánicas de la madera, analizadas en un punto cualquiera, dependerá de la dirección donde se ejerza (ver Figura 57): longitudinal, radial o tangencial a los anillos de crecimiento. Lo valioso del trabajo presentado por Huber (2021), es la digitalización y caracterización de los nudos de la madera y su consideración dentro de su modelo de Elemento Finito para la obtención de los valores de resistencia mecánica de las

probetas en los Abetos que se usaron como muestra. En la Figura 58., se observa el esquema del algoritmo empleado en el estudio de (Huber, 2021).

**Figura 58**

*Esquema del algoritmo para la simulación 3D con EF*

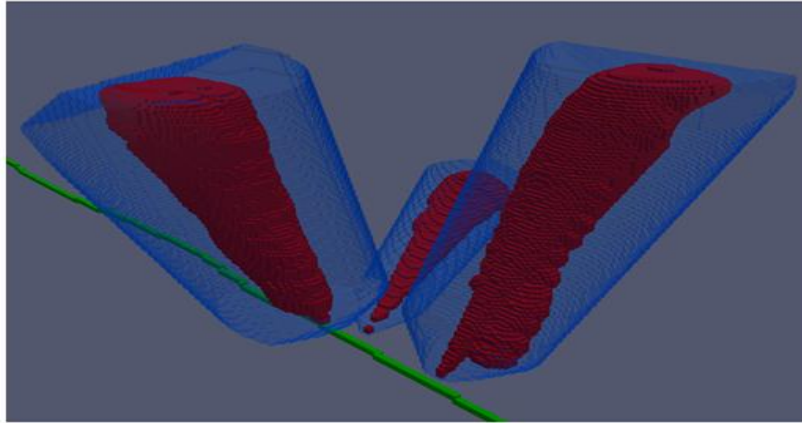


*Nota.* En la figura se muestra el esquema gráfico del algoritmo para la simulación 3D con EF, a partir de imágenes de rayos-X. Adaptada de “A method for generating finite element models of wood boards from X-ray computed tomography scans” (p.4), por J. Huber et al., 2021, *Computers and Structures* 260(2022).

En este estudio se hace la idealización de las formas de los nudos a través del espesor dentro de las duelas muestra, por lo que se discriminan aquellas irregularidades de la madera por debajo de los 25 mm de longitud y con ángulos menores a los 45° y mayores de 80° de inclinación con respecto al corte longitudinal de la probeta; en las Figuras 59 y 60 se presentan estas digitalizaciones.

**Figura 59**

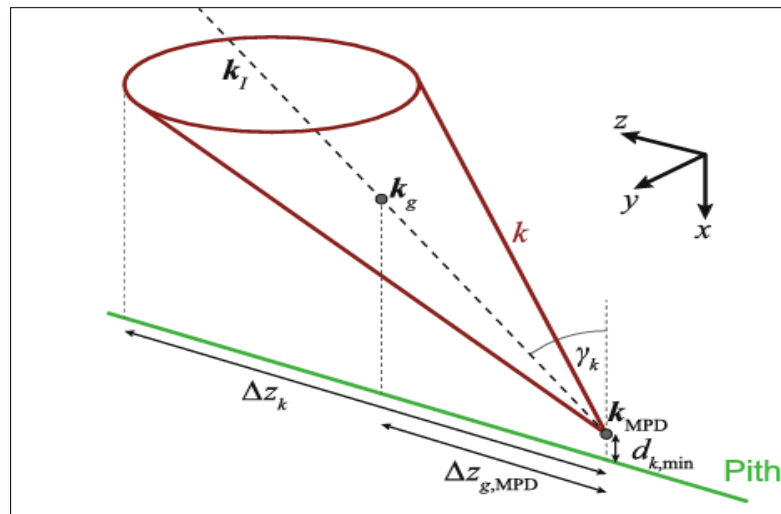
*Simulación digital de Madera y Nudo en probeta*



*Nota.* Se muestra la Imagen digital de la Madera (azul) y los nudos (rojo). Adaptada de “A method for generating finite element models of wood boards from X-ray computed tomography scans” (p. 6), por J. Huber et al., 2021, *Computers and Structures* 260(2022).

**Figura 60**

*Idealización de un nudo en muestra de madera*



*Nota.* Se muestra la Imagen digital de la Madera (azul) y los nudos (rojo). Adaptada de “A method for generating finite element models of wood boards from X-ray computed tomography scans” (p. 6), por J. Huber et al., 2021, *Computers and Structures* 260(2022).

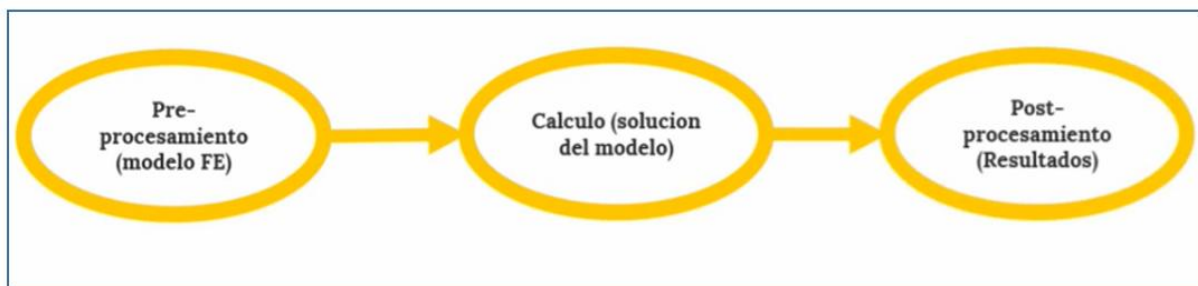
Se hace la digitalización y análisis de las formas de los nudos a través del espesor de las duelas, y considerando ajustes en los valores del Factor de Seguridad de  $2 > f_s < 3.5$ , también lo señala Alvis-Gordo (2017)., se logra gran precisión en el cálculo del Módulo de Elasticidad estimado con EF, en comparación con los datos obtenidos físicamente con los métodos mecánicos y de imagen tradicionales.

## CAPÍTULO V. METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto de tesis, se basa en la técnica de simulación de objetos por el Análisis de Elemento Finito de variables continuas, asistida por computadora. En este caso, empleando como base de simulación las herramientas y utilerías del software SOLIDWORKS versión 2023. Este Análisis, tal como se expresó en el capítulo anterior, es una técnica numérica utilizada para simular sistemas físicos. La técnica más común está basada en el cálculo de los desplazamientos e incluye 3 etapas: El Pre procesamiento (Modelo de Elemento Finito), Cálculo con software Especializado (Solución del Modelo) y Post procesamiento (análisis de resultados), lo anterior se representa en la Figura 61.

**Figura 61**

*Etapas del proceso de Simulación Digital*



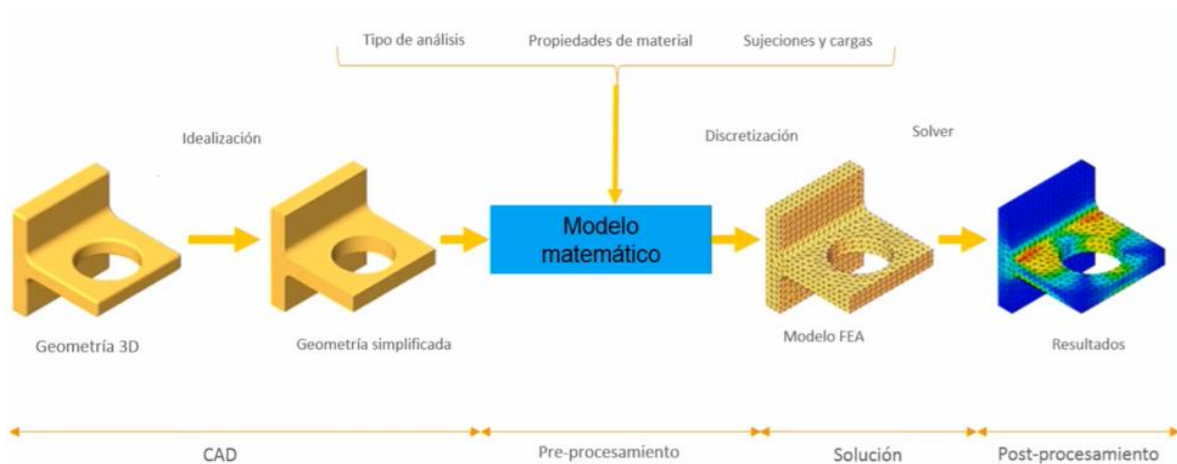
Nota. Adaptada de Tutorial SOLIDWORKS, por DSW, 2024, <https://ditlag.wordpress.com/2018/03/05/introduccion-a-solidworks-simulation-y-analisis-de-elemento-finito/>, CC BY.3.0.

Como se expresó en el capítulo anterior, el proceso de simulación digital de objetos tridimensionales, surge como una necesidad de ahorrar tiempo y recursos físicos como materiales, instalaciones de prueba, horas hombre, entre los principales factores y variables, para el desarrollo de estructuras u objetos (maderables para el estudio de este proyecto de tesis) que son empleados en la construcción, la industria de transporte y el empaque, el hogar, entre otros. En la Figura 62., se esquematiza la forma en que se obtiene la digitalización de un objeto, y la manera en que su geometría se estiliza o idealiza en la medida de lo posible, para

lograr superficies donde se aplique una “malla” o retícula con los nodos o pivotes a través de los cuáles se calculan los esfuerzos aplicados en dicho objeto.

**Figura 62**

*Preparación de la geometría para el AEF*



Nota. Adaptada de *Tutorial SOLIDWORKS*, por DSW, 2024, <https://ditlag.wordpress.com/2018/03/05/introduccion-a-solidworks-simulation-y-analisis-de-elemento-finito/>, CC BY.3.0.

**Modelo CAD.** Es el modelado elaborado antes de realizar el estudio (de las siglas en inglés: Computer Aided Design), es necesario contar con el diseño del producto que se desea evaluar. Aquí, puede ser posible simplificar el diseño al no considerar detalles específicos que no interesan en el estudio, para que de esta manera los requerimientos computacionales no sean demasiado altos. En esta etapa se debe construir el modelo de material compuesto con una matriz polimérica (Resina epóxica) y las Fibras de refuerzo (Madera).

**Pre procesamiento.** Este incluye, la definición del tipo de análisis, la selección del tipo de materiales a emplear y sus propiedades, la aplicación de sujeciones y cargas en el modelo.

**Solución del Modelo.** La solución también considera la selección del tipo de malla y el tamaño de esta.

**Post procesamiento.** Finalmente, en el post procesamiento, se deben configurar las variables de salida, en este caso los esfuerzos, deformaciones, desplazamiento y el factor de seguridad para realizar el análisis.

## **5.1 Tipo de Estudio**

Será un estudio Estático por Simulación Digital a través de Análisis de Elemento Finito de un material compuesto reforzado con fibras de madera al cual se le aplicará una serie de cargas (kgf y/o Newton) para analizar su comportamiento de resistencia a la tensión, desplazamientos, deformaciones y el factor de seguridad. Con el objetivo principal de corroborar que esta idealización o simulación digital de la estructura compuesta de madera y aglutinantes, permite realizar pruebas mecánicas para predecir su punto de falla; evitando así, el requerimiento de la compra de muestras físicas de carretes de empaque, para su evaluación física una vez que se tenga certeza de un desempeño favorable, y lograr para la compañía Condumex el ahorro de recursos materiales y económicos.

Cabe señalar que el estudio de este proyecto se fundamentará en el análisis meticuloso de las características de la madera y su comportamiento como parte de los tableros o aglomerados comerciales y el beneficio que conlleva la idealización digital de una alternativa estructural del material compuesto que se propone como base fundamental de este trabajo de investigación, con la finalidad de evitar la utilización de madera sólida o virgen en la elaboración de alrededor de un 15% de los carretes de empaque de los productos (cables) del sector Telecom de Condumex.

### **5.1.1 Diseño de Investigación**

La finalidad de esta investigación será comprobar que el diseño y evaluación digital de un material compuesto de madera y material aglutinante como la resina epóxica, y para ello, se probarán tres niveles de carga y un tamaño de fibra para determinar los niveles de esfuerzo, desplazamiento y deformación que es capaz de soportar el nuevo material que se propone como alternativa a la madera procesada, natural y/o MDF.

Se analizará el efecto del tamaño de la fibra en las variables mencionadas y se evaluará su comportamiento con respecto al factor de seguridad  $2 < f_s < 3.5$ , (Alvis-Gordo, 2017), como

lo recomiendan también las publicaciones especializadas a nivel global en los ámbitos industriales y de la construcción para elementos estructurales y en el empleo de madera.

Se espera que los datos obtenidos como resultado de la simulación digital, permitan evaluar virtualmente por computadora, estructuras de materiales compuestos de madera y aglutinantes como adhesivos o resinas; optimizando el proceso de desarrollo de empaques, sin que la empresa requiera hacer la compra de muestras físicas para pruebas de desempeño mecánico; economizando recursos y materiales, ya que estos empaques prototipo, generalmente se destruyen, y esto sería evitado con la evaluación previa por AEF.

## **5.2 Sujetos de Estudio o población**

El sujeto de estudio es la materia prima que conforma las bridas de los carretes de empaque, basándose en el carrete para cables de acometida óptica más vendido en la empresa Condumex, planta San Juan del Río, Qro., en el periodo comprendido entre los años 2021 – 2023. La población usuaria del resultado satisfactorio de este desarrollo, son todas las Plantas filiales de Grupo Condumex, Sector Cables. Las cuales podrán utilizar el producto para la elaboración de sus carretes (donde aplique para el manejo y distribución de sus cables) y contarán con beneficios económicos por el ahorro en estos empaques, al dejar de requerir como materia prima la madera sólida o triplay, en la elaboración de los mismos a los proveedores de carretes.

La población o universo final (para un proyecto futuro de implementación), será un grupo de 10 Carretes de diferentes dimensiones, de acuerdo a la Tabla 5., en donde se señala un diámetro de cable (DIAM. CAB) como nominal de referencia, de 7.0 mm; y se muestra la diferencia de capacidades de este cable que tendría cada carrete de acuerdo a sus dimensiones estructurales, sin olvidar que la principal intención es el desarrollar un material similar o de mayor resistencia mecánica al empleado para la fabricación de estos carretes que presentaron la mayor demanda de consumo como materiales auxiliares en la elaboración de los productos (cables) de Condumex, planta San Juan del Río, Qro., en el periodo de comprendido entre los años 2021 y 2023.

La información referente a códigos, consumos y precios de los carretes adquiridos por Condumex, son de carácter privado y de uso restringido por la empresa, debido a que se

consideran de secretos industriales al resultar de relevancia sensible ante la competencia del mercado de telecomunicaciones y los clientes finales.

**Tabla 5**

*Universo de códigos de carretes a desarrollar*

|                                 |               |              |                |              |                                           |          |
|---------------------------------|---------------|--------------|----------------|--------------|-------------------------------------------|----------|
| <b>DIAM. CAB. Nominal [mm]:</b> |               |              |                |              |                                           | 7.0 ±0.2 |
| <b>ALTURA CABLE [mm]:</b>       |               |              |                |              |                                           | 0        |
| <b>DIAM. EQUIVALENTE [mm]:</b>  |               |              |                |              |                                           | 7.0 ±0.2 |
|                                 | [cm]          | [cm]         | [cm]           | [cm]         |                                           | [km]     |
| <b>CARRETE (Cod. CX)</b>        | <b>TAMBOR</b> | <b>BRIDA</b> | <b>CARRERA</b> | <b>CLARO</b> | <b>CAPACIDAD<br/>(longitud del cable)</b> |          |
| 78NT28AC                        | 20.0          | 50.0         | 28.0           | 3            | 1.050                                     |          |
| 78NA42MDF                       | 42.0          | 60.0         | 50.0           | 3            | 1.145                                     |          |
| 78NA4275MDF                     | 42.0          | 75.0         | 50.0           | 3            | 2.390                                     |          |
| MT070040                        | 30.0          | 70.0         | 40.0           | 6            | 1.805                                     |          |
| MT075050                        | 35.0          | 75.0         | 50.0           | 6            | 2.295                                     |          |
| MT075065                        | 35.0          | 75.0         | 65.0           | 6            | 3.020                                     |          |
| MT080050                        | 35.0          | 80.0         | 50.0           | 6            | 2.795                                     |          |
| MT080065                        | 35.0          | 80.0         | 65.0           | 6            | 3.575                                     |          |
| MT080070                        | 35.0          | 80.0         | 70.0           | 6            | 3.835                                     |          |
| MT085070                        | 35.0          | 85.0         | 70.0           | 6            | 4.585                                     |          |

*Nota.* Esta tabla muestra los códigos y dimensiones de carretes actualmente empleados y de mayor consumo anual (2021-2023) CONDUMEX® SJR. Elaboración propia, 2023.

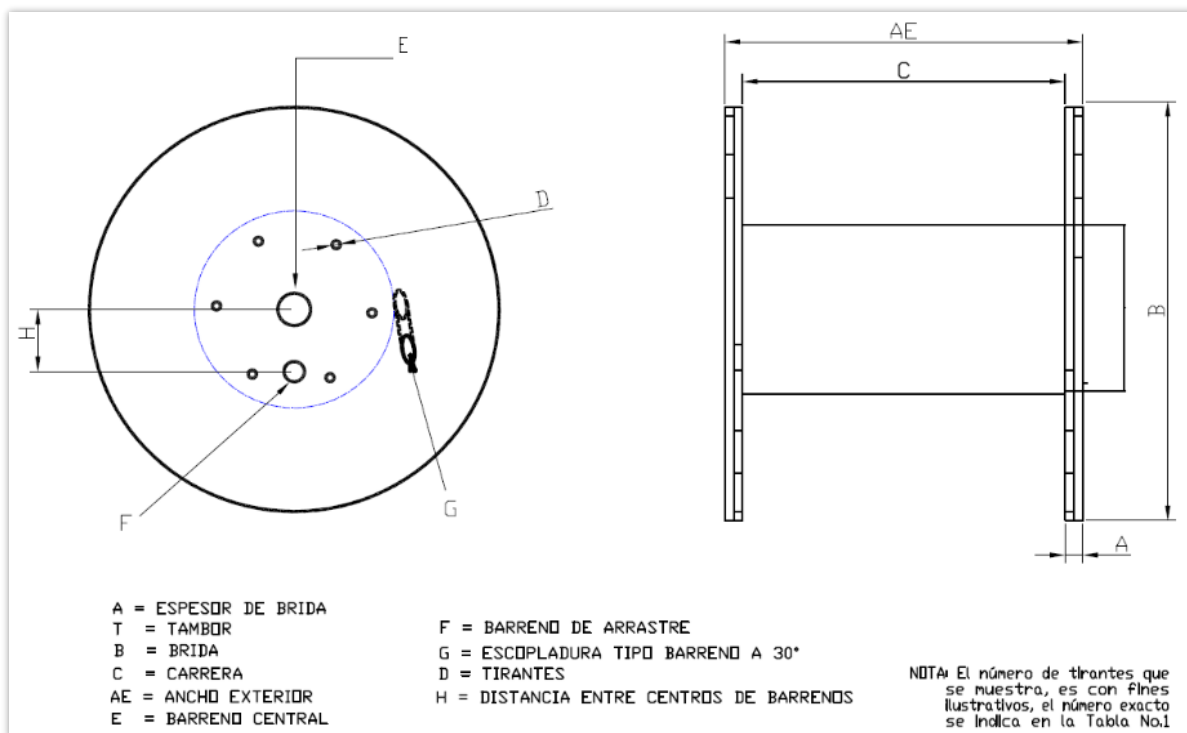
### 5.3 Muestra

La codificación de los carretes en la primera columna de la Tabla 5., está tomada de la nomenclatura empleada por la empresa Condumex (CX), y hace referencia al material con el que se elaboran sus bridas y sus dimensiones generales.

En la Figura 63 se observa el diseño general de un carrete empleado como empaque de los cables de CX. Pueden existir variantes constructivas, pero son mínimas y no interfieren con la construcción genérica de los mismos, ya que sólo cambian detalles como diámetro de orificios para pernos de arrastre o cantidad de clavos o número de tirantes, entre otros materiales. Pero el espesor de las bridas y las dimensiones se definen como parte individual de cada uno de estos empaques, siendo cruciales las medidas de bridas, la carrera y del tambor.

**Figura 63**

*Construcción general de carrete o bobina de empaque para cables*



*Nota.* La figura corresponde al plano genérico constructivo de los carretes de empaque para los productos de Condumex, sector cables. Elaboración propia, 2020.

Aunque la muestra final del proyecto se entiende que será el desarrollo de la bobina de mayor consumo para cables Acometida Óptica en Condumex, SJR., durante el periodo entre 2021-2023, se ha determinado que el alcance de este proyecto, será sólo la simulación digital del material compuesto de fibras de madera (de balsa, según la librería disponible en DSW) en subunidades de 50 mm y 24 mm (véanse Figuras 64 – 67) para formar capas alternadas con bloques rectangulares de 10 mm por lado, con un espesor de 1 mm promedio de aglutinante o resina epóxica sin carga para la unión, definida en la librería de SOLIDWORKS. Y la dimensión final de la probeta será 30 x 60 x 208 mm<sup>3</sup>.

## 5.4 Instrumento de recolección de datos

La recolección de los datos será a través de lectura de los cálculos y resultados generados automáticamente en los reportes del software y del AEF en SOLIDWORKS para las diferentes

corridas experimentales, y para cada una de ellas se contará con el modelo de simulación para incluir otros tipos de análisis, que pudieran ser necesarios.

La concentración de la información se hará tomando los datos, directamente de los cuadros de valores presentados en las tablas de resultados mostrados por el programa SOLIDWORKS en los rubros de: Tensiones (von Mises), Desplazamientos, Deformaciones unitarias y Factor de Seguridad, para cada simulación y Análisis de Elemento Finito.

## **5.5 Instrumento de análisis de datos**

Es importante mencionar que las técnicas de análisis por elemento finito requieren del apoyo computacional para poder aplicar el método del modelado a productos o ensambles en condiciones reales. Por lo tanto, los datos que se muestran en este proyecto de investigación, son procesados directamente en el software SOLIDWORKS y presentados de manera gráfica y numérica, por lo que será necesario la interpretación de estos.

A través de la información señalada en este trabajo, se mostró cómo el análisis y cálculo de estructuras a través del Método de Elemento Finito, se ha convertido en una poderosa herramienta de la ingeniería aplicada. Y el tratamiento de toda esta información, se ha beneficiado del avance tecnológico de la computación, que permite actualmente la ejecución de cuantiosos cálculos matemáticos y su representación gráfica en tiempos muy cortos, cada vez con mayor versatilidad y capacidades; cualidades que anteriormente sólo estaban restringidas para el uso militar y espacial, debido al elevado precio de los ordenadores capaces de manejar la cantidad de información que se genera durante el proceso de simulación o idealización de los sistemas estructurales, eléctricos, elásticos, médicos, entre muchos otros.

## CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE DATOS

### 6.1 Procedimiento

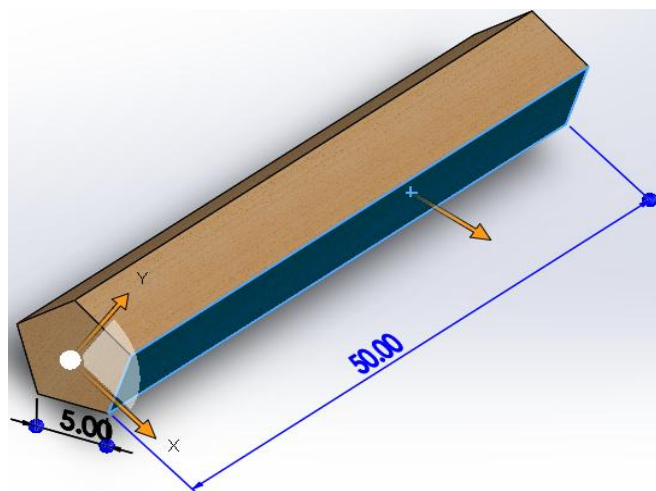
Se definen los elementos que forman parte del AEF del material compuesto en estudio y se examinan los datos de salida del modelo después de la simulación digital donde se somete a diversas cargas o esfuerzos, mostrando también la manera en que se pueden modificar valores aplicados, conforme a las necesidades de desempeño mecánico esperado por el producto o compuesto.

#### 6.1.1 Paso 1. Diseño del modelo CAD

La parte central del modelado para la simulación y pruebas de esfuerzo de la matriz de este proyecto, son las probetas, y estas están integradas por módulos individuales, compuestos y rectangulares, que a su vez se forman por fibras de madera balsa con forma de prisma pentagonal con longitud de 50 mm o 25 mm y 5 mm por arista, como se muestra en la Figura 64; recubiertas por resina Epoxi colocadas en bloques de 10 x 10 x 52 mm y en hileras para

**Figura 64**

*Diseño de la fibra de madera en SOLIDWORKS*

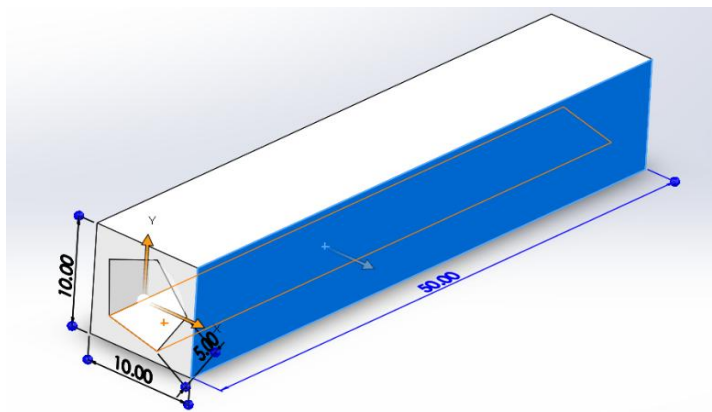


*Nota.* Elaboración propia, 2024.

formar un bloque de  $30 \times 60 \times 208 \text{ mm}^3$ , mostrándose en la Figura 65 la estructura de la resina epóxica para el modelo. El bloque completo de fibras con resina, conformará la probeta usada en las pruebas de AEF. En el ensamble entre elementos, la unión de la interfaz resina-resina debe de ser rígida, para simular que cada módulo individual de madera-resina es un elemento sólido.

**Figura 65**

*Ensamble de resina (epoxi) para cada fibra de madera*

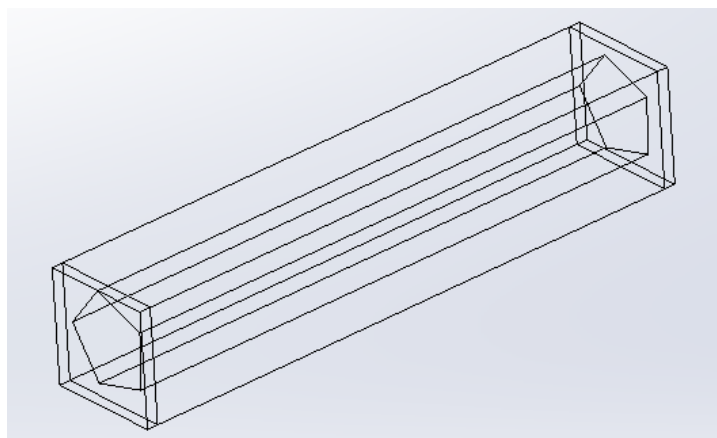


*Nota.* Elaboración propia, 2024.

En la Figura 66, se muestra el esquema de la vista alámbrica del ensamble fibra-resina:

**Figura 66**

*Vista alámbrica de estructura fibra-resina*



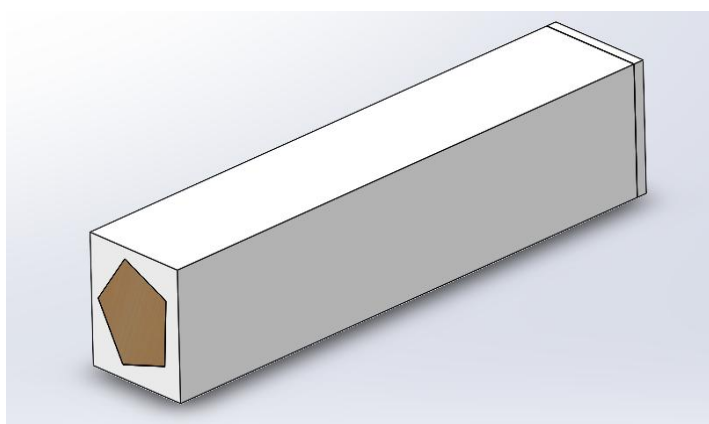
*Nota.* Elaboración propia, 2024.

El ensamble Fibra de Madera-Resina se muestra en la Figura 67., y posteriormente se también la utilización de tapas frontales y traseras de resina de 1 mm de espesor (véase Figura 78.).

Estas tapas, se emplean para proporcionar una unión rígida en la parte de punta y cola de los elementos individuales. Para lograr al final el ensamble completo, como se muestra en la Figura 79.

**Figura 67**

*Estructura individual fibra de madera – resina epoxi*

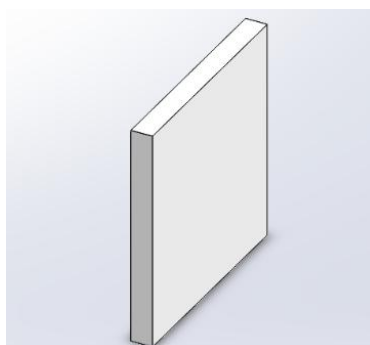


*Nota.* Elaboración propia, 2024.

Como se mencionó anteriormente, estas sub unidades llevan unas tapas de resina que se muestran en la Figura 68.

**Figura 68**

*Tapa para los extremos de estructuras individuales*

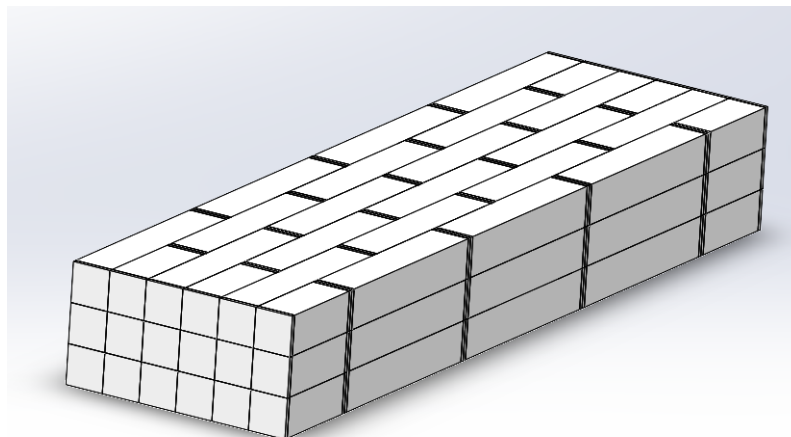


*Nota.* Elaboración propia, 2024.

Y el ensamble de la probeta final se muestra en la Figura 69. Y todos los elementos antes descritos, se presentan en el ANEXO 2., de manera conjunta.

**Figura 69**

*Ensamble completo de Probeta para pruebas de EF*



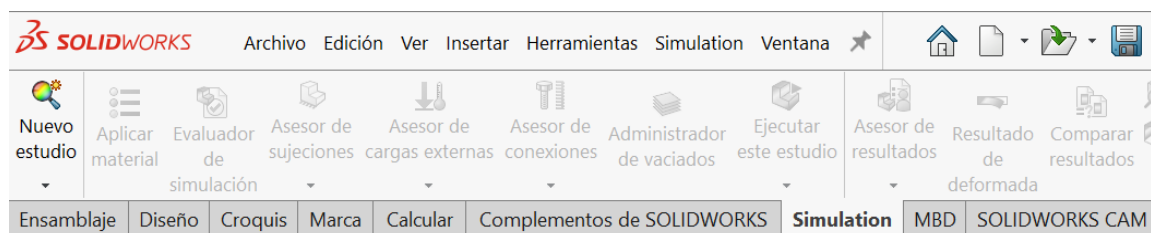
*Nota.* En la imagen se observa la forma que tiene la probeta final, empleada para la realización del AEF. Elaboración propia, 2024.

### 6.1.2 Paso 2. Definición de parámetros en DSW

Una vez elaborado el ensamble del modelo de pruebas o probeta, se debe seleccionar en el menú de SOLIDWORKS, el complemento de Simulación como se observa en la Figura 70.

**Figura 70**

*Selección del Complemento de Simulación en DSW*

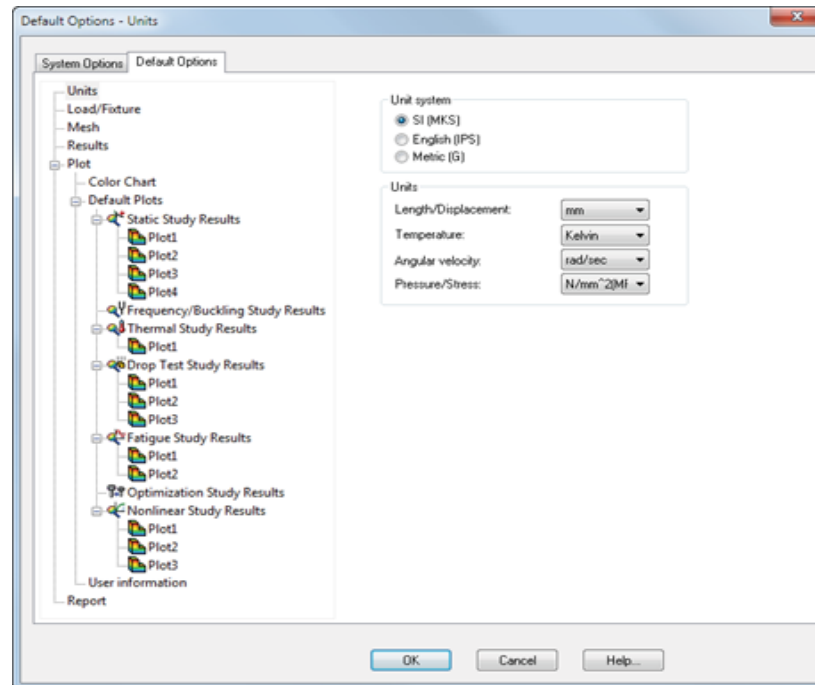


*Nota.* En la imagen se presenta la selección de la función de Simulación en SOLIDWORKS para comenzar con el estudio de tensiones sobre la probeta previamente elaborada. Elaboración propia, 2024

En este paso, debe asegurarse que las unidades de medida en las que se trabajan estén registradas como las “unidades activas”. Esta selección se puede hacer en la pestaña de Simulation/Options/Default Options, tal como se muestra en la Figura 71.

**Figura 71**

*Configuración de unidades*



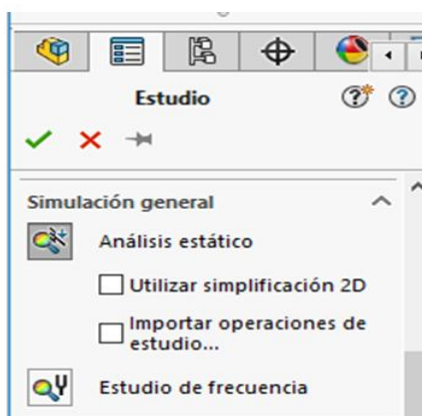
*Nota.* Se muestra el segmento de pantalla en SOLIDWORKS donde se realiza la configuración necesaria de parámetros, unidades y características propias del estudio. Elaboración propia, 2024.

### 6.1.3 Paso 3. Creación del estudio Estático

Para realizar una simulación de esfuerzos a través del AEF dentro de DSW, se requiere crear un Estudio. Y para ello, se debe ingresar en la pestaña de Simulation/Nuevo Estudio/Análisis Estático y se creará un árbol de simulación como se muestra en la Figura 72, en el cual se hace la distinción entre el tipo de análisis Estático o de Frecuencia, siendo el primero el que resulta de interés para este proyecto.

**Figura 72**

*Generación de nuevo Estudio*



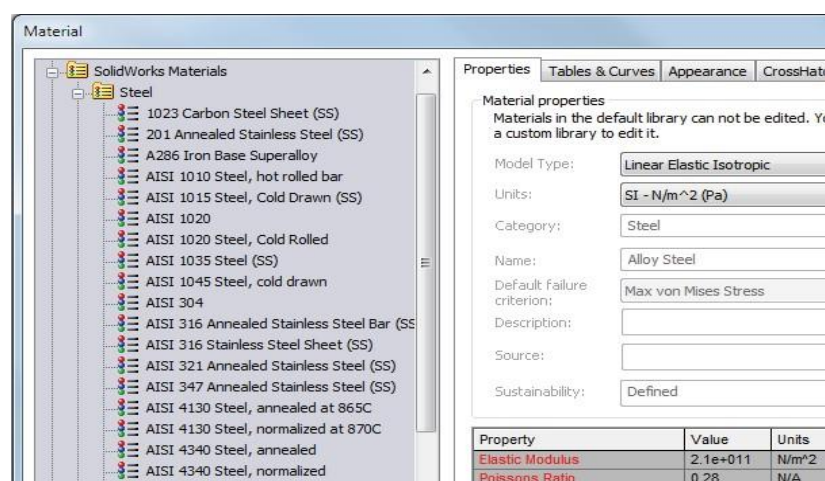
*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

#### 6.1.4 Paso 4. Asignación de materiales

En este paso, es necesario definir los materiales que se usarán para la elaboración del producto, y para ello se filtran y selección las de mayor relevancia o similitud física y con las propiedades congruentes con el estudio. Una vez definidos los materiales a utilizar, se registran/actualizan las propiedades de los materiales para el estudio, y en el árbol de simulación se debe seleccionar la opción de Parts/Materials, para guardar el registro correspondiente. Esto se observa en la Figura 73.

**Figura 73**

*Configuración de Materiales*



*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

Continuando con la determinación de materiales para este proyecto, seleccionamos la madera balsa y como adhesivo, la resina Epoxi sin carga, cuyas propiedades aparecen en las Figuras 74 y 75 respectivamente.

**Figura 74**

*Propiedades de las fibras de refuerzo (madera balsa)*

| Propiedad                                | Valor       | Unidades          |
|------------------------------------------|-------------|-------------------|
| Módulo elástico                          | 2999.999232 | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de Poisson                  | 0.29        | N/D               |
| Módulo cortante                          | 299.9999105 | N/mm <sup>2</sup> |
| Densidad de masa                         | 159.989899  | kg/m <sup>3</sup> |
| Límite de tracción                       |             | N/mm <sup>2</sup> |
| Límite de compresión                     |             | N/mm <sup>2</sup> |
| Límite elástico                          | 19.999972   | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de expansión térmica        |             | /K                |
| Conductividad térmica                    | 0.05        | W/(m·K)           |
| Calor específico                         |             | J/(kg·K)          |
| Cociente de amortiguamiento del material |             | N/D               |

*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

**Figura 75**

*Propiedades de la matriz de resina (Epoxi sin carga)*

| Propiedad                                | Valor | Unidades          |
|------------------------------------------|-------|-------------------|
| Módulo elástico                          | 2415  | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de Poisson                  | 0.35  | N/D               |
| Módulo cortante                          |       | N/mm <sup>2</sup> |
| Densidad de masa                         | 1100  | kg/m <sup>3</sup> |
| Límite de tracción                       | 28    | N/mm <sup>2</sup> |
| Límite de compresión                     | 104   | N/mm <sup>2</sup> |
| Límite elástico                          |       | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de expansión térmica        |       | /K                |
| Conductividad térmica                    | 0.188 | W/(m·K)           |
| Calor específico                         |       | J/(kg·K)          |
| Cociente de amortiguamiento del material |       | N/D               |

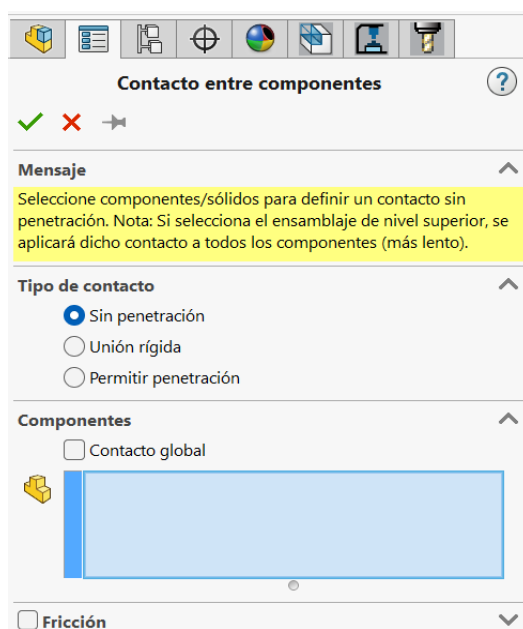
*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

### 6.1.5 Paso 5. Definición de Conexiones entre las sub unidades

Debido a que la probeta de prueba se compone de sub unidades o elementos rectangulares, es necesario definir el tipo de contacto entre los componentes, en este caso, se emplean la unión rígida para el ensamble resina-resina que corresponde a cada uno de los elementos rectangulares de 10 x10 x 50 mm o de 10 x 10 x 25 mm para los remates, tanto internos como en los extremos de la probeta, tal como se mostró anteriormente en la Figura 69. La definición de esta característica se observa en la Figura 76, y es una de los datos obligatorios en el llenado de parámetros que solicita el estudio de DSW.

**Figura 76**

*Definición de conexiones entre componentes de la probeta*



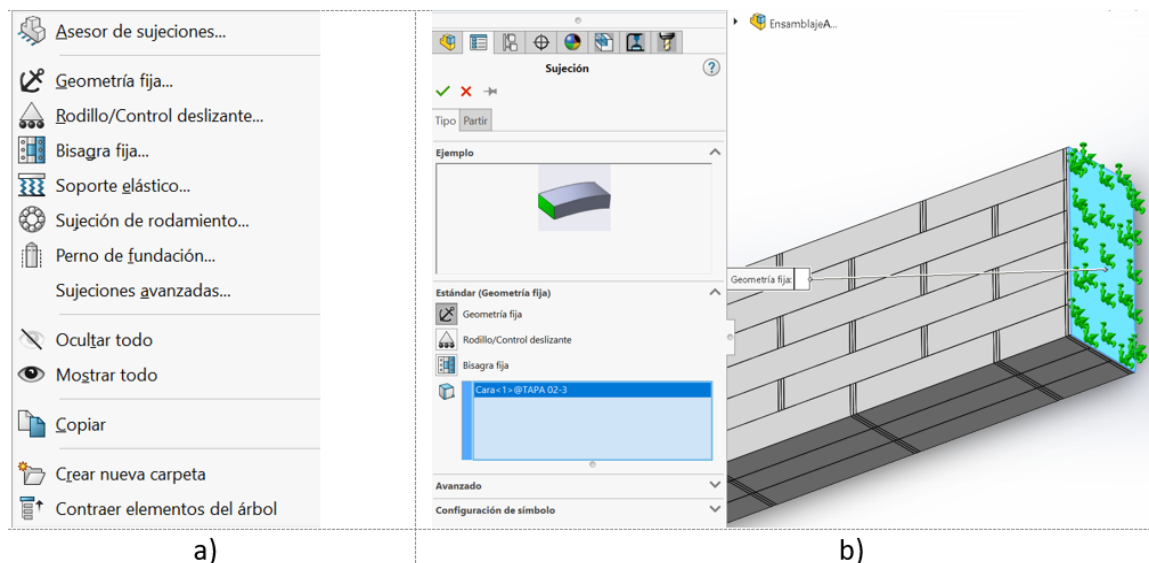
*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

### 6.1.6 Paso 6. Aplicación de sujeciones

Las sujeciones se refieren a la forma en que las fuerzas aplicadas en el modelo interactúan en cuerpo del estudio y su medio circundante. Es decir, qué tipo de sujeciones tiene la pieza con otros elementos del modelo; en este caso, un extremo de la probeta está sujeta rígidamente y el otro recibe la carga o fuerza (kgf o N), esto se muestra en la Figura 77.

**Figura 77**

*Aplicación de sujeciones*



*Nota.* En la imagen a), se muestra la Geometría fija que ofrece DSW al definir las conexiones; en la parte b) de la imagen, se muestra la representación gráfica completa de la probeta y las sujeciones. Elaboración propia, 2024.

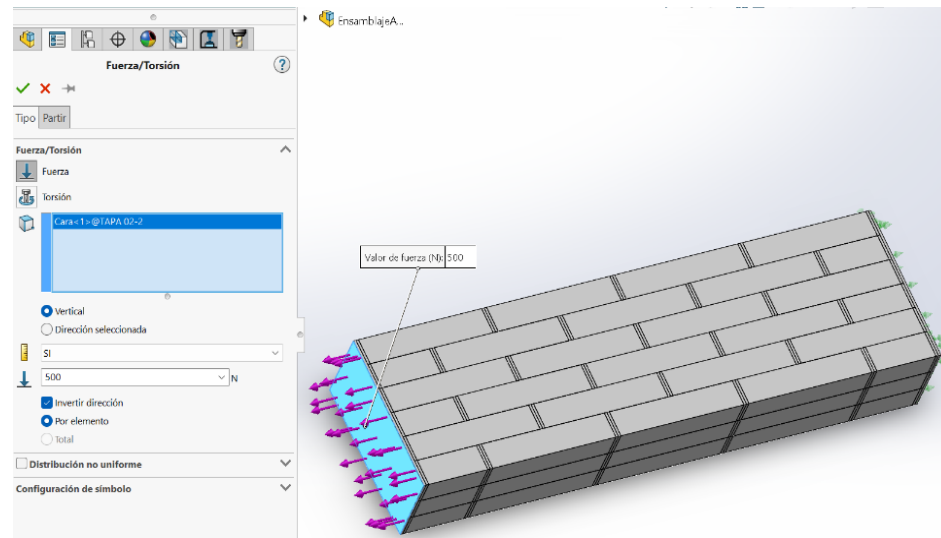
### 6.1.7 Paso 7. Aplicación de cargas (fuerzas)

En este punto se deben identificar las condiciones en las que se trabaja el producto o en este caso, la probeta, para realizar las pruebas en condiciones lo más realistas que puedan definirse en el software, comparadas con la realidad en la industria. Entre las condiciones más comunes tenemos fuerzas de tensión y compresión, presiones internas o externas, momentos de torsión, impactos, entre otros factores mecánicos inherentes al manejo normal de los empaques durante la producción de los cables, su embalaje, almacenamiento, transporte y envío.

La Figura 78 muestra la aplicación de fuerzas de tensión, ya que son estas las de interés para el estudio de esta investigación, pues son esfuerzos de tensión los que se ejercen en las bridas o laterales de los carretes de empaque al momento de guardar el cable en su interior, para su manejo y traslado.

**Figura 78**

*Representación de la aplicación de fuerzas en la probeta*



*Nota.* La figura muestra la manera en que DSW hace la presentación gráfica de los vectores que se ejercerán sobre el cuerpo completo de la probeta o cuerpo de estudio. Elaboración propia, 2024.

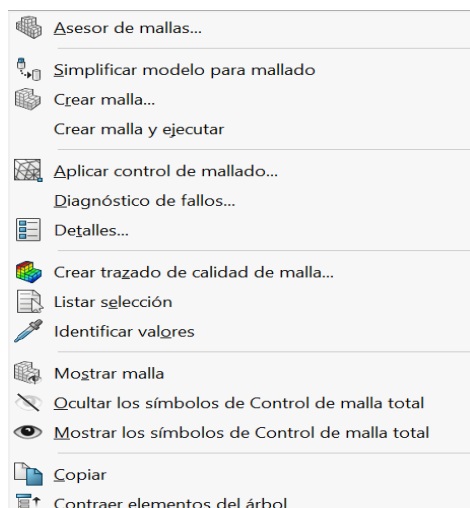
### **6.1.8 Paso 8. Mallado del cuerpo de estudio**

Como se explicó en el capítulo IV, el reticulado o mallado del cuerpo tridimensional en estudio, es fundamental en el Análisis de Elemento Finito, pues de acuerdo a la cantidad de nodos o nudos que se definan, será la precisión de los resultados de las iteraciones, comparados con los valores reales físicamente.

En el caso de materiales compuestos, es común utilizar elementos laminares (Shell) o bien, hacer las simulaciones y digitalización con elementos sólidos; es decir, considerando a los compuestos como una unidad integrada. También debe establecerse la densidad de la malla, pues una malla muy fina o cerrada, incrementará el número de nodos para el estudio o simulación y esto hará más complejo el AEF, incrementando al mismo tiempo, los requerimientos computacionales. En las Figuras 79 a 82., se muestran los datos programados como parámetros del mallado, indicados en la barra de la pantalla de DSW.

**Figura 79**

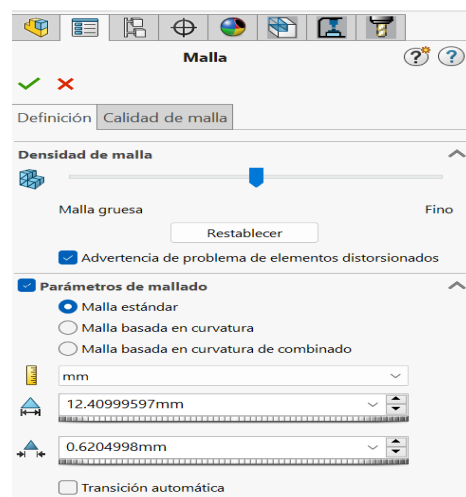
*Generación de la malla*



*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

**Figura 80**

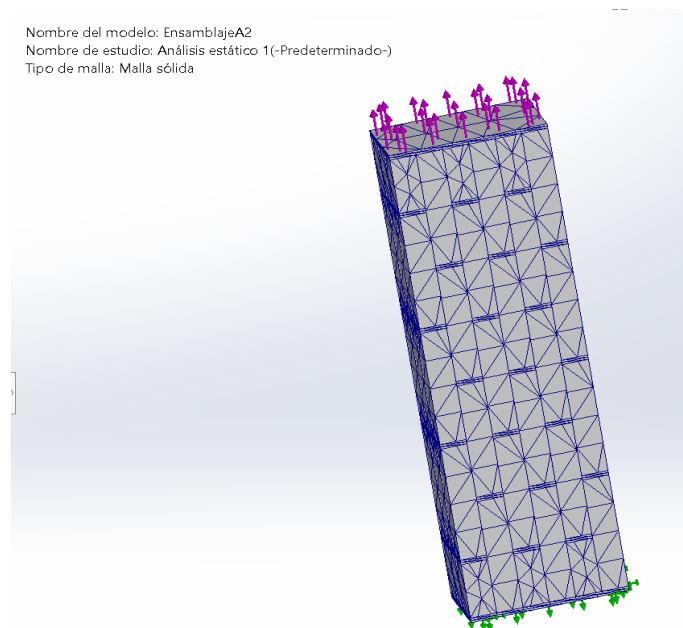
*Condiciones del mallado*



*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024

**Figura 81**

*Representación gráfica del Mallado de elemento sólido*



*Nota.* En la figura se pueden apreciar las divisiones propias de la malla previamente definida en los parámetros del estudio en DSW. Elaboración propia, 2024.

Y en la Figura 82 se muestran el cuadro de los detalles integrados a la definición del mallado para el estudio, se desactivan algunos parámetros automáticos para poder definir algunos valores de interés propios de este proyecto.

Figura 82

Detalles de la malla

| Malla Detalles                                               |                                        |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Nombre de estudio                                            | Análisis estático 1 (-Predeterminado-) |
| Tipo de malla                                                | Malla sólida                           |
| Mallador utilizado                                           | Malla estándar                         |
| Transición automática                                        | Desactivar                             |
| Incluir bucles automáticos de malla                          | Desactivar                             |
| Puntos jacobianos para malla de alta calidad                 | 16 puntos                              |
| Tamaño de elemento                                           | 14.892 mm                              |
| Tolerancia                                                   | 0.7446 mm                              |
| Calidad de malla                                             | Elementos cuadráticos de alto orden    |
| Número total de nodos                                        | 34912                                  |
| Número total de elementos                                    | 24867                                  |
| Cociente máximo de aspecto                                   | 105.1                                  |
| Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3          | 14.6                                   |
| Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10         | 27                                     |
| Porcentaje de elementos distorsionados                       | 0                                      |
| Número de elementos distorsionados                           | 0                                      |
| Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible | Desactivar                             |
| Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)                    | 00:01:21                               |

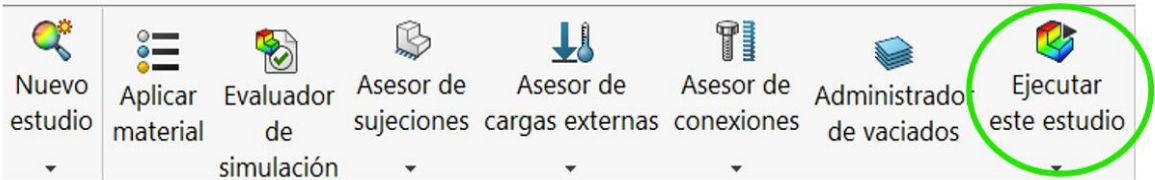
Nota. Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

6.1.9 Paso 9. Ejecución del análisis

Una vez preparado el análisis con los parámetros antes descritos, se procede a ejecutar el estudio, directamente en el ícono de “Ejecutar este estudio” de la barra superior de la pantalla de SOLIDWORKS, como se muestra en la Figura 83.

Figura 83

Orden de Ejecución de Estudio

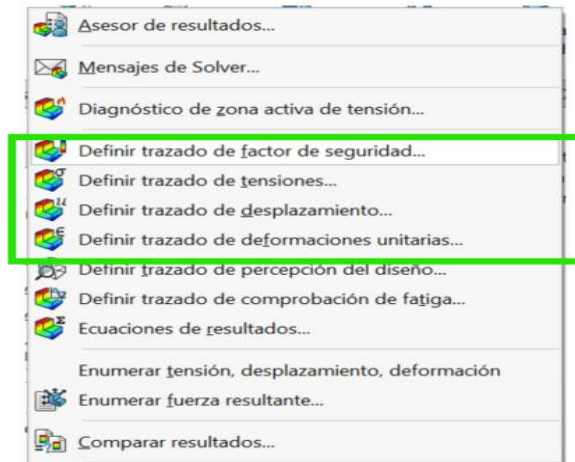


Nota. Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

Y definiendo también, cuáles resultados son los deseados que arroje el programa para el análisis y se hace la selección de acuerdo al menú de opciones, como lo muestra la Figura 84.

**Figura 84**

*Definición de los resultados requeridos*

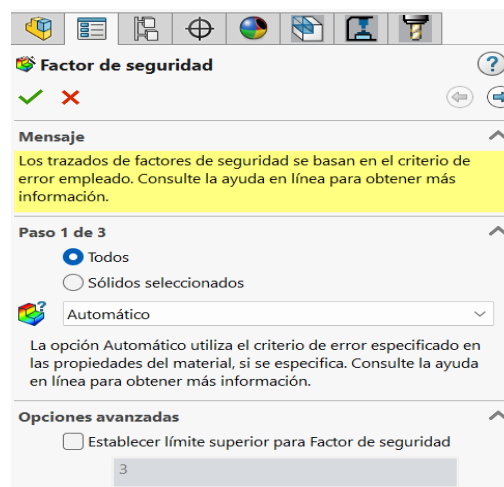


*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

En el caso específico de este proyecto, se configuraron el Trazado de Tensiones, Desplazamientos y Deformaciones Unitarias, siendo uno de los parámetros de mayor relevancia el Factor de Seguridad, el cual es un elemento de análisis al final de las simulaciones y este se programa en la pestaña de opciones que se muestra en la Figura 85.

**Figura 85**

*Configuración del Factor de Seguridad*



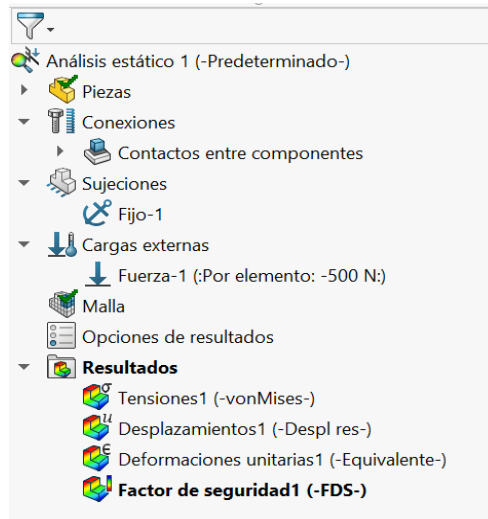
*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

### 6.1.10 Paso 10. Visualización de los resultados

Como último paso, se diseñan o ajustan los gráficos de las variables seleccionadas o en su caso, se agrega algún estudio específico que se desee ensayar. La Figura 86., muestra los resultados configurados como deseados en los reportes finales del AEF.

**Figura 86**

*Resultados solicitados al estudio*



*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

Donde se puede observar que están establecidos los siguientes estudios a realizar:

- **Tensión de von Mises:** Es uno de los datos más relevantes en el análisis de componentes metálicos y plásticos (como la madera), y corresponde a un valor escalar que se obtiene combinando o sumando todas las tensiones en el espacio (en los ejes x, y, z):

$$\sigma_{MV} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - (\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

y este dato sirve para comparar la tensión de von Mises con la tensión máxima admisible por el material, por lo tanto, puede ser considerado como su límite elástico.

- **Desplazamientos:** Se refiere a la elongación que sufrirá el cuerpo de estudio.
- **Deformaciones unitarias (R):** Este cambio se refiere a la deformación, por lo tanto, a valores

pequeños de estas deformaciones se le atribuyen valores altos de rigidez a los elementos de estudio.

- **Factor de Seguridad:** Es dato generalmente expresado en porcentaje, en cuyo caso se multiplica el valor por 100. Es decir, si un objeto o estructura tiene una resistencia real de 1.75 veces, la exigencia de cargas habituales bajo las que trabaja, tiene un margen de seguridad igual al factor de seguridad  $-1 = 0.75$  o 75%. En otras palabras, el  $f_s$  (Factor de Seguridad) es:

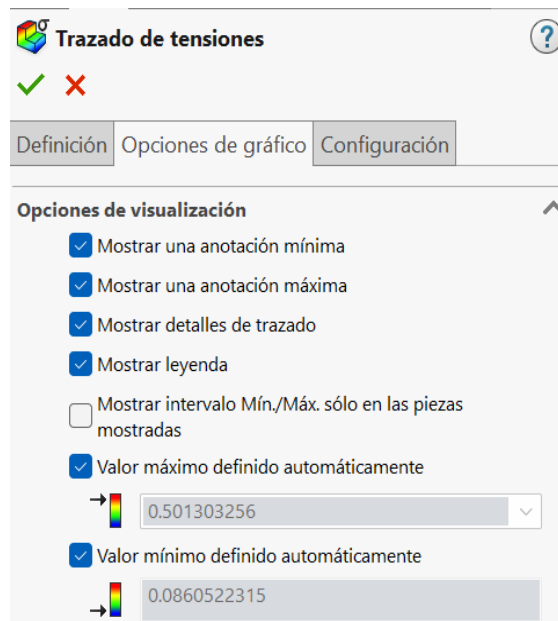
$$\bullet \text{ Factor de seguridad}_{\eta} = \frac{\text{resistencia real máxima}}{\text{resistencia requerida o de diseño}}$$

En el ámbito de la construcción, para materiales como la madera, el factor de seguridad recomendado suele estar entre 2 y 3.5, como se mencionó anteriormente.

Y en la Figura 87, se observa cómo se activan los valores máximos y mínimos para su visualización en pantalla, junto con el diagrama de la idealización del objeto y su análisis de Elemento Finito, directamente en la Opción de Trazado de tensiones y Opciones de gráfico.

**Figura 87**

*Configuración de las opciones de visualización*



*Nota.* Adaptado de DSW. Elaboración propia, 2024.

## 6.2 Resultados

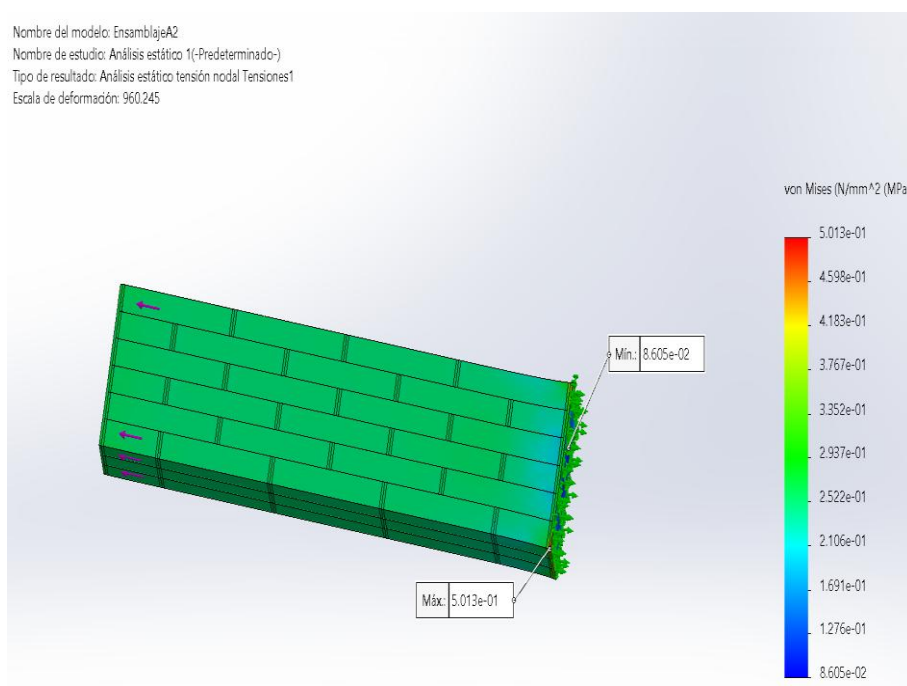
A continuación, se muestran los resultados gráficos de acuerdo al listado señalado en el punto 6.1.10, y se hará la tabulación con los datos para el análisis de los mismos.

### 6.2.1 Tensiones de von Mises

En la Figura 88, se puede apreciar la probeta sujeta a una carga de tensión de 50 kgf, obteniéndose un esfuerzo de von Mises Mínimo de 0.0861 MPa y un Máximo de 0.5013 MPa.

**Figura 88**

*Carga aplicada de 50 kgf, Tensión de von Mises*

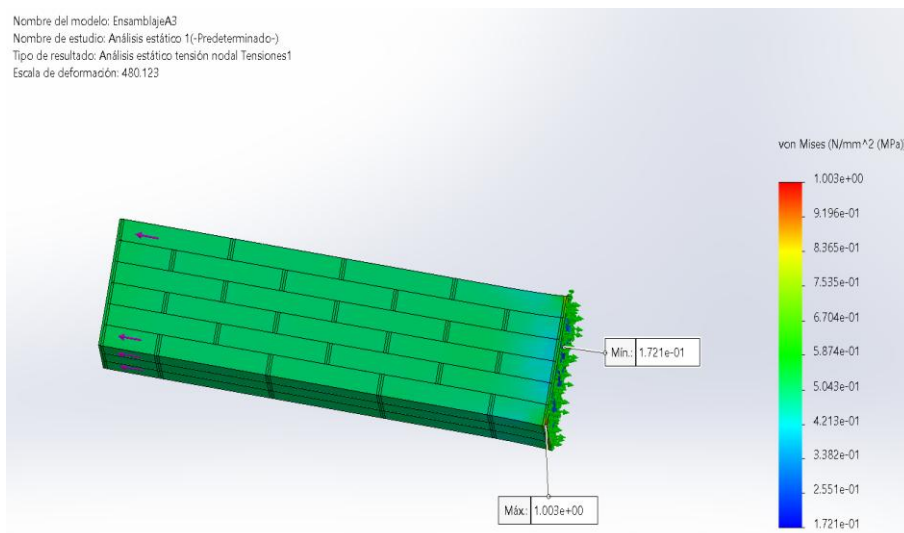


*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

Del mismo modo, en la Figura 89, se observa un esfuerzo de von Mises Mínimo de 0.1721 MPa y un Máximo de 1.003 MPa, cuando la probeta se sujeta a una carga de tensión de 100 kgf.

**Figura 89**

*Carga aplicada de 100 kgf, Tensión de von Mises*

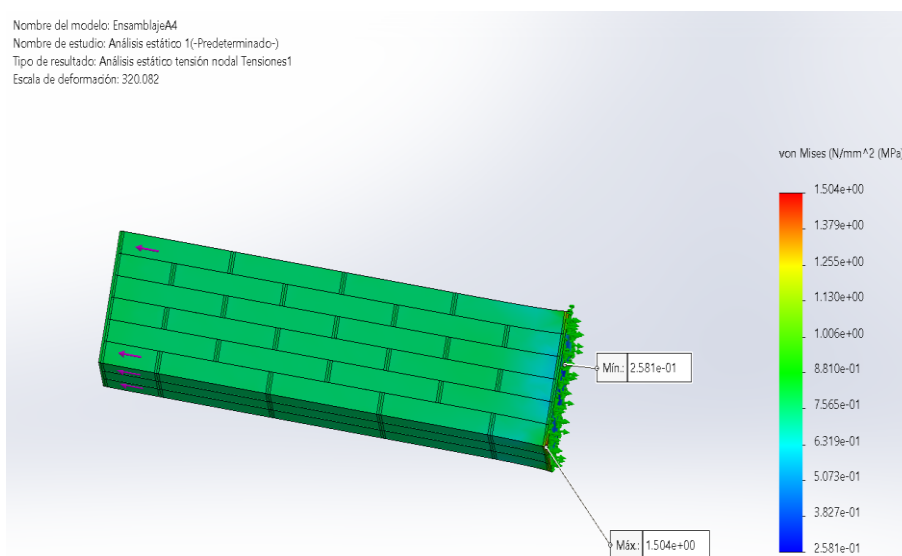


*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024

Al final, cuando la probeta se sujeta a una carga de tensión de 150 kgf, se obtiene un esfuerzo de von Mises Mínimo de 0.2581 MPa y un Máximo de 1.504 MPa. Véase Figura 90.

**Figura 90**

*Carga aplicada de 150 kgf, Tensión de von Mises*



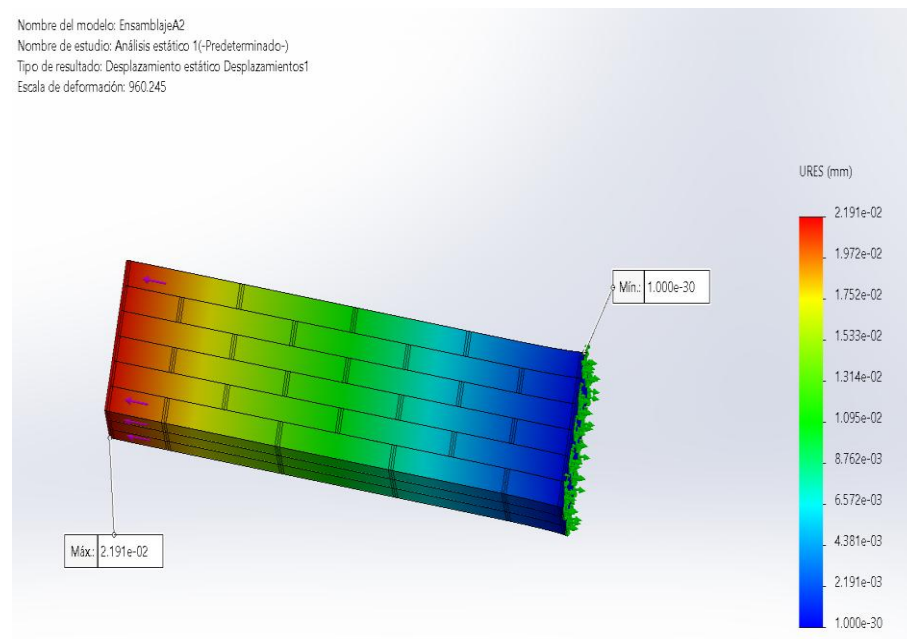
*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

### 6.2.2 Desplazamientos (URES)

Los resultados de Desplazamiento, cuando se aplica una carga de 50 kgf a la probeta, se pueden observar en la en la Figura 91, obteniéndose un valor mínimo  $1.0^{-30}$  mm y un Máximo de 0.02191 mm.

**Figura 91**

*Carga aplicada de 50 kgf, Desplazamiento (URES)*

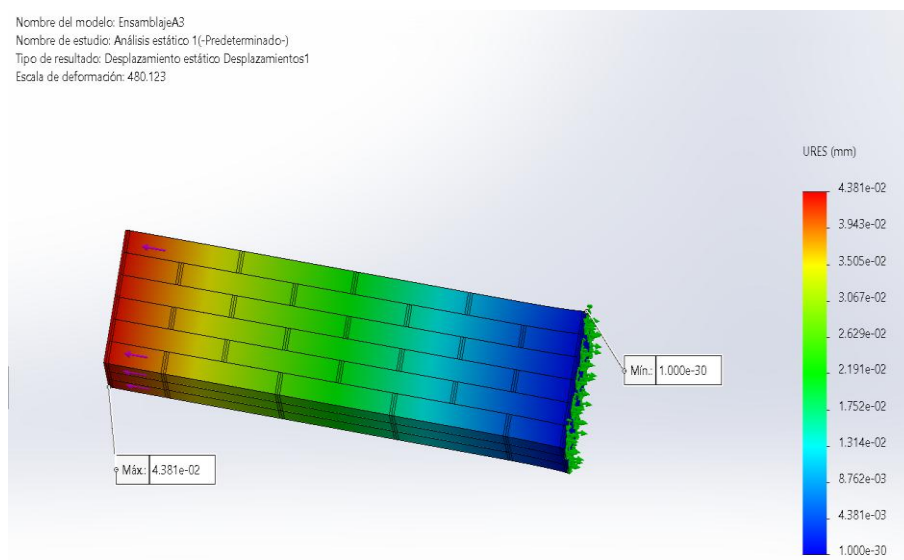


*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

Y los resultados de Desplazamientos, cuando se le aplica una carga de 100 kgf a la probeta de estudio, son de un valor Mínimo de  $1.0^{-30}$  mm y un Máximo de 0.04381 mm, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 92.

**Figura 92**

*Carga aplicada de 100 kgf, Desplazamiento (URES)*

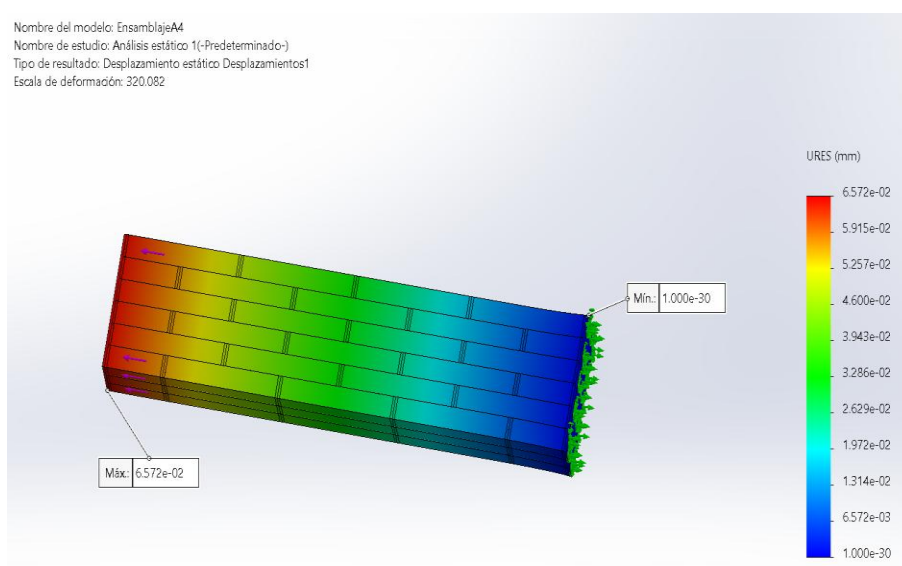


*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

Por último, en la Figura 93., se observan los datos de Desplazamientos para la carga de 150 kgf:  $1.0^{-30}$  mm, valor Mínimo y un valor Máximo de 0.06572, de acuerdo a las gráficas de AEF.

**Figura 93**

*Carga aplicada de 150 kgf, Desplazamiento (URES)*



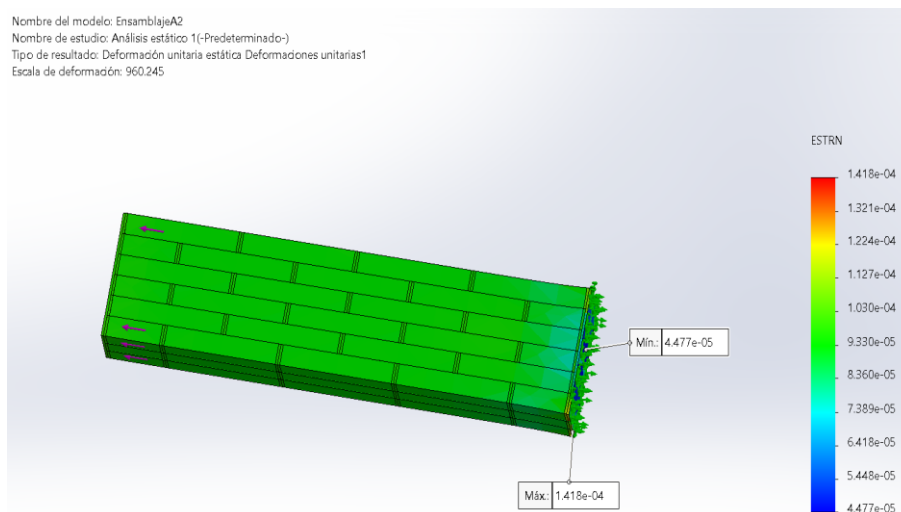
*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

### 6.2.3 Deformaciones Unitarias (ESTRN)

En la Figura 94, se aprecia la probeta sujeta a la primera carga de tensión (50kgf), y se obtiene un valor Mínimo de Deformaciones de  $4.48 \cdot 10^{-5}$  y un Máximo de  $1.42 \cdot 10^{-4}$ .

**Figura 94**

*Carga aplicada de 50 kgf, Deformación Unitaria (ESTRN)*

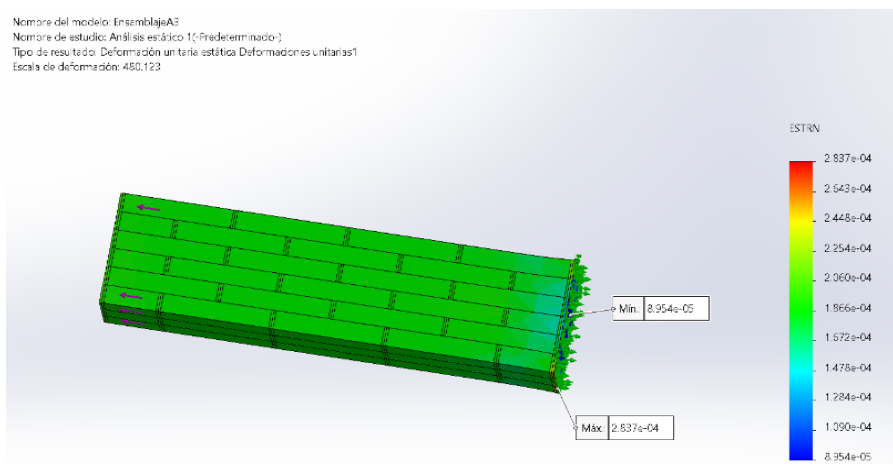


*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

De acuerdo a los mostrado en la Figura 95., se observa una Deformación Unitaria Mínima de  $8.95 \cdot 10^{-5}$  y una Máxima de  $2.84 \cdot 10^{-4}$ , cuando la carga de tensión aplicada fue de 100 kgf.

**Figura 95**

*Carga aplicada de 100 kgf, Deformación Unitaria (ESTRN)*

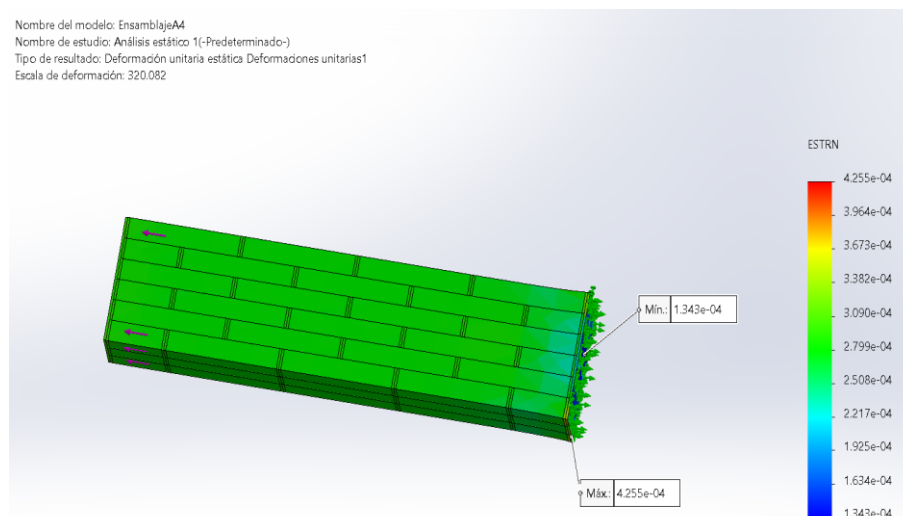


*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

Por último, en la Figura 96, se aprecia un valor Mínimo de  $1.34 \times 10^{-4}$  y un Máximo de  $4.26 \times 10^{-4}$ , cuando la carga de tensión aplicada a la probeta fue de 150 kgf, en el rubro de ESTRN.

**Figura 96**

*Carga aplicada de 150 kgf, Deformación Unitaria (ESTRN)*



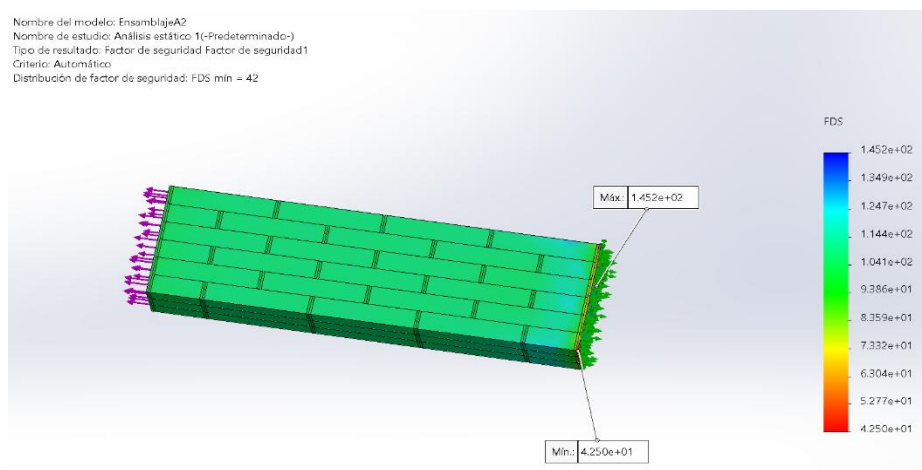
*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

## 6.2.4 Factor de Seguridad

Finalmente, en los datos obtenidos para el Factor de Seguridad, en la Figura 97 se observa un valor Mín. de 42.5 y un Máx. de 145.2, para una carga de tensión de 50 kgf en la probeta.

**Figura 97**

*Carga aplicada de 50 kgf, Factor de Seguridad*

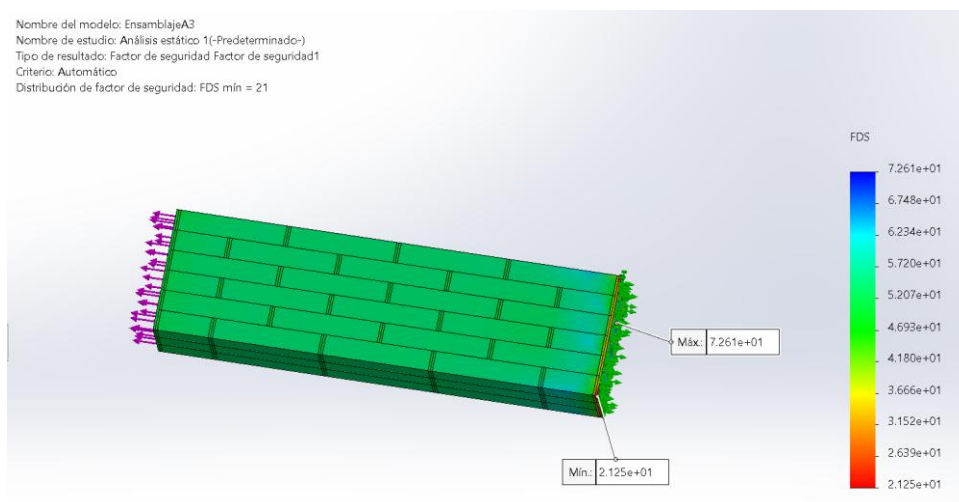


*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

Continuando con el estudio de Factor de Seguridad, cuando se aplicó una carga de 100 kgf a la probeta, se obtuvo un valor Mínimo de 21.5 y un Máximo de 72.61, véase Figura 98.

**Figura 98**

*Carga aplicada de 100 kgf, Factor de Seguridad*

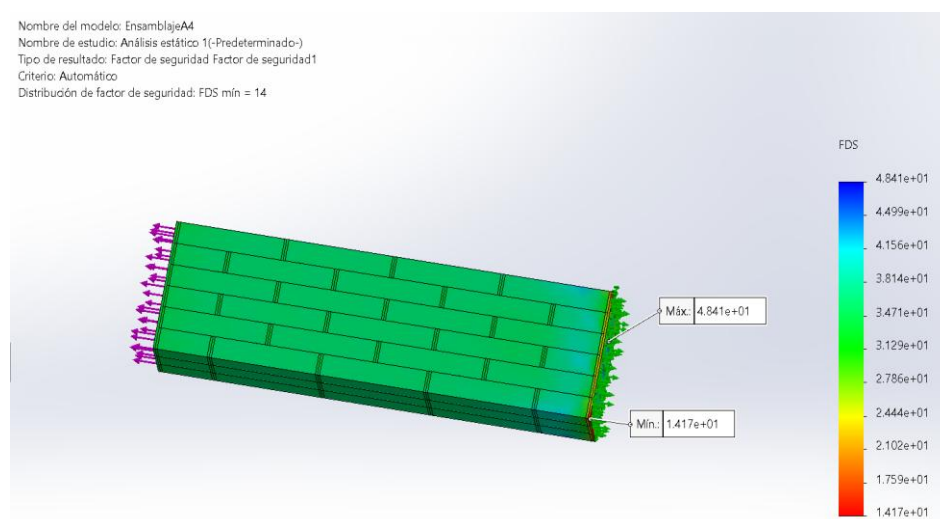


*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

Y en la Figura 99., una carga de tensión de 150 kgf aplicada a la probeta, arroja un valor Mínimo FDS de 14.17 y un Máximo de 48.41.

**Figura 99**

*Carga aplicada de 150 kgf, Factor de Seguridad*



*Nota.* Tomado de DSW. Elaboración propia, 2024.

De acuerdo a las gráficas y cuadros de valores en el cálculo de EF para cada carga en los diferentes rubros de estudio, se presenta el resumen de resultados en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Tabla de resultados de SOLIDWORKS®, para las diferentes cargas de estudio*

| CARGA kgf (N) | Tensiones<br>MPa (N/mm <sup>2</sup> ) |        | Desplazamientos<br>(mm) |         | Deformaciones Unitarias |          | Factor de Seguridad<br>(Adimensional) |       |
|---------------|---------------------------------------|--------|-------------------------|---------|-------------------------|----------|---------------------------------------|-------|
|               | Min.                                  | Max.   | Min.                    | Max.    | Min.                    | Max.     | Min.                                  | Max.  |
| 50 (490)      | 0.0861                                | 0.5013 | 1.00E-30                | 0.02191 | 4.48E-05                | 1.42E-04 | 42.5                                  | 145.2 |
| 100 (981)     | 0.1721                                | 1.003  | 1.00E-30                | 0.04381 | 8.95E-05                | 2.84E-04 | 21.5                                  | 72.61 |
| 150 (1471)    | 0.2581                                | 1.504  | 1.00E-30                | 0.06572 | 1.34E-04                | 4.26E-04 | 14.17                                 | 48.41 |

*Nota.* Datos de resultados en el Análisis de Elemento Finito DSW, para 3 cargas sobre la probeta de estudio. Elaboración Propia, 2024.

A continuación, estos resultados se analizan uno por uno.

**6.3 Análisis de resultados**

Como se observa en la Tabla 6., se aplicaron 3 diferentes cargas en el estudio de EF: 50, 100 y 150 kgf; y se harán las respectivas observaciones de los datos obtenidos en cada una de las pruebas, por separado.

**6.3.1 Tensiones o valores de von Mises**

Teniendo en cuenta lo expuesto en los capítulos anteriores, se entiende que la Tensión normal que sufre la probeta al recibir una carga (kgf o N) durante el estudio de EF en el cálculo lineal estático, se mide en MPa (N/mm<sup>2</sup>); y en el rubro de tensión nodal o von Mises, el AEF arroja valores que hacen referencia a la diferencia de esfuerzo o resistencia que ofrece el objeto de estudio, con respecto a los valores de resistencia mecánica que se considera cumple naturalmente, el o los materiales que componen la probeta, en condiciones normales de uso.

En otras palabras, estos resultados sirven para calcular los valores de carga que soportará el compuesto por unidad de superficie donde aplique, tal como se puede observar en la Tabla 7. La visualización de estos datos, permiten al ingeniero estimar un diseño dentro del rango de resistencia mecánica del material, de acuerdo a sus dimensiones y obviamente, a la resistencia propia de los componentes que forman parte estructural del objeto de estudio.

En las Figuras 88 – 90, se puede apreciar que la probeta ofrece un esfuerzo mínimo de von Mises de 0.08605 MPa y un máximo de 0.5013 MPa cuando se sujeta a una carga de 50 kgf; y en el mismo sentido, ofrece un esfuerzo mínimo de von Mises de 0.02581 MPa y un máximo de 1.5040 MPa cuando se sujeta a una carga de 150 kgf.

Es de relevancia para este proyecto, observar el resultado de nuestra probeta a la mayor carga de la prueba (150 kgf  $\approx$  1500 N), y DSW indica que el material compuesto soportaría una tensión de 14.71 MPa, es decir, un factor seguridad de 1.41 o aproximadamente 41% de holgura a la tensión (índice de seguridad), tomando en cuenta que el valor de la Tensión máxima cortante o Fluencia de la madera Balsa es de 2.12 (Pérez Caballero, 2018).

**Tabla 7**

*Análisis de Tensiones de von Mises y Factor de Seguridad*

| CARGA<br>kgf (N) | Area de<br>Tensión<br>(mm <sup>2</sup> ) | Tensión<br>ejercida<br>(Mpa) | Límite de<br>Tensión de<br>madera Balsa<br>(Mpa) | Tensión von<br>Mises<br>MPa (N/mm <sup>2</sup> ) | Factor de<br>Seguridad (fs) |
|------------------|------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|
|                  |                                          |                              |                                                  | Max.                                             | Min.                        |
| 50 (490)         | 100                                      | 4.903                        | 2.12                                             | 0.5013                                           | 4.23                        |
| 100 (981)        | 100                                      | 9.807                        |                                                  | 1.0030                                           | 2.11                        |
| 150 (1471)       | 100                                      | 14.710                       |                                                  | 1.5040                                           | 1.41                        |

*Nota.* Comparativa de Tensión de von Mises y Factor de Seguridad, a diferentes cargas de tensión. Elaboración propia, 2024.

Este primer grupo de resultados (Tensiones) muestra la resistencia mecánica, atribuida a la rigidez o dureza en el caso de los materiales anisotrópicos como la madera, cuando reciben esfuerzos que generan un efecto conocido como Cortante. Y en el caso del material compuesto, propio del análisis que se expone en este trabajo, se observa que, a 1471 N de carga, de acuerdo a los valores de von Mises, arrojados por el CEF de SOLIDWORKS, se obtendría un valor aproximado de 1.41 de factor de seguridad, y aunque es suficiente para cuestiones de funcionalidad en el caso de los materiales maderables, empleados para la fabricación de los carretes de empaque para los cables de Condumex, se considera como un valor marginalmente bajo y por debajo de las recomendaciones de la industria de la elaboración de productos maderables.

Sin embargo, se debe contemplar que se definieron como automáticos los límites en los valores de salida para el AEF en el software, por lo tanto, SOLIDWORKS agrega un valor

denominado como el *criterio de tensión de von Mises*, que se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_{12 \text{ Max}} = \sigma_{\text{yield}} / \sqrt{3} = 0.5777 \sigma_{\text{yield}}.$$

Donde el tutorial de SOLIDWORKS (Dassault Systemes), señala que este factor, se integra como valor dependiente de la temperatura, estableciendo así, su propio límite de tensión; y podría decirse que, en valor absoluto obtenido por el programa, sería  $\sqrt{3}$  veces mayor que el mostrado en el cuadro de resultados.

En resumen, la tensión de von Mises se compara con la tensión máxima permitida por el material, sin sufrir deformaciones irreversibles.

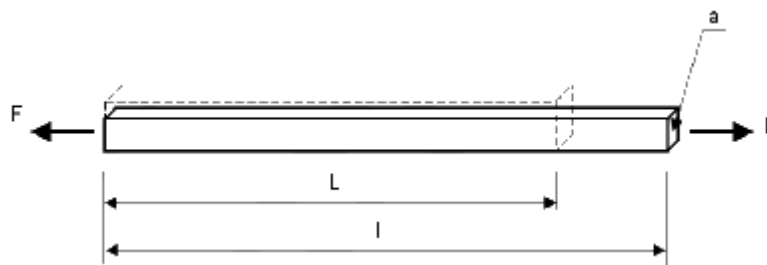
### 6.3.2 Desplazamientos (URES)

Estos valores hacen referencia a los desplazamientos en los ejes X, Y, Z del sistema de coordenadas de referencia y URES corresponde a los desplazamientos resultantes del análisis tensiones en la malla calculada por el programa.

La deformación unitaria verdadera en Desplazamiento es:  $\epsilon_T = \ln\left(\frac{l}{L}\right)$ , donde  $l$  es la longitud final y  $L$  es la longitud inicial no deformada de la barra, como se grafica en la Figura 100.

**Figura 100**

*Desplazamiento o Deformación Unitaria Real*



Nota. Adaptada de Tutorial SOLIDWORKS, por DSW, 2024, [https://help.solidworks.com/2023/spanish/solidworks/cworks/r\\_Input\\_Stress\\_Strain\\_Curve.htm](https://help.solidworks.com/2023/spanish/solidworks/cworks/r_Input_Stress_Strain_Curve.htm), CC BY.3.0

De acuerdo a los resultados del software, con los datos de salida de las Figuras 91 – 93, se observa que la probeta sufrirá un desplazamiento mínimo de  $1.0 \times 10^{-30}$  mm y un máximo de

0.02191 mm cuando se sujeta a una carga de 50 kgf; y en el mismo sentido, sufre un desplazamiento mínimo de  $1.0 \times 10^{-30}$  mm y uno máximo de 0.06572 mm cuando se sujeta a una carga de 150 kgf. Se concluye que la probeta sufrirá un desplazamiento despreciable en todas las cargas del estudio, como se puede ver en la Tabla 8. Y hace sentido con la teoría lineal, que supone que, si existen desplazamientos muy pequeños y que, si las normales a las áreas de contacto no cambian de dirección durante la carga, por tanto, la carga completa se aplica en un solo paso, de acuerdo al cálculo interno de DSW.

**Tabla 8**

*Análisis de Desplazamientos (URES)*

| CARGA kgf (N) | Longitud Inicial de probeta (mm) | Desplazamientos URES (mm) | % de Desplazamiento |
|---------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------|
|               |                                  | Max.                      | Max.                |
| 50 (490)      | 208                              | 0.0219                    | 0.0105%             |
| 100 (981)     |                                  | 0.0438                    | 0.0211%             |
| 150 (1471)    |                                  | 0.0657                    | 0.0316%             |

*Nota.* Los Desplazamientos se interpretan como elongación o contracción de acuerdo al signo (positivo o negativo, respectivamente). Elaboración propia, 2024.

Además, según establece DSW, la solución para estudios de desplazamientos pequeños, supone que la rigidez no cambia durante la carga, y esta es una característica propia del producto compuesto en este proyecto. Además, SOLIDWORKS comprueba el desplazamiento máximo (de acuerdo a norma Euclidiana) entre el número total de nodos preestablecido para la malla de prueba y lo compara con la longitud característica del modelo. Si el cociente entre el desplazamiento máximo obtenido y la longitud característica del modelo es mayor que al 10%, envía un mensaje de advertencia, a lo que enseguida, debería revisarse el diseño del objeto de estudio.

Tomando en cuenta lo anterior, sólo es de interés la observación de los datos de desplazamiento máximos que arroja SOLIDWORKS, ya que estos son los mandatorios para enviar una señal de alerta cuando recomienda una revisión del diseño del modelo, cuando el desplazamiento calculado con las cargas de estudio, sea mayor al 10% de la longitud sin cargas (original).

### 6.3.3 Deformaciones Unitarias (ESTRN)

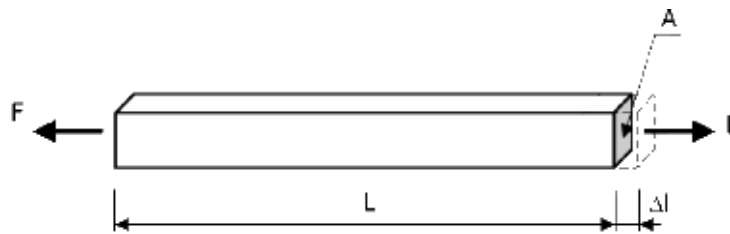
Como se estableció en el capítulo IV, se debe tomar en cuenta que una deformación es el resultado de la tensión aplicada en un cuerpo, y se basa en la formulación de Cauchy, que corresponde a la tensión verdadera en la geometría deformada.

Y al mismo tiempo, se vuelve un dato poco relevante en objetos cuya su rigidez es alta, pues sólo la deformación de una barra en tensión se vuelve importante, si su área de sección transversal cambia más de un 5% (Aguirre, 2024).

Por lo tanto, tenemos que, la tensión de ingeniería (o tensión nominal)  $\sigma_E = \frac{F}{A}$  donde  $A$  es el área de sección transversal no deformada inicial y una vez que hemos realizado el estudio de tensiones en nuestra probeta a través del cálculo de Elemento Finito, la deformación unitaria de ingeniería (o deformación unitaria nominal) es  $\epsilon_E = (\frac{\Delta l}{L})$ , dónde  $\Delta l$  es la deformación de barra final y  $L$  es la longitud de la barra sin deformar, esto se puede revisar en las Figuras 101 y 102.

**Figura 101**

*Deformación Unitaria ESTRN*

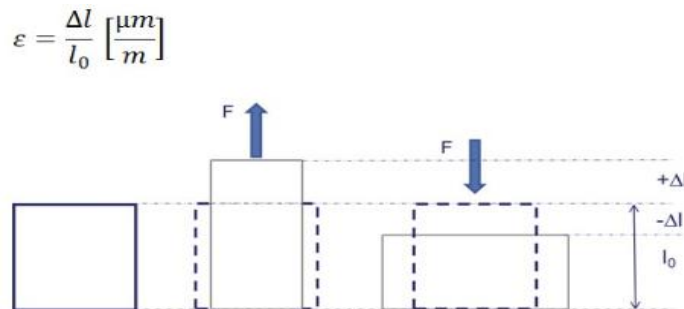


Nota. Adaptada de Tutorial SOLIDWORKS, por DSW, 2024, [https://help.solidworks.com/2023/spanish/solidworks/cworks/r\\_Input\\_Stress\\_Strain\\_Curve.htm](https://help.solidworks.com/2023/spanish/solidworks/cworks/r_Input_Stress_Strain_Curve.htm), CC. BY.3.0

De la Figura 101 se podría entender que la deformación también se refiere a un cambio en la longitud, pero en realidad, el cambio se refiere a un cambio en el área tangencial o cambio en la forma del modelo de estudio, sin importar la variación en la longitud que sufra.

**Figura 102**

*Deformación Unitaria*



Nota. Adaptada de Tutorial SOLIDWORKS, por DSW, 2024, <https://www.hbm.com/es/6896/fundamentos-sobre-medicion-de-deformacion/#:~:text=La%20deformaci%C3%B3n%20suele%20expresarse%20en,m%2Fm%20%3D%20ppm> CC. BY.3.0

La deformación se presenta con valores adimensionales, pues representa el cambio en la longitud de un material con respecto a su longitud inicial, y como estos cambios suelen muy reducidos, generalmente se expresan en fracciones del sistema internacional (micrómetros por metro,  $\mu\text{m}/\text{m} = 10^{-6} \text{ m}/\text{m} = \text{ppm}$ ).

En este otro grupo de resultados, se comprueba la efectividad del cálculo de Elemento Finito en el objeto de estudio, ya que se obtienen valores congruentes con la realidad y las propiedades inherentes de los materiales de la probeta, como se muestra en las Figuras 94 - 96. De esta idealización, se puede ver en la Tabla 9., que las Deformaciones Unitarias presentan valores prácticamente de 0.0  $\mu\text{m}$ , para todas las tensiones.

Y debe recordarse que las cargas de entrada (50, 100 y 150 kgf), son equivalentes a los pesos de los cables en la realidad, es decir, corresponden a pesos de productos de Condumex, estos resultados indicarían que las bridas de los carretes, no sufren deformaciones importantes, inherentes al proceso de producción de los cables y al empaque de estos en dichos carretes, en caso de que las bridas estuvieran fabricadas del material compuesto de las probetas de nuestro estudio.

Ahora bien, de nueva cuenta, sólo nos enfocaremos en el análisis de los valores máximos de las deformaciones unitarias, debido a que estos datos hacen referencia a las de mayor importancia en caso de que excedan más del 5 % de la longitud total de la probeta.

**Tabla 9**

*Análisis de Deformaciones Unitarias (ESTRN)*

| CARGA kgf (N) | Longitud Inicial de probeta (mm) | Deformaciones Unitarias ESTRN | % de Deformación Unitaria |
|---------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
|               |                                  | Max.                          | Max.                      |
| 50 (490)      | 208                              | 1.42E-04                      | 0.00007%                  |
| 100 (981)     |                                  | 2.84E-04                      | 0.00014%                  |
| 150 (1471)    |                                  | 4.26E-04                      | 0.00020%                  |

*Nota.* Valores de Deformaciones Unitarias a diferentes cargas de Tensión. Elaboración propia, 2025.

Con estos datos se comprueba la robustez del diseño de la probeta de prueba, ya que en la columna de la derecha se observa que el porcentaje de ESTRN es prácticamente cero.

### 6.3.4 Factor de Seguridad (FDS)

Como se mencionó anteriormente, la resistencia a la tensión cortante (a la ruptura) de un material o estructura debe ser siempre mayor que la resistencia requerida o exigida. Y está definido de la siguiente manera:

$$\text{Factor de seguridad}_{\eta} = \frac{\text{resistencia real máxima}}{\text{resistencia requerida o de diseño}}$$

El factor de seguridad se relaciona directamente con el de la tensión máxima, también conocido como criterio de Coulomb, y se basa en la teoría de tensión normal máxima; según la cual, el fallo o fractura se produce cuando la tensión principal máxima alcanza el límite de ruptura del material ante una tensión simple. Es un dato adimensional y para materiales como la madera, se recomiendan valores de entre 2 y 3.5.

Se debe tomar en cuenta que, las grietas en un cuerpo, disminuyen considerablemente la resistencia del material a la tensión, mientras que su efecto es mucho menor en la compresión porque dichas grietas, tienden a cerrarse; esta sencilla diferencia cobra gran importancia en

los materiales anisotrópicos como la madera, y aplica obviamente en nuestro material compuesto de fibras de madera y resina.

De acuerdo a las Figuras 97 – 99, se sabe que DSW arroja un FDS mínimo de 42.5 y un máximo de 145.2 cuando se sujeta a una carga de 50 kgf; y en el mismo sentido, la probeta ofrece un FDS mínimo de 14.17 y un máximo de 48.41 cuando se sujeta a una carga de 150 kgf,

Ahora bien, los datos de Factor de Seguridad que arroja SOLIDWORKS los define en base a la distancia inter nodal, es decir por cada nodo contiguo; en el caso de este estudio, los nodos están separados por 10 unidades (cada segmento de fibra con resina mide 10 x 10 mm). Por otro lado, revisando estos resultados, se pueden comparar contra los valores obtenidos del cálculo de Tensiones para von Mises para los datos de FDS, y como puede verse en la Tabla 10., que son congruentes entre sí.

**Tabla 10**

*Análisis de Factor de Seguridad (FDS)*

| CARGA kgf (N) | medida inter nodal | Factor de Seguridad (SOLIDWORKS) | <i>fs de diseño</i> |
|---------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|
|               |                    | Min.                             | Min.                |
| 50 (490)      | 10                 | 42.5                             | <b>4.25</b>         |
| 100 (981)     |                    | 21.5                             | <b>2.15</b>         |
| 150 (1471)    |                    | 14.17                            | <b>1.42</b>         |

*Nota. Factor de Seguridad de la probeta a diferentes cargas de tensión. Elaboración Propia, 2025.*

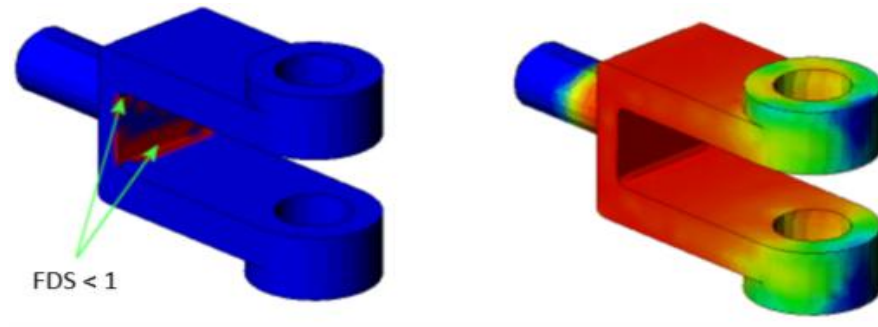
Al igual que en el análisis de von Mises, Desplazamiento y Deformaciones, para el Factor de Seguridad, es conveniente tomar en cuenta el valor más representativo o de riesgo arrojado por SOLIDWORKS, y para este rubro, el valor mínimo es de nuestro interés, ya que sería la base para el diseño de los materiales compuestos, y garantizar así, se cumpla al menos, el valor más bajo del factor de seguridad en la probeta y posteriormente en un objeto físicamente.

Según la mayoría de los programas computacionales de cálculo de Elemento Finito, al grado de ser considerado como una regla no escrita, se utilizan los colores: azul, verde, amarillo y rojo (en diferentes intensidades) para indicar los puntos o áreas dentro de un cuerpo con mayor probabilidad o no a la falla; es decir, las regiones con valor de factor de seguridad (*fs*) inferior

a 1 se muestran en color rojo (regiones no seguras) y las regiones en color azul corresponden a las regiones seguras (sin proclividad a la falla), como puede observarse en la Figura 103.

**Figura 103**

*Código de colores para indicar FDS en AEF.*



Nota. Adaptada de Tutorial SOLIDWORKS®, por DSW, 2025, [https://help.solidworks.com/2023/spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Factor\\_of\\_Safety\\_Check.htm](https://help.solidworks.com/2023/spanish/SolidWorks/cworks/c_Factor_of_Safety_Check.htm)  
CC. BY.3.0

Y esto lo podemos corroborar en las Figuras 88 a 99, pues la idealización del material compuesto, muestra imágenes de la probeta en color verde para los valores de von Mises y de Factor de Seguridad con ligeras porciones en color azul tenue, en la parte más distal del extremo donde se ejercen las cargas, y en las pruebas de Desplazamiento y Deformación se muestra la posible falla o deformación, justo en el punto de acción de las cargas, pero que no representan riesgo real, debido a los valores prácticamente iguales a 0.0 (cero).

También se concluye que, aunque el resultado del factor de seguridad para el valor de 150 kgf de carga, confirma que la madera balsa ofrece un desempeño por debajo de 2, para la probeta de este estudio, aun así, cumple el desempeño mecánico sin problemas; ya que para las cargas iguales o menores a 100 kgf, esta madera ofrece una buena alternativa comparada a la madera de pino y, sobre todo, en lugar de los aglomerados y el MDF.

Y estos resultados no son contrarios a lo esperado, porque originalmente, se tenía considerado el uso de madera de encino como la fibra para la elaboración del material compuesto, y de la bibliografía antes mostrada, se sabe científicamente que la densidad del encino es casi 4.5

veces mayor, al igual que su fluencia que suele ser hasta 55% mayor, que la de la madera balsa; además, esta última tuvo que emplearse como la única disponible en las librerías de materiales del software empleado para el AEF de este proyecto.

## 6.4 Hallazgos

Al finalizar el análisis de la idealización del material compuesto, a través del Cálculo con Elemento Finito en el programa de cómputo SOLIDWORKS®, los datos obtenidos permiten señalar los siguientes puntos más relevantes de la investigación.

### 6.4.1 Datos Objetivos

Los datos resultantes de los estudios realizados con AEF en SOLIDWORKS® a la probeta digital de un material compuesto de fibras de madera balsa y resina epoxi (adhesivo), se muestran en la Tabla 11., y al cotejarlos con el objetivo principal de este trabajo de investigación, el cual se estableció como la Idealización y simulación digital de un material compuesto, con la premisa de que dicho modelo, debería cumplir el factor de seguridad mínimo de 2 y ofreciera un 80% de la resistencia real de la madera sólida de pino, se observó que el resultado de este factor para la carga máxima de estudio, fue de: 1.42., valor que de manera objetiva, quedó por debajo de lo requerido, pero no fue una sorpresa, ya que la madera balsa, es prácticamente 4 a 4.5 veces menos densa que el encino, y presenta menos Fluencia a la tensión cortante.

**Tabla 11**

*Tabla de datos finales del análisis del CEF en SOLIDWORKS®*

| CARGA kgf (N) | Factor de Seguridad (fs) de von Mises | % de Desplazamiento | % de Deformación Unitaria | fs de diseño |
|---------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------|--------------|
|               | Min.                                  | Max.                | Max.                      | Min.         |
| 50 (490)      | 4.23                                  | 0.0105%             | 0.00007%                  | 4.25         |
| 100 (981)     | 2.11                                  | 0.0211%             | 0.00014%                  | 2.15         |
| 150 (1471)    | 1.41                                  | 0.0316%             | 0.00020%                  | 1.42         |

*Nota.* Factores de Seguridad y Deformaciones, como datos de referencia y resultados del diseño del material compuesto. Elaboración propia, 2025.

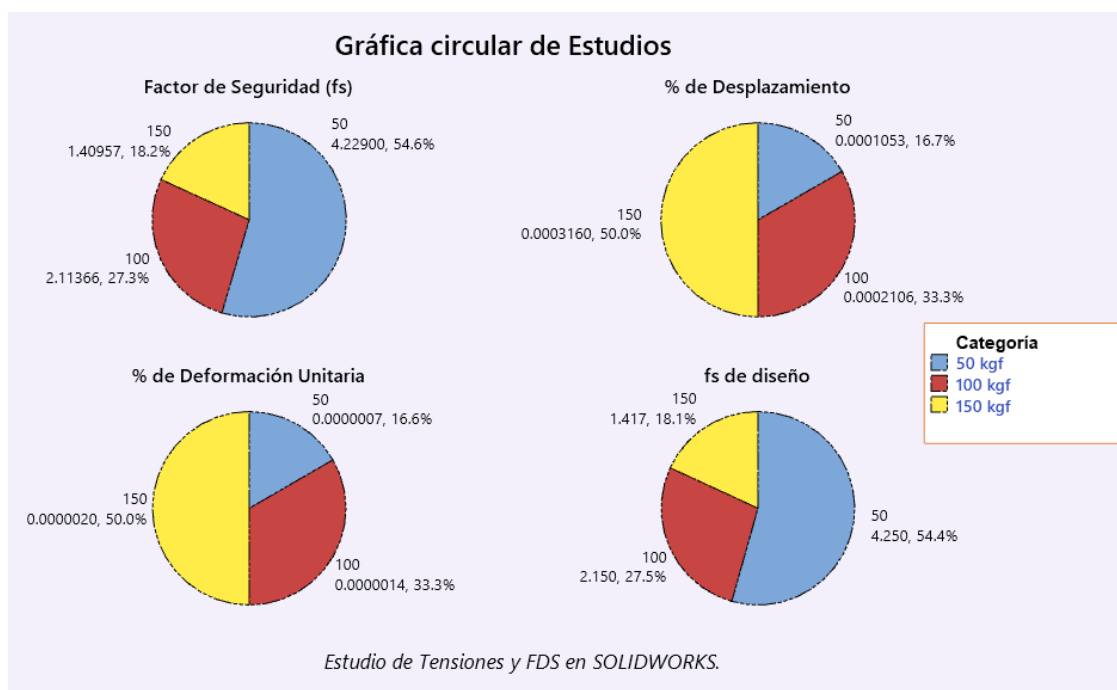
### 6.4.2 Porcentajes de esfuerzos a diferentes cargas

En la Figura 114., se muestran las gráficas de pastel donde se pueden ver de golpe los resultados de este proyecto. Y al mismo tiempo se visualizan los porcentajes relativos a las deformaciones en la probeta conforme se incrementan las cargas.

Cabe destacar que los datos obtenidos son congruentes con el comportamiento de los análisis físicos publicados en la bibliografía citada en este proyecto, y también en las pruebas realizadas en el laboratorio de Condumex en resistencia de probetas de MDF y de madera de pino. Las gráficas mostradas en las Figuras 105 y 106 corresponden a reportes que se llevan a cabo en el Laboratorio de Materias Primas de Condumex, de manera sistemática y de acuerdo al protocolo de inspección interno correspondiente al tipo de material o materia prima, y han servido como base para la determinación de requisitos físicos mínimos que deben cumplir los materiales o insumos para fabricar los cables, por ejemplo: la madera empleada en el proceso de embalaje y empaque de los cables, los plásticos para las cubiertas, fibras textiles, cintas de metal, fibras ópticas, entre muchos otros.

**Figura 104**

*Gráficas de Estudios de tensión en SOLIDWORKS®.*



*Nota.* Gráfica de resultados de los estudios, en Minitab Software. Elaboración propia, 2025.

Los reportes de las pruebas del laboratorio de materias primas de la empresa Conдумex, se integran en los ANEXOS 3, 4 y 5. Y en las Figuras 105 a y 105 b, se muestran los resultados de estos reportes para el caso de la bobina de MDF 78NT28AC.

**Figura 105 a**

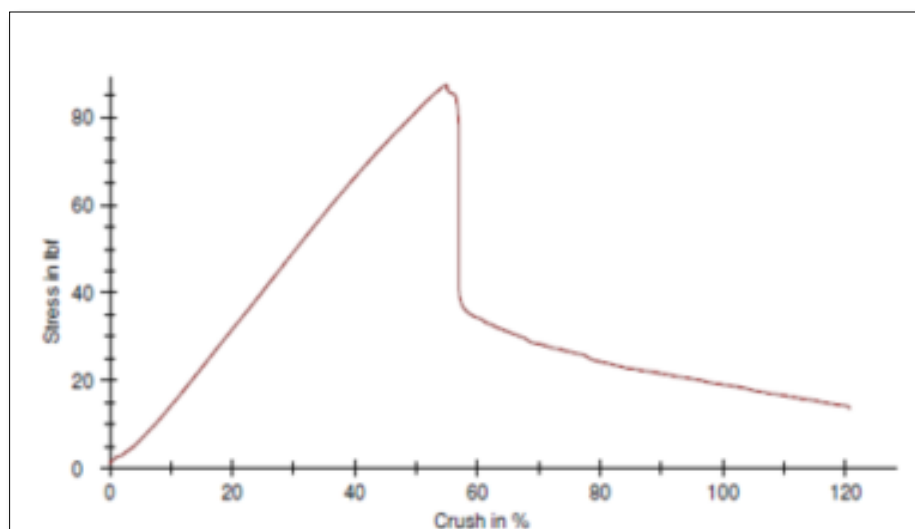
*Protocolo de prueba de Tensión a MDF*



*Nota.* Adaptado de Reporte de pruebas del LMP de Conдумex (carrete: 78NT28AC). Elaboración propia, 2021.

**Figura 105 b**

*Gráfica de esfuerzo a la Tensión a MDF*



*Nota.* Adaptado de Reporte de pruebas del LMP de Conдумex (carrete: 78NT28AC). Elaboración propia, 2021.

En las Figuras 105.a y b., se muestra un valor de 39.7 kgf (87.44 lbf) de esfuerzo máximo o lo que es equivalente a 389 N de carga para la falla del material (MDF). Por lo tanto, se concluye que la probeta desarrollada en la simulación de esta investigación, excede sin problema este esfuerzo, y con un Factor de Seguridad de 4.25, cuando se realizó la prueba de Tensión a 50 kgf (490 N).

## 6.5 Comprobación de la hipótesis

Finalmente, de la Figura 106., se observa que, al comparar la evaluación físicamente el esfuerzo a la tensión máximo que soportan las duelas de pino con 1/2 pulgada de espesor, de acuerdo al protocolo de pruebas de laboratorio CX antes descrito, se obtiene un valor promedio de 138 kgf (303.51 lbf) o lo que es equivalente a 1350 N de carga, al punto de falla de las mismas.

**Figura 106**

*Protocolo de prueba de Tensión a duela de pino*



**CONDUMEX**  
LABORATORIO

## Parameters:

Lote : Experimental  
 Material : Duelas DELGADAS  
 Pre-load : 2 N  
 Pre-load speed : 50 mm/min  
 Test speed : 11 mm/min

Proveedor: Comavime  
 Operador : José Lara

## Results:

| Nr | Largo<br>mm | Ancho<br>mm | Fmax.<br>lbf | Fmax.<br>mm |
|----|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 1  | 400         | 85          | 303.51       | 16.86       |
| 2  | 400         | 85          | 297.23       | 15.94       |

*Nota.* Adaptado de Reporte de pruebas del LMP de Condumex. Elaboración propia, 2021.

Estos resultados son muy alentadores, pues al cotejar con el análisis de nuestro modelo digital, se concluye que la probeta desarrollada cumple y excede el mismo desempeño teórico, al mostrado físicamente por las duelas de pino a la carga máxima de evaluación en el estudio digital (150 kgf), y a pesar de que teóricamente el Factor de Seguridad de la probeta digital

está por debajo de lo que se plantea como objetivo en este proyecto: 2.0 a 3.5 (recomendación de acuerdo publicación de (Alvis-Gordo, 2017)).

Estos datos, confirman la hipótesis de que la simulación digital de los esfuerzos a la tensión mecánica en un material compuesto, a base de madera y resina, con la ayuda de programas de diseño que cuentan con Análisis de Elemento Finito, puede predecir con un grado de precisión de muy aceptable, la resistencia que tendrá dicho material al ser comparado con el pino, por ejemplo. En la Tabla 12, se hace el resumen de los resultados, dándole prioridad al Factor de Seguridad.

**Tabla 12**

*Resultados del CEF & Protocolo de pruebas mecánicas físicas CX*

| <i>Estudio de Tensión</i>                  | <i>Factor de Seguridad</i>                             | <i>carga de prueba<br/>kgf (N)</i> | <i>Tipo de estudio</i>                                               | <i>RESULTADO</i>                  |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Probeta de balsa +<br/>resina epoxi</b> | <b>1.42</b><br>(resultado de estudio en<br>SOLIDWORKS) | <b>150 (1471)</b>                  | <b>CEF SOLIDWORKS</b>                                                | <b>SIN FALLA</b><br>(sin ruptura) |
| <b>Duela de pino</b>                       | <b>≥ 2</b>                                             | <b>138 (1350)</b>                  | <b>Protocolo en Laboratorio<br/>de MP con equipo<br/>Zwick/Roell</b> | <b>FALLA</b>                      |

*Nota.* Comparativa de Resistencia a la Tensión de probeta digital y duela de pino. Elaboración propia, 2025.

Es decir, el desempeño mecánico a la ruptura del material compuesto desarrollado digitalmente, se considera seguro para su uso en la elaboración de los empaques de cables de fibras ópticas de hasta 150 kg/tramo; en otras palabras: en base a todos los resultados que arroja este estudio, respecto a las Deformaciones y Factor de Seguridad de diseño, la probeta de balsa y resinas desarrollada digitalmente, cumple satisfactoriamente los requisitos de desempeño mecánico requerido comparado con duelas de pino natural, y excede por más del triple al MDF en el esfuerzo a la tensión, siendo estos materiales, dos de los más usados actualmente en empaques de los cables ópticos de CONDUMEX.

# CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 7.1 Conclusiones

- Como se planteó al inicio de esta investigación: la simulación digital de un material compuesto de fibras de madera y adhesivos, puede idealizarse a través del Análisis de Elemento Finito del programa de diseño SOLIDWORKS®. Y de acuerdo con los resultados obtenidos de este proyecto, se demuestra que, este recurso de cálculo y diseño, es una poderosa y efectiva herramienta en la predicción del comportamiento de este tipo de materiales; propiciando el ahorro de materias primas y recursos económicos ya que se evita la elaboración de prototipos físicos que generalmente se destruyen.
- Este estudio permitió comprender mejor el comportamiento anisotrópico de la madera; y demostró, además, la importancia de un diseño estructural con las fibras alineadas paralelamente, en dos o más capas; logrando con ello, un modelo digital que cumplió con un mejor desempeño mecánico y mayor esfuerzo a la tensión que los paneles o aglomerados comerciales, donde las fibras se distribuyen aleatoriamente.
- Los resultados de esta tesis, permitieron subrayar la importancia de las propiedades de la madera que se emplea en un modelo digital, comprobando que, la utilización de maderas con mayor densidad y dureza, ofrecerán proporcionalmente, un material compuesto con mejores características de resistencia a los esfuerzos de tensión y a la deformación, y logrando diseños más robustos digital y físicamente.
- Se concluye que la idealización de una probeta de material compuesto de fibras de madera y adhesivos, puede lograrse en el programa de diseño SOLIDWORKS®, con resultados satisfactorios en cuanto a la simulación de esfuerzos a la tensión; y una vez que se tiene una probeta funcional, la elaboración de pruebas y ajustes de los materiales, reduce el tiempo de evaluación a minutos, en relación a semanas y meses que conllevan los desarrollos de prototipos físicos, actualmente.
- Es relevante destacar que el costo para la elaboración de prototipos se reduce a una fracción, pues ahora sólo se pedirá a los proveedores de carretes o empaques, el desarrollo de prototipos propiamente pre evaluados a través de AEF, y con ello se estima un ahorro del 90% de las muestras físicas, donde el precio de los carretes muestra, varía de acuerdo al costo de sus insumos y la apreciación del dólar.

- Finalmente cabe mencionar que, hace al menos dos décadas, el principal costo para realizar Análisis de Elemento Finito radicaba en el precio de los equipos de cómputo; pero actualmente, se pueden conseguir computadoras poderosas y veloces para el análisis de gran volumen de datos, a precios asequibles. Pero ahora los programas de diseño con mayor especialidad y precisión en AEF, se han vuelto muy costosos.

## **7.2 Recomendaciones**

A continuación, se manifiestan las siguientes recomendaciones, sustentadas en los resultados de esta tesis.

Se sugiere establecer un proceso homologado entre los Departamentos de Ingeniería del Producto de las plantas del grupo cablero Condumex; en donde se defina la metodología para elaboración de los diseños de los empaques para los cables de manera general y particular, dependiendo de los esfuerzos a la tensión que soporten, y evaluando previamente el desempeño mecánico de los materiales y modelos en desarrollo.

Se recomienda también, adquirir las utilerías y bibliotecas del programa SOLIDWORKS®, que incluyan los materiales empleados en la construcción de los empaques para los productos de CONDUMEX, y capacitar a los ingenieros de los departamentos de diseño, en el uso del cálculo de Elemento Finito, para lograr mayor integración de los resultados e ir consolidando una biblioteca compartida Inter plantas, de diseños para los empaques.

Finalmente, se recomienda hacer un catálogo de diseños de los empaques pre evaluados en AEF, que incluya aquellos modelos que hayan sido probados físicamente, y compartirlo en la intranet de la compañía; con la intención de que los departamentos de diseño tengan acceso a los códigos de carretes, y puedan utilizar probetas de prueba precargadas en la base de datos CONDUMEX, agilizando así la selección de empaques previamente desarrollados, ahorrando tiempo en la evaluación de nuevos diseños.

## CAPÍTULO VIII: PROPUESTA

En el último rubro de este proyecto de investigación, surgen de manera natural algunas sugerencias que se avizoran de gran utilidad para el departamento de Ingeniería del Producto y Diseño, como es la adquisición de los diferentes módulos, bibliotecas y utilerías del programa SOLIDWORKS®, así como la adquisición de sesiones de capacitación directamente de la compañía que representa la marca en los diferentes Estados donde se encuentran las plantas de producción; sin embargo, el costo del software y las capacitaciones no serían amortizados con prontitud, ya que CONDUMEX no es el fabricante directo de los carretes de empaque que utiliza para el manejo y envío de sus productos.

Dicho lo anterior, se propuso:

- Solicitar al representante de la marca SOLIDWORKS®, cotización actualizada del programa completo con las utilerías necesarias para perfeccionar el modelado de las probetas para materiales compuestos e inclusive, para poder evaluar diseños de carretes con diferentes compuestos sólidos, como maderas, plásticos, metales ligeros, entre otros. A finales del año 2023, se obtuvo una primera cotización, véase ANEXO 6 y 7.

Figura 107

Cotización de software DMD con las utilerías de AEF.



4. Propuesta.

4.1 Descripción.

| Lote                                                             | Cant | Descripción                                                                            | Precio Por Lote  | Precio                 |
|------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------|
| <b>MODSIM para Gemelos Digitales</b>                             |      |                                                                                        |                  |                        |
| Paquete de Diseño y Validación MODSIM.                           |      |                                                                                        |                  |                        |
| Que incluye:                                                     |      |                                                                                        |                  |                        |
| 1                                                                | 1    | 1 SOLIDWORKS Professional with Cloud Services.                                         | \$17,130.00      | <del>\$17,130.00</del> |
|                                                                  |      | 1 3DEXPERIENCE Structural Designer.                                                    |                  |                        |
|                                                                  |      | 24 meses de servicio.                                                                  |                  |                        |
| <b>Servicio Recomendado para la implementación</b>               |      |                                                                                        |                  |                        |
| Entrenamiento de Alto Rendimiento "Modelado para la Simulación", |      |                                                                                        |                  |                        |
| Que incluye:                                                     |      |                                                                                        |                  |                        |
| 1                                                                | 1    | 24 hrs de entrenamiento presencial en 3 días en las instalaciones de CONDUMEX SJR.     | \$5,100.00       | <del>\$5,100.00</del>  |
|                                                                  |      | 8 hrs de consultoría para la construcción y caracterización de estudios de validación. |                  |                        |
|                                                                  |      | Soporte remoto para el aprovechamiento de las soluciones                               |                  |                        |
| <b>Beneficios incluidos</b>                                      |      |                                                                                        |                  |                        |
| 2                                                                | 1    | Servicio DMD Business Advanced                                                         | \$999.00         | Gratis                 |
|                                                                  |      | Se detalla en tabla inferior (Anexo 1)                                                 |                  |                        |
|                                                                  |      |                                                                                        | \$18,129.00      | <del>\$23,229.00</del> |
|                                                                  |      |                                                                                        | Subtotal USD     | <del>\$23,229.00</del> |
|                                                                  |      |                                                                                        | I.V.A. USD       | <del>\$3,636.62</del>  |
|                                                                  |      |                                                                                        | Total USD        | <del>\$26,865.62</del> |
|                                                                  |      |                                                                                        | Usted Ahorra USD | <del>\$8,736.62</del>  |

Nota. Adaptado de cotización hecha por DMD a Condumex (Confidencial). Elaboración propia, 2023.

El precio ofertado a Condumex, se pidió reservar en confidencialidad, al tratarse de información comercial delicada industrialmente, donde el proveedor señaló que la oferta era única y personalizada para cada compañía. Pero se puede ver que, de manera general, el precio al público estaba por arriba de los \$18,100 USD., en noviembre del 2023.

- Se sugiere comprar una licencia completa con todas las herramientas de diseño que permita el cálculo de Elemento Finito y las librerías de materiales necesarios para los modelos de prueba, estableciendo una agenda con horarios de trabajo para utilizarla de manera coordinada entre todas las plantas del grupo Condumex. Abaratando de esta manera la adquisición de una licencia, y logrando el acceso a una simulación más poderosa y escalable de acuerdo a las necesidades de cada planta.
- La idea de implementar la digitalización en el desarrollo de los empaques de los cables de CONDUMEX, se sugiere también, como la entrada al modelado con AEF de otras áreas en el diseño de sus productos, pues se sabe perfectamente que muchas compañías reportan ahorros cuantiosos con la utilización del modelado con elemento finito.

**Figura 108**

*Ejemplo de recuperación de inversión al emplear digitalización de procesos*



*Nota.* Adaptado de propuesta hecha por DMD a Condumex (Confidencial). Elaboración propia, 2023

- Con los resultados obtenidos en este proyecto, se propone realizar la digitalización de diversos procesos en el área de producción, como puede ser la inyección de plásticos para las cubiertas de los cables o la simulación de esfuerzos a la ruptura de elementos refuerzo mecánico, entre otros análisis. Y lo anterior, con la finalidad de ampliar la gama de pruebas de laboratorio de manera digital, para aquellas que aún se realizan de manera física y ocupan muchos recursos personales y materiales.

***A través de los resultados de este proyecto de investigación se permitió tener una idea clara y sustantiva en el aprovechamiento de la tecnología disponible, para lograr el desarrollo de modelos digitales que ayudan a realizar pruebas de resistencia mecánica a través del análisis y cálculo de Elemento Finito en una parte medular del diseño de los productos de CONDUMEX: sus empaques.***

***Que si bien, los carretes de empaque, no forman parte constitutiva de los cables de fibras ópticas o de otras tecnologías, sí son un recurso auxiliar indispensable para el manejo, venta y distribución de los mismos. Por lo tanto, empleando las herramientas de cómputo disponibles en la actualidad y un adecuado programa de diseño, se logra reducir drásticamente el costo, el tiempo y los materiales físicamente empleados cuando se desarrollan dichos empaques, generando ahorros estimados en decenas de miles de pesos anualmente para CONDUMEX.***

# BIBLIOGRAFÍA

/1, I. 2. (07 de 2006). *ISO 14044:2006(en) Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. Obtenido de ISO: <https://dgn.isolutions.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>

5, I. C. (07 de 2006). *ISO 14040:2006(es) Análisis de Ciclo de Vida (ACV): Principios y marco de referencia*. Obtenido de Organización Internacional de Normalización: <https://dgn.isolutions.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

Adib, Rana. (2023). *RENEWABLES 2023 GLOBAL STATUS REPORT*. REN21. Paris: REN21 Secretariat. Recuperado el 2023, de <https://www.ren21.net/gsr-2023/>

Aguirre, A. C. (2024). Stress–displacement stabilized finite element analysis of thin structures using solid-shell elements, Part I: On the need of interpolating the stresses. *Finite Elements in Analysis & Design*, 236(104168), 28. doi:doi.org/10.1016/j.finel.2024.104168

Alvis-Gordo, J. F.-G.-R. (junio de 2017). PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA DE URACO (*Ocotea brevipetiolata* van der Werff), MUNICIPIO DE SIBUNDOY, PUTUMAYO. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 15(1), 66-75. doi:10.18684/BSAA(15)66-75

ASTM-D2395. (march de 2015). *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials*. Recuperado el 2022, de [file:///C:/Users/alfre/Downloads/dlscib.com-pdf-astm-d2395-density-and-specific-gravity-relative-density-of-wood-dl\\_a1e05eb212d3d28d2fcb14569cd598a7.pdf](file:///C:/Users/alfre/Downloads/dlscib.com-pdf-astm-d2395-density-and-specific-gravity-relative-density-of-wood-dl_a1e05eb212d3d28d2fcb14569cd598a7.pdf)

Aula Virtual. (4 de julio de 2015). *CAFI Aula Virtual*. Obtenido de Tecnología-Proyecto Ingeni@: <https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual/mod/page/view.php?id=25061&forceview=1>

Autengruber, M. L. (17 de december de 2020). Finite-element-based prediction of moisture-induced crack patterns for cross sections of solid wood and glued

- laminated timber exposed to a realistic climate condition. *Construction and Building Materials*, 271(121775), 1-15. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121775
- Ayrylmis, N. J. (2011). Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*(96), 818-822. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2011.02.005
- Batista, L. M. (09 de Julio de 2021). Resistência mecânica e composição química de madeiras amazônicas deterio-radas em ensaios de campo. *Madera y Bosques*, 27(1), 1-9. doi:https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712079
- Becedas, M. (19 de abril de 2021). *¿Qué está pasando con la madera? Su precio sube un 400% desde el mínimo de 2020*. Obtenido de elEconomista.es.: <https://www.eleconomista.es/materias-primas/noticias/11167847/04/21/Que-esta-pasando-con-la-madera-Su-precio-sube-un-400-desde-el-minimo-de-2020.html>
- Biberos Bendezú, K. C.-R. (2019). *Actividad 9: Análisis de Ciclo de Vida de Mobiliario de Melamina*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ingeniería. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente. Perú. Obtenido de [https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/from-crm/16-4628cf07c0f326a9f9f77e32518c7f6d\\_Actividad\\_9\\_ACV\\_Melamina\\_Final.pdf](https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/from-crm/16-4628cf07c0f326a9f9f77e32518c7f6d_Actividad_9_ACV_Melamina_Final.pdf)
- Block, S. B. (2013). *Fundamentos de Administración financiera* (DECIMOCUARTA ed.). México: Mc Graw Hill.
- Borja de la Rosa, A. M. (octubre de 2010). CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LA MADERA DE *Juniperus flaccida* VAR. POBLANA MARTÍNEZ. *RCHSCFA Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 261-280. doi:10.5154/r.rchscfa.2010.09.083
- Buenrostro Mercado, E. (Dic de 2022). Propuesta de adopción de tecnologías asociadas a la industria 4.0 en las pymes mexicanas. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 10(24), 1-19. doi:https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81347
- Calderón, G. G. (2011). *Introducción al Método de los Elementos Finitos: un enfoque matemático*. Caracas, Mérida, Venezuela: Editorial Texto.

- Celigüeta Lizarza, J. T. (2011). *Metodo de los elementos finitos para analisis estructural* (Cuarta edición ed.). España, San Sebastián, España: UNICOPIA C.B. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10171/19069>
- Chanda, A. B. (19 de Abril de 2021). A parametric study to minimise spring-back while producing plywood channels. *Journal of Cleaner Production*, 304, 1-11. doi:[doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127109](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127109)
- CONDUMEX, S.A. DE C.V. (febrero de 2022). CONDUMEX. Obtenido de ¿Quiénes somos?: <https://www.condumex.com.mx/quienes-somos/>
- COP26. (2021). *COP26: THE GLASGOW CLIMATE PACT*. Glasgow: CONFERENCE OF PARTIES.
- Crespo Outes, J. (2021). *USC MINERVA REPOSITORIO INSTITUCIONAL DA USD*. Obtenido de Determinación de las propiedades mecánicas y de fractura en madera de Eucalyptus globulus para análisis mediante simulación numérica: <http://hdl.handle.net/10347/26287>
- Dávalos-Sotelo, R. P.-O. (12 de abril de 2010). RESISTENCIA AL IMPACTO DE LA MADERA DE DIEZ ENCINOS (Quercus) MEXICANOS. *RCHSCFA. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.*, 16(2), 215-226. doi:[10.5154/r.rchscfa.2009.10.039](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.10.039)
- Dutta, S. L.-V. (2021). *Tracking Innovation through the COVID-19 Crisis*. doi:<https://www.globalinnovationindex.org/userfiles/file/reportpdf/gii-full-report-2021.pdf>
- Fink, J. K. (2013). Chapter 5 - Urea/Formaldehyde Resins. En J. K. FINK, *Reactive Polymers Fundamentals and Applications. A Concise Guide to Industrial Polymers*. (págs. 179-192). S.D.: William Andrew Publishing. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3149-7.00005-X>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *THE STATE OF THE WORLD'S FORESTS*. doi:<https://doi.org/10.4060/cb9360en>
- García Mora, J. J. (2021). *ESTRUCTURAS EN MADERA. Nociones Básicas*. Córdoba, España: Fondo Editorial RED Descartes. Obtenido de <https://proyectodescartes.org/iCartesiLibri/index.htm>

- Golar G, A. M. (4 de junio de 2020). The social-economic impact of COVID-19 pandemic: implications for potencial forest degradation. *Heliyon*, 6, 1-10. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e05354
- González, L. (19 de agosto de 2021). *Desabasto de madera amenaza reactivación del sector mueblero*. Recuperado el 2021, de EL ECONOMISTA: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Desabasto-de-madera-amenaza-reactivacion-del-sector-mueblero-20210819-0017.html>
- González-Laredo, R. F.-C.-G. (dic. de 2015). Wood preservation using natural products. *Madera y Bosques*, 21(no.spe:63-76), 63-76. Recuperado el agosto de 2021
- Gourtsilidou, M. (31 de Mayo de 2021). *Top 10 countries with mayor forest losses, 2021*. (agency.duda.co, Ed.) Recuperado el 06 de Febrero de 2022, de CEOWORLD Magazine: <https://ceoworld.biz/2021/05/31/top-10-countries-with-major-forest-losses-2021/>
- Hellriegel, D. J. (2009). *Administración, Un enfoque basado en competencias* (11a. ed.). México: CENGAGE Learning. Obtenido de <http://latinoamerica.cengage.com>
- Honorato, J. e. (2001). PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA DE CINCO ESPECIES DE ENCINO DEL ESTADO DE GUANAJUATO. *Ciencia Forestal en México*, 26(90), 5-28.
- Huber, J. A. (20 de November de 2021). A method for generating finite element models of wood boards from X-ray computed tomography scans. *Computers and Structures*, 260(160702), 21. doi:10.1016/j.compstruc.2021.106702
- Hutton, D. V. (2004). *FUNDAMENTALS OF FINITE ELEMENT ANALYSIS* (1st ed. ed.). (J. Plant, Ed.) New York, NY 10020: Mc Graw Hill. Obtenido de [www.mhhe.com](http://www.mhhe.com)
- IFC Corporación Financiera Internacional. (30 de abril de 2007). *IFC Corporación Financiera Internacional. GRUPO BANCO MUNDIAL*. Obtenido de Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para tableros y productos de madera particulada.: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/e1203c1a-42c7-4d4e-bf23-3ed2a63089b6/0000199659ESes%2BBoard%2Band%2BPBP%2Brev%2Bcc.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jqeCPM7>

INEGI. (30 de 10 de 2023). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2022, de Biomasa. Forestal (Porcentaje), Estados Unidos Mexicanos, 2020.: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=6207067809&tm=6#D6207067809#D6207067785>

INEGI. (2014). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 27 de 11 de 2022, de Banco de Indicadores: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/default.aspx?t=215#D215>

Infante-Alcalde, J. &-U. (5 de Oct. de 2019). Technical, Economic and Environmental Analysis of the manufacture of concrete blocks with Recycled Terephthalate Polyethylene (PET). *Información Tecnológica*, 30(5), 25-36. doi:doi.org/10.4067/S0718-07642019000500025

Jernkvist, L. O. (2001). Fracture of wood under mixed mode loading: II. Experimental investigation of Picea abies. *Engineering Fracture Mechanics*, 68(5), 565-576. doi:10.1016/S0013-7944(00)00128-4

JIJU, A. F. (1 de Julio de 2001). Teaching the Taguchi method to industrial engineers. *Work Study*, 50(4), 141-149. Recuperado el 2022, de Teaching the Taguchi method to industrial engineers: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/00438020110391873/full/html>

Kattosová, I. (01 de noviembre de 2021). *Más de 100 líderes mundiales acordarán acabar con la deforestación para 2030 en la COP 26*. Recuperado el 2021, de CNNespañol: <https://cnnespanol.cnn.com/2021/11/01/deforestacion-cop26-acuerdo-trax/>

Lara-Bocanegra, A. J.-M. (2017). Finger-jointed Eucalyptus globulus with 1C-PUR adhesive for high performance engineered laminated products. *Construction and Building Materials*, 135(6), 529-537. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.01.004

Lengowski, E. B. (2021). NANOCELLULOSE-REINFORCED PHENOL-FORMALDEHYDE RESIN FOR PLYWOOD PANEL PRODUCTION. *Maderas. Ciencia y tecnología.*, 23(5), 1-10. doi:http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100405

- Little, Z. L. (2012). Materials responsible for formaldehyde and volatile organic compound (VOC) emissions. *Woodhead Publishing Limited*, 76-121. doi:10.1533/9780857096357.76
- Lopes Silva, D. R. (09 de mayo de 2013). Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. (J. Schweinle., Ed.) *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 1404-1411. doi:https://doi.org/10.1007/s11367-013-0583-3
- Majidi, R. T. (2016.). ADSORPTION OF NANOWOLLASTONITE ON CELLULOSE SURFACE: EFFECTS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEDIUM-DENSITY FIBERBOARD (MDF). *CERNE [on line]*, 22.(2.), 215-222. doi:10.1590/0104776020162222146
- Marcu, C. N. (junio de 2018). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ARCHIVO DIGITAL UPM*. Obtenido de PAISAJES 4.0 Amazon y los nuevos espacios soberanos: <https://oa.upm.es/cgi/export/51915/>
- Martínez Martínez, A. Á. (27 de julio de 2020). *ResearchGate*. Obtenido de INDUSTRIA 4.0 EN MÉXICO. Elementos diagnósticos y puesta en práctica en sectores y empresas: [https://www.researchgate.net/profile/Adriana-Martinez-Martinez-2/publication/343322251\\_Industria\\_40\\_en\\_Mexico\\_Elementos\\_diagnosticos\\_y\\_puesta\\_en\\_practica\\_en\\_sectores\\_y\\_empresas/links/5f2c9e3d458515b7290a5cee5/Industria-40-en-Mexico-Elementos-diagnosticos-y](https://www.researchgate.net/profile/Adriana-Martinez-Martinez-2/publication/343322251_Industria_40_en_Mexico_Elementos_diagnosticos_y_puesta_en_practica_en_sectores_y_empresas/links/5f2c9e3d458515b7290a5cee5/Industria-40-en-Mexico-Elementos-diagnosticos-y)
- Montesinos López, O. A. (2009.). *Muestreo estadístico: Tamaño de muestra y estimación de parámetros*. Colima., Colima., México.: Universidad de Colima. Recuperado el noviembre. de 2021., de [https://www.researchgate.net/publication/287490384\\_Muestreo\\_Estadistico\\_Tamano\\_de\\_muestra\\_y\\_estimacion\\_de\\_parametros](https://www.researchgate.net/publication/287490384_Muestreo_Estadistico_Tamano_de_muestra_y_estimacion_de_parametros)
- Moya, L. C. (30 de jun de 2015). CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE MADERA ASERRADA DE PINOS CULTIVADOS EN URUGUAY. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(3), 597-612. doi:10.4067/S0718-221X2015005000053
- Namari, S. D. (14 de julio de 2021). Mechanical properties of compressed wood. (M. C. Forde, Ed.) *Construction and Building Materials*(301). doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124269

- Nogueira, M. C. (enero a junio de 2018). Caracterización físico-mecánica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* para uso estructural proveniente de Restinga, Brasil. *Revista Forestal del Perú*, 33(1), 52-62. doi:10.21704/rfp.v33i1.1155
- Nogueira, M. C. (enero a junio de 2018). Caracterización físico-mecánica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* para uso estructural proveniente de Restinga, Brasil. *Revista Forestal del Perú*, 33(1), 52-62. doi:10.21704/rfp.v33i1.1155
- Pascual Trillo, J. A. (13 de julio de 2011). Ciencia, Tecnología y Sostenibilidad. *GPT. GESTIÓN DE LAS PERSONAS Y TECNOLOGÍA*.(11), 74-83. Obtenido de <https://www.revistagpt.usach.cl/es>
- Pérez Caballero, A. P. (10 de mayo de 2018). *Gobierno de México & CONAHCYT ECOSUR REPOSITORIO*. Obtenido de Caracterización física y mecánica de la madera de dos variedades de *Ochroma pyramidale* provenientes de Lacanjá Chansayab, Chiapas.: <http://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1017/2079>
- Pérez-Peña, N. e. (2011). PREDICCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LA MADERA EN FUNCIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE LA PARED CELULAR Y VARIABLES AMBIENTALES. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 13(3), 253-266. doi:DOI 10.4067/S0718-221X2011000300002
- Piekarski, C. D. (october de 2016). Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. (D. Barcelo, Ed.) *Science of the Total Environment*.(575), 103-111. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.10.007
- Pimienta De la Torre, D. d. (2018). Densidad básica de la madera de *Pinus ayacahite* var. *Veitchii* Shaw en Chiapas, México. *AIA AVANCES EN INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA*, 22(3), 7-15. Obtenido de AIA: <http://ww.ucol.mx/revaia/portal/pdf/2018/sept/1.pdf>
- Profile forming of pre-pressed wood-strand preforms. (29 de November de 2012). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Part A*(46), 131-139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.11.003>

RAE, R. A. (08 de enero de 2023). *Diccionario de la lengua española*, 23ª. ed. Obtenido de REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, REA.es: <https://dle.rae.es/contenido/cita>

Rametsteiner, E. (2022). *COMITÉ FORESTAL. El estado de los bosquesw del mundo 2022: Vías forestales hacia la recuperación verde y la creación de economías inclusivas, resilientes y sostenibles*. Roma: fao.org. Obtenido de <https://www.fao.org/3/nj873es/nj873es.pdf>

Rangel, L. M. (2017). PROPIEDADES DE TABLEROS AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS FABRICADOS CON MADERA DE *Eucalyptus urophylla*. *Maderas. Ciencia y tecnología.*, 19(3), 373-386. doi:10.4067/S0718-221X2017005000032

Rao, S. S. (2004). *THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING* (fourth ed.). Miami: Elsevier Science & Technology Books.

Redacción. (01 de diciembre de 2021). *La falta de recursos amenaza la producción de palets de madera*. Obtenido de EL MUNDO FINANCIERO.COM.: <https://www.elmundofinanciero.com/noticia/98289/empresas/la-falta-de-recursos-amenaza-la-produccion-de-palets-de-madera.html>

Rodríguez, C. V. (2008). Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus canariensis* crecido en el secano de la Región del Maule, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 29(3), 192-196. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002008000300002>

Sanchis, A. (22 de abril de 2021). *La gran fiebre de la madera: sus precios se han disparado y no hay suficiente para todo el mundo*. Obtenido de magnet.: <https://magnet.xataka.com/en-diez-minutos/gran-fiebre-madera-sus-precios-se-han-disparado-no-hay-suficiente-para-todo-mundo>

Schmidt, J. K. (2009). Models for numerical failure analysis of wooden structures. *Engineering Structures*, 31(2), 571-579. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.11.001>

Seeber, F. K.-S. (5 de January de 2023). A numerical strength prediction approach for wood using element-wise local fiber directions from laser scanning. *Materials & Design*, 226(111578), 11. doi:10.1016/j.matdes.2022.111578

- Silvia-Arredondo, F. M.-C. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 77-88. Recuperado el 06 de 10 de 2022, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-04712012000100006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712012000100006&lng=es&tlng=es)
- Sotomayor Castellanos, J.-R. (01 de 06 de 2005). *Investigación e Ingeniería de la Madera. Características mecánicas y clasificación de 150 especies de maderas Mexicanas*. Obtenido de [researchgate.net: researchgate.net/publication/260752809\\_Caracteristicas\\_mecanicas\\_y\\_clasificacion\\_de\\_150\\_especies\\_de\\_maderas\\_Mexicanas/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/260752809_Caracteristicas_mecanicas_y_clasificacion_de_150_especies_de_maderas_Mexicanas/citation/download)
- Taghiyari, H. R. (septiembre. de 2015.). Effects of nano-wollastonite on physical and mechanical properties of medium-density fiberboard. *Maderas, Ciencia y tecnología.*, v.17(4), 833-842. doi:10.4067/S0718-221X2015005000072
- Tao, J. T. (march de 2023). Wood biomimetics: Capturing and simulating the mesoscale complexity of willow using cross-correlation reconstruction algorithm and 3D printing. *Materials & Design*, 228(111812). doi:doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111812.
- TECNO. (20 de septiembre de 2021). *Uso de internet aumentó en 2021 debido a la pandemia por covid-19*. Obtenido de [infobae: https://www.infobae.com/tecnologia/2021/09/21/uso-de-internet-aumento-en-2021-debido-a-la-pandemia-por-covid-19/](https://www.infobae.com/tecnologia/2021/09/21/uso-de-internet-aumento-en-2021-debido-a-la-pandemia-por-covid-19/)
- The social-economic impact of COVID-19 pandemic: implications for potencial forest degradation. (4 de junio de 2020). *Heliyon*, 6, 1-10. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e05354
- Tsai, S. W. (1971). A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. *J. COMPOSITE MATERIALS*, 5, 58-80.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2022). *Report on the technical assessment of the proposed forest reference emission level of Mexico submitted in 2020*. General. Recuperado el 16 de abril de 2023, de [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/tar2020\\_MEX.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/tar2020_MEX.pdf)

- Vázquez, M. L. (2001). *EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS aplicado al análisis estructural*. Madrid: Noela.
- Wang, Y. Y. (29 de November de 2012). Profile forming of pre-pressed wood-strand preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.*, Part A(46), 131-139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.11.003>
- we are social. (27 de april de 2023). *THE GLOBAL STATE OF DIGITAL IN APRIL 2023*. Recuperado el abril de 2023, de ESSENTIAL DIGITAL STATS FOR APRIL 2023: <https://wearesocial.com/uk/blog/2023/04/the-global-state-of-digital-in-april-2023/>
- Yang, I. A.-g.-Y. (2009.). Adhesives formulated with chemically modified okara and phenol–resorcinol–formaldehyde for bonding fancy veneer onto high-density fiberboard. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.(15), 398-402. doi:[doi:10.1016/j.jiec.2008.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2008.12.005)
- Yuce, B. M. (13 de Mayo de 2014). Neural network design and feature selection using principal component analysis and Taguchi method for identifying wood veneer defects. *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 291-308. doi:<https://doi.org/10.1080/21693277.2014.892442>
- Zienkiewicz, O. T. (1994). *EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS*. (Cuarta ed., Vol. I). (M. J. Norte, Ed.) Barcelona., España.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A. Recuperado el 2023
- Zienkiewicz, O. T. (1995). *EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. Volumen 2: Mecánica de Sólidos y Fluidos. Dinámica y No Linealidad* (Vol. II). (M. J. Norte, Ed.) Madrid, España: McGRAW-HILL/INTERNAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.

# ANEXOS

## ANEXO 1. Nomenclatura empleada en el análisis de Elemento Finito

M. Autengruber, M. Lukacevic, C. Gröstlinger et al.

Construction and Building Materials 271 (2021) 121775

| Nomenclature               |                                                                                                    |                              |                                                                                               |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$                   | thermal expansion coefficient (1/K)                                                                | $p_{v,air}$                  | water vapor pressure (Pa)                                                                     |
| $\beta$                    | moisture expansion coefficient (%/%)                                                               | $\rho_{H_2O}$                | density of water ( $\text{kg m}^{-3}$ )                                                       |
| <b>C</b>                   | elasticity tensor (MPa)                                                                            | $\rho_{cwm}$                 | density of dry cell wall material ( $\text{kg m}^{-3}$ )                                      |
| $\rho_d$                   | density of dry wood ( $\text{kg m}^{-3}$ )                                                         | $f_{lum}$                    | volume fraction of the lumen ( )                                                              |
| <b><math>D_b</math></b>    | diffusion tensor for bound water ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )                                    | <b>K</b>                     | conductivity tensor ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )                                       |
| <b><math>D_{br}</math></b> | diffusion tensor for bound water (Soret effect) ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) | <b><math>K_\theta</math></b> | directional coefficient tensor for conductivity ( )                                           |
| $E_b$                      | activation energy of bound water ( $\text{J mol}^{-1}$ )                                           | $c_{p_s}$                    | specific isobaric heat capacity of solid material matrix ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) |
| $R$                        | universal gas constant ( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )                                       | $h_v$                        | enthalpy of water vapor ( $\text{J kg}^{-1}$ )                                                |
| <b><math>D_v</math></b>    | diffusion tensor for water vapor ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )                                    | $\bar{h}_b$                  | enthalpy of bound water ( $\text{J kg}^{-1}$ )                                                |
| $\xi$                      | reduction factor tensor due to the cellular structure of wood ( )                                  | $\bar{h}_b$                  | average enthalpy of bound water ( $\text{J kg}^{-1}$ )                                        |
| $M_{H_2O}$                 | molar mass of water ( $\text{g mol}^{-1}$ )                                                        | $\varphi$                    | relative humidity ( )                                                                         |
| $p_{atm}$                  | atmospheric air pressure (Pa)                                                                      | $X_{b,eq}$                   | equilibrium MC ( )                                                                            |

Fuente: (Autengruber, 2020)

SECCIÓN A-A

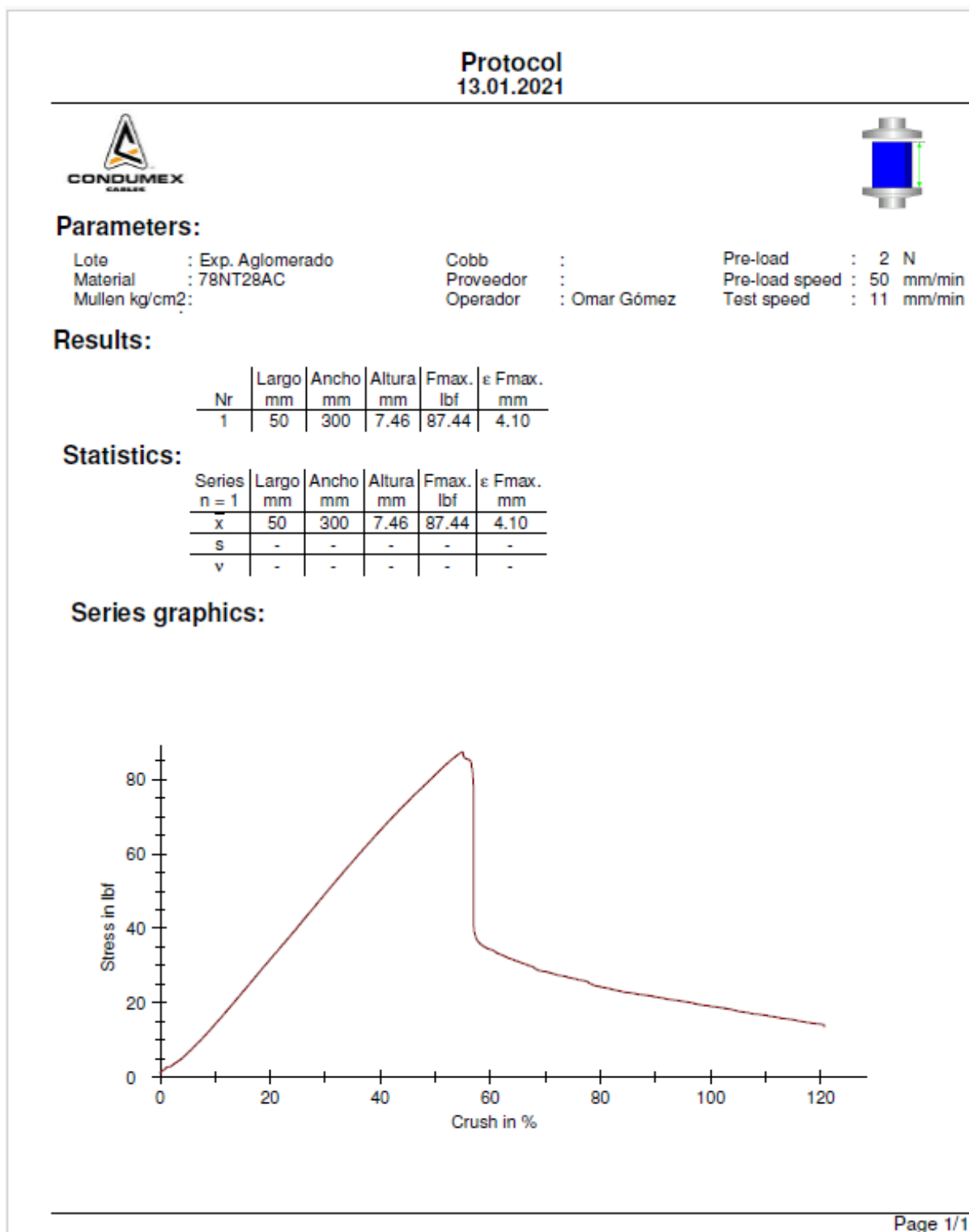
SECCIÓN C-C

MATERIAL COMPUESTO  
-VISTAS-  
A3

| DATOS GENERALES |               |        |          | DATOS TÉCNICOS |               |        |          | DATOS DE FABRICACIÓN |               |        |          |
|-----------------|---------------|--------|----------|----------------|---------------|--------|----------|----------------------|---------------|--------|----------|
| ITEM            | DESCRIPCIÓN   | UNIDAD | CANTIDAD | ITEM           | DESCRIPCIÓN   | UNIDAD | CANTIDAD | ITEM                 | DESCRIPCIÓN   | UNIDAD | CANTIDAD |
| 1               | SECCION A-A   |        |          | 1              | SECCION C-C   |        |          | 1                    | SECCION D-D   |        |          |
| 2               | SECCION E-E   |        |          | 2              | SECCION F-F   |        |          | 2                    | SECCION G-G   |        |          |
| 3               | SECCION H-H   |        |          | 3              | SECCION I-I   |        |          | 3                    | SECCION J-J   |        |          |
| 4               | SECCION K-K   |        |          | 4              | SECCION L-L   |        |          | 4                    | SECCION M-M   |        |          |
| 5               | SECCION N-N   |        |          | 5              | SECCION O-O   |        |          | 5                    | SECCION P-P   |        |          |
| 6               | SECCION Q-Q   |        |          | 6              | SECCION R-R   |        |          | 6                    | SECCION S-S   |        |          |
| 7               | SECCION T-T   |        |          | 7              | SECCION U-U   |        |          | 7                    | SECCION V-V   |        |          |
| 8               | SECCION W-W   |        |          | 8              | SECCION X-X   |        |          | 8                    | SECCION Y-Y   |        |          |
| 9               | SECCION Z-Z   |        |          | 9              | SECCION AA-AA |        |          | 9                    | SECCION BB-BB |        |          |
| 10              | SECCION CC-CC |        |          | 10             | SECCION DD-DD |        |          | 10                   | SECCION EE-EE |        |          |
| 11              | SECCION FF-FF |        |          | 11             | SECCION GG-GG |        |          | 11                   | SECCION HH-HH |        |          |
| 12              | SECCION II-II |        |          | 12             | SECCION JJ-JJ |        |          | 12                   | SECCION KK-KK |        |          |
| 13              | SECCION LL-LL |        |          | 13             | SECCION MM-MM |        |          | 13                   | SECCION NN-NN |        |          |
| 14              | SECCION OO-OO |        |          | 14             | SECCION PP-PP |        |          | 14                   | SECCION QQ-QQ |        |          |
| 15              | SECCION RR-RR |        |          | 15             | SECCION SS-SS |        |          | 15                   | SECCION TT-TT |        |          |
| 16              | SECCION UU-UU |        |          | 16             | SECCION VV-VV |        |          | 16                   | SECCION WW-WW |        |          |
| 17              | SECCION XX-XX |        |          | 17             | SECCION YY-YY |        |          | 17                   | SECCION ZZ-ZZ |        |          |
| 18              | SECCION AA-AA |        |          | 18             | SECCION BB-BB |        |          | 18                   | SECCION CC-CC |        |          |
| 19              | SECCION DD-DD |        |          | 19             | SECCION EE-EE |        |          | 19                   | SECCION FF-FF |        |          |
| 20              | SECCION GG-GG |        |          | 20             | SECCION HH-HH |        |          | 20                   | SECCION II-II |        |          |
| 21              | SECCION JJ-JJ |        |          | 21             | SECCION KK-KK |        |          | 21                   | SECCION LL-LL |        |          |
| 22              | SECCION MM-MM |        |          | 22             | SECCION NN-NN |        |          | 22                   | SECCION OO-OO |        |          |
| 23              | SECCION PP-PP |        |          | 23             | SECCION QQ-QQ |        |          | 23                   | SECCION RR-RR |        |          |
| 24              | SECCION SS-SS |        |          | 24             | SECCION TT-TT |        |          | 24                   | SECCION UU-UU |        |          |
| 25              | SECCION VV-VV |        |          | 25             | SECCION WW-WW |        |          | 25                   | SECCION XX-XX |        |          |
| 26              | SECCION YY-YY |        |          | 26             | SECCION ZZ-ZZ |        |          | 26                   | SECCION AA-AA |        |          |
| 27              | SECCION BB-BB |        |          | 27             | SECCION CC-CC |        |          | 27                   | SECCION DD-DD |        |          |
| 28              | SECCION EE-EE |        |          | 28             | SECCION FF-FF |        |          | 28                   | SECCION GG-GG |        |          |
| 29              | SECCION HH-HH |        |          | 29             | SECCION II-II |        |          | 29                   | SECCION JJ-JJ |        |          |
| 30              | SECCION KK-KK |        |          | 30             | SECCION LL-LL |        |          | 30                   | SECCION MM-MM |        |          |
| 31              | SECCION NN-NN |        |          | 31             | SECCION OO-OO |        |          | 31                   | SECCION PP-PP |        |          |
| 32              | SECCION QQ-QQ |        |          | 32             | SECCION RR-RR |        |          | 32                   | SECCION SS-SS |        |          |
| 33              | SECCION TT-TT |        |          | 33             | SECCION UU-UU |        |          | 33                   | SECCION VV-VV |        |          |
| 34              | SECCION WW-WW |        |          | 34             | SECCION XX-XX |        |          | 34                   | SECCION YY-YY |        |          |
| 35              | SECCION ZZ-ZZ |        |          | 35             | SECCION AA-AA |        |          | 35                   | SECCION BB-BB |        |          |
| 36              | SECCION CC-CC |        |          | 36             | SECCION DD-DD |        |          | 36                   | SECCION EE-EE |        |          |
| 37              | SECCION FF-FF |        |          | 37             | SECCION GG-GG |        |          | 37                   | SECCION HH-HH |        |          |
| 38              | SECCION II-II |        |          | 38             | SECCION JJ-JJ |        |          | 38                   | SECCION KK-KK |        |          |
| 39              | SECCION LL-LL |        |          | 39             | SECCION MM-MM |        |          | 39                   | SECCION NN-NN |        |          |

Fuente: *Elaboración propia. Vistas de la probeta de estudio.*

### ANEXO 3. Reporte de prueba mecánica de tensión a MDF.



Fuente: *Elaboración propia. Adaptado del reporte del protocolo de LMP, CONDUMEX.*

## ANEXO 4. Reporte de prueba mecánica de tensión a duela de pino.

### Protocol

07.09.2021



### Parameters:

Lote : Experimental      Proveedor: Comavime  
Material : Duelas DELGADAS      Operador : José Lara  
Pre-load : 2 N  
Pre-load speed : 50 mm/min  
Test speed : 11 mm/min

### Results:

| Nr | Largo<br>mm | Ancho<br>mm | Fmax.<br>lbf | ε Fmax.<br>mm |
|----|-------------|-------------|--------------|---------------|
| 1  | 400         | 85          | 303.51       | 16.86         |
| 2  | 400         | 85          | 297.23       | 15.94         |

### Statistics:

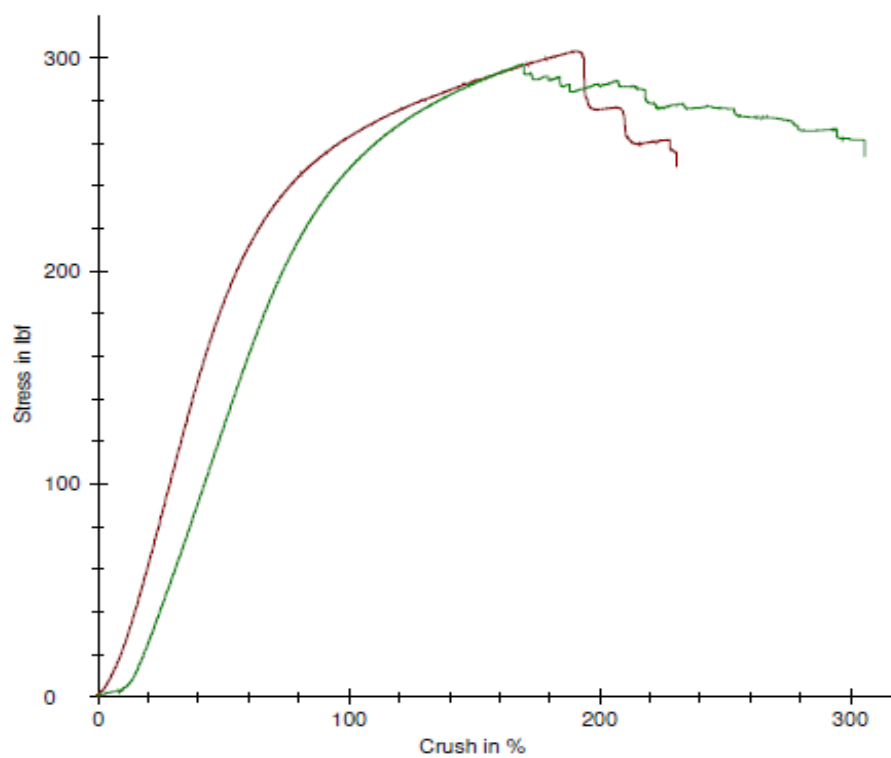
| Series<br>n = 2 | Largo<br>mm | Ancho<br>mm | Altura<br>mm | Fmax.<br>lbf | ε Fmax.<br>mm |
|-----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| $\bar{x}$       | 400         | 85          | 9.11         | 300.37       | 16.40         |
| s               | 0.000       | 0.000       | 0.42         | 4.44         | 0.65          |
| v               | 0.00        | 0.00        | 4.62         | 1.48         | 3.98          |

## ANEXO 5. Gráfica de prueba mecánica de tensión a duela de pino

Protocol

07.09.2021

Series graphics:



Fuente: *Elaboración propia. Adaptado del reporte del protocolo de LMP, CONDUMEX.*

## ANEXO 6. Cotización de solución para Modelado 3D SOLIDWORKS.



Querétaro, QRO, a 17 de noviembre de 2023

### Propuesta de Soluciones para el Modelado y la Validación de Gemelos Digitales de Empaques.

**GRUPO CONDUMEX – Cometel SJR,**  
Apreciable Alfredo Avendaño,

DMD está encantado de presentar la siguiente propuesta a **CONDUMEX SJR** esta propuesta refleja nuestro entendimiento y define un paquete de licenciamiento y entrenamiento que resuelve sus necesidades, en caso de no reflejar sus requerimientos, DMD esta encantado de revisarla para alinearla de acuerdo con sus expectativas.

#### 1. Antecedentes.

**GRUPO CONDUMEX** es una empresa que se dedica al desarrollo de servicios de ingeniería de Calidad en el Ámbito Automotriz. Actualmente es cliente de DMD en sus plantas de Qro y GDL además del CIDECE de nuestra Brand de SOLIDWORKS. Su planta CONDUTEL se dedica al desarrollo de Fibra y Cable para diferentes industrias y se encuentra con retos en el desarrollo y optimización de empaques de sus productos.

La siguiente propuesta profundiza en la una solución de Dassault Systemes que permita al equipo de Diseño de Producto Evaluar y Garantizar la estructura, diseño y calidad de diferentes tipos de empaques y su transporte para eliminar inconvenientes en las entregas finales de producto junto con el entrenamiento necesario para desarrollar los fenómenos de validación y obtener el máximo rendimiento a la inversión de CONDUTEL con las soluciones de Dassault Systèmes.

#### 2. Enfoque y Objetivos.

El objetivo principal de nuestra relación y esta propuesta es habilitar a CONDUTEL a realizar diseño de empaque y la simulación de los fenómenos de Resistencias Mecánicas y su comportamiento dentro de la suite de SOLIDWORKS y SIMULIA y entrenar a los Ingenieros de Productos en el uso de las Soluciones para garantizar el máximo aprovechamiento de las funcionalidades a nivel profesional.

#### 3. ¿Por qué debería COMETEL elegir a DMD o Vías3d Co.?

- La **#ExperienciaDMD** garantiza obtener el mejor servicio de Postventa en el mercado para resolución de situaciones técnicas y de uso de tu solución.
- Somos el Value Added Reseller de **SOLIDWORKS** **mas** grande y más preparado técnicamente en México, con más de 13 ingenieros elite a tu servicio, el máximo grado de certificación para un proveedor de servicio.
- Contamos con el máximo nivel de satisfacción con nuestro equipo ELITE de SOPORTE y Experiencia del Cliente.
- Tenemos certificaciones de servicio platino otorgado por SOLIDWORKS en todos los dominios de soluciones (CAD, gestión Documental, Validación, Manufactura, Mkt).



Diseño y Manufactura Digital, S. de R.L. de C.V.  
800 DMD HELP | 800 363-4357 | dmd.com.mx



#### 4. Propuesta.

##### 4.1 Descripción.

| Lote                                                                             | Cant | Descripción                                                                                                                                                                                                                                    | Precio Por Lote  | Precio                 |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------|
| <b>MODSIM para Gemelos Digitales</b>                                             |      |                                                                                                                                                                                                                                                |                  |                        |
| Paquete de Diseño y Validación MODSIM.<br>Que incluye:                           |      |                                                                                                                                                                                                                                                |                  |                        |
| 1                                                                                | 1    | 1 SOLIDWORKS Professional with Cloud Services.<br>1 3DEXPERIENCE Structural Designer.<br>24 meses de servicio.                                                                                                                                 | \$17,130.00      | <del>\$17,130.00</del> |
| <b>Servicio Recomendado para la implementación</b>                               |      |                                                                                                                                                                                                                                                |                  |                        |
| Entrenamiento de Alto Rendimiento "Modelado para la Simulación",<br>Que incluye: |      |                                                                                                                                                                                                                                                |                  |                        |
| 1                                                                                | 1    | 24 hrs de entrenamiento presencial en 3 días en las instalaciones de<br>CONDUMEX SJR.<br>8 hrs de consultoría para la construcción y caracterización de estudios de<br>validación.<br>Soporte remoto para el aprovechamiento de las soluciones | \$5,100.00       | <del>\$5,100.00</del>  |
| <b>Beneficios incluidos</b>                                                      |      |                                                                                                                                                                                                                                                |                  |                        |
| 2                                                                                | 1    | Servicio DMD Bussiness Advanced<br>Se detalla en tabla inferior (Anexo 1)                                                                                                                                                                      | \$999.00         | Gratis                 |
|                                                                                  |      |                                                                                                                                                                                                                                                | \$18,129.00      | <del>\$18,129.00</del> |
|                                                                                  |      |                                                                                                                                                                                                                                                | Subtotal USD     | <del>\$18,129.00</del> |
|                                                                                  |      |                                                                                                                                                                                                                                                | I.V.A. USD       | <del>\$1,812.90</del>  |
|                                                                                  |      |                                                                                                                                                                                                                                                | Total USD        | <del>\$19,941.90</del> |
|                                                                                  |      |                                                                                                                                                                                                                                                | Usted Ahorra USD | <del>\$19,941.90</del> |

##### 4.2 ¿Por qué la solución 3DEXPERIENCE Structural Designer?

Esta solución nos permitirá evaluar y emular los siguientes escenarios y fenómenos para la creación de Gemelos Digitales de las diferentes situaciones que generan fallas en nuestro empaque y su transporte:

1. Análisis de resistencia mecánica.
2. Análisis de optimización del diseño: reducción de espesores.
3. Análisis de frecuencias: determinación de modos de resonancia.
4. Determinación de la mejor versión del diseño.