



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS:

“ESTUDIO DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE UNA MATRIZ POLIMÉRICA
CON REFUERZOS DE FIBRA DE VIDRIO EMPLEADO EN ÁLABES DE
PEQUEÑOS AEROGENERADORES”

Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica

Presenta:

Ing. Arianna Basto Martínez

Director de Tesis

Dr. Juan Felipe Soriano Peña

Co-director

MsC. Víctor López Garza

Morelia, Mich. Febrero 2020



Pensamiento

“Nada tiene tanto poder para ampliar la mente como la capacidad de investigar de forma sistemática y real todo lo que es susceptible de observación en la vida”.

Marco Aurelio

Dedicatoria

*A mi pequeña princesa, mi **amada hija**, la luz de mi vida, el tesoro más grande que Dios y la vida me dio. Tú que me das las fuerzas y la confianza de que mañana será un día mejor, tú que con una cálida sonrisa o travesura llenas mi vida de alegría y amor, a ti mi eterno amor, a quién amo más que infinito;*

*A mi **esposo** por brindarme su amor y apoyo siempre, por darme la confianza y el aliento para continuar, por ser mi guía y ejemplo a seguir, por corregir mis errores, a ti mi amor;*

*A mi **madre**, por ser mi amiga y compañera inseparable, por haberme forjado como una mujer de bien, por servirme de guía cuando apenas no podía abrir los ojos, por comprenderme y mostrarme las cosas positivas de los errores, . . . , por brindarme todo su amor,*

*A **padre** por darme la vida, por toda la educación que me dio y por forjarme como la mujer que hoy soy;*

*A mis **hermanas** por siempre estar conmigo cuando más las necesitaba,*

*A mis **abuelitos** por siempre brindarme su eterno amor,*

*A mis **sobrinas** por iluminar el alma con sus más inocentes ocurrencias,*

*A toda mi **familia**, por permanecer siempre unida en cada momento de la vida,*

Les dedico estas líneas que quedaran plasmadas por siempre

Agradecimientos

Siempre al imaginar este momento, me perdía en mis pensamientos tratando de enumerar al sin fin de personas a las cuales quería agradecer. Hoy que estoy aquí, he llegado a la reflexión que aquellas personas a las cuales he de dar las gracias no les importaría quedar plasmados en un papel, sino en el corazón de esta joven que, aunque el mundo termine nunca dejará de pensarlos.

Les doy las gracias:

A mi esposo e hija por apoyarme siempre y ser mi inspiración;

A mi familia de forma general, por estar siempre ahí para mí a pesar de la distancia;

A mis amistades y a sus opuestos;

A mi asesor el Dr. Juan Felipe Soriano Peña, por brindarme siempre su ayuda desinteresada, sus conocimientos, dedicarme su tiempo y darme siempre aliento y todo su apoyo en el logro de la investigación,

Al M.C. Víctor López Garza, primeramente, como coordinador en el momento de mi proceso de admisión al posgrado, por siempre apoyarme, orientarme y darme la oportunidad de ser parte de este gran colectivo. Y segundo como co-asesor, por siempre brindarme todo su apoyo, sus conocimiento y tiempo para el logro de la investigación;

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial a los profesores, trabajadores y compañeros del posgrado de Ingeniería Mecánica, que me han brindado su apoyo y educación,

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que nos brinda a todos los estudiantes en investigación.

Al Gobierno Mexicano y a México en general, por darme esta oportunidad y abrirme sus puertas.

*A Dios por darme la confianza en mí misma y la fe en que siempre hay un mañana mejor,
A todos, cada uno conociendo el lugar que le corresponde en la culminación de esta etapa
estudiantil, en mi vida y en mi corazón,*

Gracias.

RESUMEN

Actualmente, es infinita la lista de aplicaciones que tienen los materiales compuestos en diferentes procesos industriales. Su empleo en la fabricación de álabes para aerogeneradores, podría citarse como una de las mayores aplicaciones que tienen. En el presente trabajo, se plantea como objetivo estudiar el comportamiento, mediante el análisis estructural, de un material compuesto por una matriz de resina polimérica y refuerzos de fibra de vidrio, para su empleo en la fabricación de álabes de aerogeneradores de baja capacidad. Para dar cumplimiento al mismo, se desarrolla un estudio de fatiga, mediante el empleo de una máquina de alta frecuencia y un equipo a baja frecuencia. Se diseña la geometría de las probetas y se define el tipo de ensayo a realizar teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la normativa ASTM D3039/D3039M. Además, se definen los valores de cargas necesarias para lograr los esfuerzos medios sobre las probetas, así como los valores máximos y mínimos al aplicar la variación de las cargas en las máquinas de fatiga, mediante el empleo del software SolidWorks. Y finalmente, dada las condiciones de contorno sujetas a la investigación, se valida mediante la simulación de una sección del álabe de un aerogenerador, la aplicación del material en la fabricación de dichas estructuras.

Palabras claves: resina polimérica, fibra de vidrio, material compuesto, álabes, fatiga, análisis estructural.

ABSTRACT

Currently, the list of applications that have composite materials in different industrial processes is infinite. Its use in the manufacture of blades for wind turbines could be cited as one of the greatest applications they have. In this paper, the objective is to study the behavior, through structural analysis, of a material composed of a matrix of polymeric resin and fiberglass reinforcements, for use in the manufacture of blades of low-capacity wind turbines. To comply with it, he develops a fatigue study, using a high frequency machine and a low frequency equipment. Design the geometry of the probes and define the type of test to be carried out taking into account the parameters established in ASTM D3039 / D3039M. In addition, the values of the loads necessary to achieve the efforts of the devices on the probes can be modified, as well as the maximum and minimum values when applying the variation of the loads on the fatigue machines, by using the SolidWorks software. And finally, given the boundary conditions subject to the investigation, the application of the material in the manufacture of various structures is validated by simulating a segment of blades of a wind turbine.

Keywords: polymeric resin, fiberglass, composite material, blades, fatigue, structural analysis.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 1 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 4 |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | 5 |
| NOMENCLATURA | 6 |
| INTRODUCCIÓN..... | 9 |
| OBJETIVO GENERAL | 10 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 10 |
| HIPÓTESIS..... | 10 |
| JUSTIFICACIÓN | 10 |
| CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO PRÁCTICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN | 12 |
| 1.1 Teoría de los Aerogeneradores | 13 |
| 1.1.1 Tipologías de turbinas eólicas..... | 14 |
| 1.1.1.1 Clasificación según el tipo de rotor eólico y la disposición de su eje de giro . | 14 |
| 1.1.1.1.1 Rotores de eje vertical | 14 |
| 1.1.1.1.2 Rotores de eje horizontal..... | 16 |
| 1.1.1.2 Clasificación de los aerogeneradores según potencia suministrada | 17 |
| 1.1.2 Aerogeneradores de baja potencia | 18 |
| 1.1.2.1 Instalaciones aisladas a la red eléctrica | 18 |
| 1.1.3 Partes de un aerogenerador | 20 |
| 1.1.4 Aspas de un aerogenerador..... | 21 |
| 1.1.4.1 Diseño óptimo de la pala | 22 |
| 1.1.4.1.1 Coeficiente de potencia | 22 |
| 1.1.4.1.2 Factor de actividad | 23 |
| 1.1.4.2 Tecnología de las aspas. Geometría | 24 |
| 1.1.4.3 Materiales empleados en el diseño de aspas de aerogeneradores..... | 26 |
| 1.2 Teoría de los Materiales Compuestos | 28 |
| 1.2.1 Generalidades..... | 28 |
| 1.2.2 La Fibras de vidrio como material de refuerzo | 30 |

| | |
|---|----|
| 1.2.2.1 Tipos de fibra de vidrio | 30 |
| 1.2.2.2 Propiedades de la fibra de vidrio | 31 |
| 1.2.2.3 Obtención de fibras de vidrio | 32 |
| 1.2.3 Resina poliéster | 32 |
| 1.2.3.1 Forma de obtención de la resina poliéster..... | 33 |
| 1.2.3.2 Características de la resina poliéster..... | 33 |
| 1.2.4 Matriz polimérica | 34 |
| 1.2.4.1 Funciones de la matriz polimérica | 34 |
| 1.2.5 Materiales compuestos de polímero reforzado con fibra..... | 35 |
| 1.2.5.1 Constituyentes de los materiales compuestos reforzados con fibras | 35 |
| 1.2.6 Plástico reforzado con fibra de vidrio | 36 |
| 1.2.6.1 Fabricación del compuesto..... | 37 |
| 1.2.7 Estructuras textiles | 38 |
| 1.2.7.1 Filtros (mats)..... | 38 |
| 1.2.7.2 Sistemas no mallados..... | 39 |
| 1.2.7.2.1 Tejidos | 39 |
| 1.2.7.2.2 Ensamblados..... | 40 |
| 1.2.7.2.3 Trenzados..... | 41 |
| 1.2.7.3 Mallados y encadenados | 42 |
| 1.2.8 Propiedades de los polímeros reforzados con fibra | 43 |
| 1.3 Referencias básicas sobre la teoría de falla por fatiga de materiales compuestos | 45 |
| 1.3.1 Antecedentes de la falla por fatiga | 45 |
| 1.3.2 Fatiga en polímeros reforzados con fibras de vidrio..... | 47 |
| 1.3.2.1 Generalidades sobre la degradación a fatiga de un laminado..... | 48 |
| 1.3.3 Modelos básicos para la predicción de Falla por Fatiga de PRF | 50 |
| 1.3.3.1 Modelos de vida a fatiga..... | 50 |
| 1.3.3.2 Modelos de estimación de la degradación de propiedades mecánicas..... | 55 |
| 1.3.3.2.1 Degradación de la resistencia a rotura | 55 |
| 1.3.3.2.2 Modelos de degradación de la rigidez | 56 |
| 1.3.4 Mecanismos de fallo por fatiga en materiales compuestos de matriz polimérica .57 | |
| 1.3.4.1 Fatiga por fallo térmico de compuestos poliméricos | 58 |
| 1.3.4.1.1 Consideraciones energéticas del comportamiento en fatiga | 59 |

| | |
|--|-----------|
| 1.3.4.2 Fallo por fatiga mecánica..... | 61 |
| CAPÍTULO 2. ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA EL DESARROLLO EXPERIMENTAL..... | 64 |
| 2.1 Técnicas de caracterización de los materiales compuestos | 64 |
| 2.1.1 Norma ASTM D3039: Método de prueba estándar para propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica | 66 |
| 2.2 Modelo numérico | 68 |
| 2.2.1 Modelos de elementos finitos (MEF)..... | 68 |
| 2.2.1.1 Pasos básicos en el método de elementos finitos | 68 |
| 2.2.1.2 Conceptos generales del MEF | 69 |
| 2.2.1.3 Principios generales aplicados a un continuo elástico..... | 72 |
| 2.2.1.3.1 Ecuaciones de equilibrio. Principio de los Trabajos Virtuales..... | 72 |
| 2.2.1.4 Funciones de interpolación..... | 74 |
| 2.2.1.5 Síntesis de las características globales | 75 |
| 2.2.1.6 Imposición de condiciones de contorno. Solución | 76 |
| 2.2.1.7 Métodos adaptativos..... | 76 |
| 2.3 Metodología..... | 77 |
| CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS..... | 78 |
| 3.1.1 Selección de los materiales constituyentes..... | 78 |
| 3.1.2 Fabricación y preparación de los moldes | 79 |
| 3.1.3 Fabricación de los materiales compuestos | 80 |
| 3.1.4 Preparación de las probetas | 81 |
| 3.1.5 Ensayos experimentales | 82 |
| 3.1.5.1 Determinación del módulo de elasticidad | 82 |
| 3.1.5.2 Ensayo de fatiga a alta frecuencia del material | 83 |
| 3.1.5.2.1 Simulación de la carga inicial ejercida al material | 83 |
| 3.1.5.2.2 Experimentación a alta frecuencia..... | 86 |
| 3.1.5.3 Ensayo de fatiga a baja frecuencia del material | 87 |
| 3.1.5.3.1 Determinación de los esfuerzos mediante el Software SolidWorks..... | 88 |
| 3.1.5.3.2 Parte experimental del ensayo de fatiga a baja frecuencia | 89 |
| 3.2 Simulación del comportamiento del material aplicado a un fragmento del álabe de un aerogenerador de baja potencia..... | 90 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.1 Condiciones de contorno impuestas en el modelo..... | 91 |
| 3.3 Resultados del estudio | 93 |
| CONCLUSIONES..... | 96 |
| RECOMENDACIONES..... | 98 |
| REFERENCIAS..... | 1 |
| ANEXOS..... | 1 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1-1. Estrategia seguida para la elaboración del marco teórico referencial de la investigación. Fuente Propia | 13 |
| Figura 1-2. Rotores de eje vertical a) Derrieus y b) Savonious) [9]. | 15 |
| Figura 1-3. Rotor multipala americano [9]..... | 16 |
| Figura 1-4. Rotor de eje horizontal tipo hélice (monopala, bipala y tripala) [9]. | 17 |
| Figura 1-5. Partes de un aerogenerador [14; 15]..... | 20 |
| Figura 1-6. Factor de actividad en un diseño óptimo en función de la velocidad específica de diseño [9]..... | 23 |
| Figura 1-7. Influencia de la geometría de las aspas en el coeficiente de potencia [9]..... | 24 |
| Figura 1-8. Forma geométrica de la punta de la pala [9]. | 26 |
| Figura 1-9. Clasificación de los materiales compuestos por la geometría del reforzante según lo referenciado en [29]..... | 29 |
| Figura 1-10. Dos tipos de fieltros, a) Fieltro de fibras cortas y b) Fieltro de fibras continuas [29]..... | 38 |
| Figura 1-11. Esquema genérico de un tejido [29]. | 39 |
| Figura 1-12. Esquemas de distintos tipos de tejidos: a) Tafetán, b) Sarga y c) Satén [29].. | 40 |
| Figura 1-13. Comparación de la estructura de un tejido y un ensamblado [29]. | 41 |
| Figura 1-14. Ejemplos de ensamblados: a) Unidireccional y b) biaxial [29]..... | 41 |
| Figura 1-15. Esquema de trenzado [29]. | 42 |
| Figura 1-16. a) Esquema de mallado, b) Esquema de encadenado [29]..... | 42 |
| Figura 1-17. Cronología de eventos en la investigación y los logros de fallas por fatiga [35]. | 46 |
| Figura 1-18. Aplicación al diseño del diagrama de vida constante en el plano $\sigma a - \sigma m$ según la regla lineal de Goodman S_{ut} en el eje horizontal es el límite de resistencia a tracción y S_e en el vertical es el límite de fatiga [47]..... | 51 |
| Figura 1-19. Carga cíclica típica de periodo T [47]. | 52 |
| Figura 1-20. La proyección $\sigma a - \sigma m$ (diagramas de vida constante) [35]. | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 1-21. Mecanismos de daño en compuestos. a) rotura de fibras, b) pandeo de fibra por esfuerzos de compresión, c) debonding d) agrietamiento en la matriz, e) delaminación [50]. | 55 |
| Figura 1-22. Esquema de degradación de resistencia a rotura (a medida que se dan los ciclos de fatiga, el momento en el que la resistencia residual se iguala al esfuerzo máximo aplicado ($S_{res} \leq S_{max}$) se da la rotura) [46]. | 56 |
| Figura 1-23. Esquema de degradación de rigidez (a medida que se dan los ciclos de fatiga, se pueden observar las tres fases de degradación) [46]. | 57 |
| Figura 1-24. Desfase entre las ondas de tensión y deformación [39]. | 60 |
| Figura 1-25. Diagrama tensión-deformación [39]. | 61 |
| Figura 2-1. Modos típicos de falla a fatiga y su codificación de acuerdo a la ASTM D3039 [58]. | 67 |
| Figura 2-2. Representación de las definiciones que influyen en un sistema a analizar por el MEF [61]. | 70 |
| Figura 2-3. Viga en voladizo con carga puntual en el extremo [61]. | 71 |
| Figura 2-4. Ejemplo de discretización de un dominio determinado [61]. | 71 |
| Figura 3-1. Resina poliéster PP – 250. Fuente Propia. | 78 |
| Figura 3-2. Fibra de vidrio: Petatillo FRD – 600. Fuente Propia | 79 |
| Figura 3-3. Etapas de la preparación de los Moldes a) Pegado de las dos partes de los moldes, b) Acabado final de los moldes. Fuente Propia. | 80 |
| Figura 3-4. Compuesto elaborado. Fuente Propia. | 81 |
| Figura 3-5. Probetas acabadas. Fuente Propia | 82 |
| Figura 3-6. Análisis de convergencia de malla de la probeta de material compuesto. Fuente Propia | 84 |
| Figura 3-7. Valores alternativos, medio y del intervalo del ciclo de esfuerzos invertido, repetido y fluctuante [35]. | 85 |
| Figura 3-8. Ensayo a Fatiga de un Material Compuesto por Fibras de Vidrio y Resina Poliéster en una Máquina de Alta Frecuencia. Fuente Propia. | 86 |
| Figura 3-9. Actuador de baja frecuencia. a) Diagrama funcional, b) Imagen del actuador. Fuente Propia | 87 |

Figura 3-10. Geometría de la probeta utilizada en el ensayo a fatiga a baja frecuencia. Fuente Propia 88

Figura 3-11. Análisis de convergencia de tensión von mises de la geometría final de la probeta. Fuente Propia 89

Figura 3-12. Agrietamiento como respuesta a la falla por fatiga mecánica. a) Vista frontal, b) Vista lateral. Fuente Propia 90

Figura 3-13. Análisis de convergencia de la tensión máxima de von mises de la sección del álabe. Fuente Propia 93

Figura 3-14. Efecto resultante del ensayo de fatiga a alta frecuencia en el equipo ultrasónico. Fuente Propia 94

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1-1. Características de los materiales empleados en la fabricación de aspas de aerogeneradores [9]. | 28 |
| Tabla 2-1. Normas ASTM para la caracterización de materiales compuestos [58]. | 64 |
| Tabla 2-2. Geometría recomendada de probetas de tensión [58]. | 67 |
| Tabla 3-1. Distribución en peso de los constituyentes de una probeta de material compuesto por fibra de vidrio y resina poliéster. Fuente Propia..... | 81 |
| Tabla 3-2. Resultados obtenidos del ensayo experimental. Fuente Propia | 82 |
| Tabla 3-3. Resultados obtenidos del estudio de carga –esfuerzo – deformación. Fuente Propia | 83 |
| Tabla 3-4. Datos obtenidos de la convergencia de malla de la geometría final de la probeta. Fuente Propia | 88 |
| Tabla 3-5. Datos obtenidos de la convergencia de malla de la sección analizada correspondiente al álabe. Fuente Propia | 92 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1. Ficha técnica de la Resina Poliéster PP-250..... | 1 |
| Anexo 2. Ficha técnica del Petatillo TRD-600 | 8 |
| Anexo 3. Ficha técnica de la Cera desmoldante | 10 |
| Anexo 4. Ficha técnica de la Película separadora..... | 12 |
| Anexo 5. Ficha técnica del Gel Coat..... | 21 |
| Anexo 6. Ficha técnica del Catalizador..... | 28 |
| Anexo 7. Desplazamiento máximo de la probeta para diferentes condiciones de carga. Fuente Propia | 1 |
| Anexo 8. Máxima tensión de von mises de la probeta para diferentes condiciones de carga. Fuente Propia | 2 |
| Anexo 9. Resultado del desplazamiento máximo de la geometría final de la probeta. Fuente Propia | 3 |
| Anexo 10. Resultado de la tensión máxima de von mises sobre la geometría final de la probeta, Fuente Propia | 4 |
| Anexo 11. Resultado del desplazamiento máximo de la sección del álabe. Fuente Propia .. | 5 |
| Anexo 12. Resultado de la tensión máxima de von mises de la sección del álabe. Fuente Propia | 6 |

NOMENCLATURA

| | |
|----------------|---------------------------------------|
| C_p | Coficiente de potencia |
| P_m | Potencia mecánica extraída del viento |
| P_v | Potencia del viento incidente |
| P | Potencia que atraviesa el área |
| A | Área |
| ρ | Densidad del aire |
| v | Velocidad del viento |
| λ | Velocidad específica |
| R | Radio de la pala |
| ω | Velocidad angular |
| σ_y | Límite elástico del material |
| E | Módulo de elasticidad |
| σ_a | Resistencia a la fatiga |
| V_f | Fracción volumétrica de la matriz |
| v_f | Fracción volumétrica de las fibras |
| v_c | Volumen total del compuesto |
| P_c | Propiedad del material compuesto |
| i | Componente |
| V_i | Fracción volumétrica |
| P_i | Propiedad |
| n | Muestra |
| N | Número de ciclos |
| B | Constante |
| σ_{max} | Esfuerzo o tensión máxima |
| σ_{min} | Esfuerzo o tensión mínimo |
| σ_a | Tensión alterna |
| σ_m | Tensión media |
| S_e | Límite de fatiga |
| S_{ut} | Límite de resistencia a tracción |

| | |
|---------------|---|
| S_{uc} | Límite de resistencia a compresión |
| R_e | Relación de esfuerzos |
| S_{res} | Resistencia residual |
| M | Pendiente de la línea de ajuste |
| $\sigma(t)$ | Tensión al tiempo |
| t | Tiempo |
| σ_0 | Valor de pico del ciclo de tensión |
| ω_0 | Frecuencia angular |
| ν_0 | Frecuencia de la sollicitación aplicada. |
| ε | Deformación |
| τ | Inversa de la frecuencia ν_0 , Período. |
| $\{N\}$ | Fuerzas de membrana, |
| $\{M\}$ | Momentos flectores |
| $\{Q\}$ | Fuerzas de cortante, |
| n | Número de capas en el laminado |
| h_l | Coordenada z de la interfase entre la l – ésima y la $(l + 1)$ – ésima capa. |
| c | Compuesto |
| f | Fibra |
| m | Matriz |
| f_v | Participación volumétrica de la fibra en el laminado |
| m_v | Participación volumétrica de la matriz en el laminado |

Unidad de medida

| | |
|----|-------------|
| s | segundo |
| m | metro |
| cm | centímetros |
| mm | milímetro |
| g | gramo |

| | |
|-----|-------------|
| Kg | kilogramo |
| W | watt |
| N | newton |
| KN | kilo Newton |
| in | pulgada |
| Pa | Pascal |
| MPa | Mega Pascal |

INTRODUCCIÓN

Actualmente la energía proveniente de fuentes renovables está jugando un papel muy importante en los sistemas modernos de producción de electricidad debido a la disponibilidad local del recurso, a la aceptación pública, a los beneficios que se proporcionan al medio ambiente y al incremento de los precios de los combustibles provenientes de fuentes fósiles [1; 2]. Una de las tecnologías que emplean fuentes renovables, con pronóstico creciente en el mercado, son los pequeños aerogeneradores o turbinas eólicas pequeñas; siendo denominados de esta forma, según la norma IEC-61400-2, aquellas turbinas cuya potencia es menor a los 50 *kW*.

El aspa de un aerogenerador, es el componente crítico en el funcionamiento de una turbina eólica, debe estar diseñada para aprovechar la máxima potencia disponible en el recurso eólico que actúa sobre ella y resistir las cargas aerodinámicas distribuidas a lo largo de su longitud [3]. La variedad y magnitud de cargas a las que se ven sometidas los álabes de un aerogenerador requieren de materiales que respondan a la complejidad planteada. La versatilidad de fabricación de los materiales compuestos, sus buenas propiedades estructurales, su alta rigidez y resistencia, su reducido peso, su gran comportamiento a la fatiga y propiedades como su baja dilatación térmica o su baja conductividad eléctrica, hacen de ellos una solución ideal para el desarrollo de los álabes de aerogeneradores.

La naturaleza anisótropa y heterogénea de los materiales compuestos les confiere un comportamiento marcadamente diferente al de los materiales estructurales convencionales [4]. Según estudios realizados los componentes estructurales construidos con materiales compuestos, en especial los materiales compuestos en base a resinas con fibras, poseen en general una mayor flexibilidad y por tanto son más deformables que sus alternativos realizados con materiales tradicionales tales como, los metálicos. Poseen distintos desafíos de modelación debido a la naturaleza del material, formados por múltiples capas con distintas propiedades físicas y químicas. Por ello, es conveniente conocer con detalle su comportamiento mecánico.

Con las herramientas correctas de simulación computacional y las pruebas experimentales realizadas a materiales compuestos, es posible prever el comportamiento de las estructuras de materiales compuestos y promover mejoras.

El presente trabajo recoge el diseño, la simulación y experimentación de una probeta de material compuesto con el objetivo de estimar su resistencia a la fatiga y de esta manera validar su aplicación futura en la fabricación de álabes de pequeñas turbinas eólicas.

Para ello, se plantea:

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la resistencia a la fatiga de una matriz polimérica con refuerzos de fibra de vidrio empleado en la fabricación de álabes de aerogeneradores de pequeña capacidad, valorando los principales parámetros de la vida a fatiga de un material.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Valorar el estado del arte en el conocimiento del límite de resistencia a la fatiga de materiales empleados en la fabricación de álabes de turbinas eólicas, verificando los aspectos que tienen mayor coincidencia con una matriz polimérica con refuerzos de fibra de vidrio.
2. Realizar el diseño de experimento para el estudio de la resistencia a la fatiga en una matriz polimérica con refuerzos de fibra de vidrio, empleado en álabes de aerogeneradores de pequeña capacidad de potencia.
3. Estimar la resistencia a la fatiga y, de ser posible, el límite de resistencia a la fatiga de una matriz polimérica con refuerzos de fibra de vidrio empleado en la fabricación de álabes para aerogeneradores de bajas capacidades de potencia para un número determinado de ciclos.

HIPÓTESIS

Partiendo de ensayos especializados es posible estimar la resistencia a la fatiga de una matriz polimérica con refuerzos de fibra de vidrio utilizado en la confección de álabes para aerogeneradores de baja capacidad de potencia, estableciendo el límite de resistencia a la fatiga.

JUSTIFICACIÓN

El estudio de resistencia a la fatiga de un nuevo material compuesto en base a resina polimérica con fibras de vidrio permite valorar los principales parámetros de la vida a fatiga

del mismo, y con ello validar su posible aplicación en la construcción de aspas para pequeñas turbinas eólicas.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO PRÁCTICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN

En la actualidad, es infinita la lista de reportes sobre el tema de materiales compuestos que existe, basta con realizar una búsqueda en Internet y se puede observar la enorme cantidad de información que existe al respecto; pero la gran paradoja, es que muchos de estos reportes, así como la bibliografía existente, no tratan sobre la cuestión del diseño de materiales compuestos, ni de su análisis estructural, sino más bien de cuestiones informativas y conceptuales de los mismos [5-7]. Es por ello que existe la necesidad de investigar cada día más sobre estos materiales, tanto la teoría como el diseño, sus propiedades físico-mecánicas y la resistencia a la fatiga de los mismos para su uso; en particular, su empleo en la fabricación de álabes para turbinas eólicas de pequeña capacidad, lo que contribuye con una de las metas que en la actualidad tienen los gobiernos a nivel mundial, eliminar las emisiones contaminantes, factor importante que repercute en el desarrollo y progreso de una sociedad.

Con la revisión de la literatura nacional e internacional, el presente capítulo se estructuró de forma tal que permitiera el análisis del estado del arte y de la práctica sobre la temática objeto de estudio, posibilitando así sentar las bases teóricas de la investigación. Este capítulo tiene como objetivo mostrar los principales resultados del estudio teórico realizado sobre la temática. Para ello, se presenta (*Figura 1-1*) el hilo conductor como estrategia del marco teórico práctico referencial, donde se contemplan diferentes tópicos sobre el tema de investigación, que van desde los orígenes, definiciones y conceptos, hasta los métodos actuales de investigación relacionado al estudio de fallas por fatiga en materiales compuestos y su aplicación a las aspas de turbinas eólicas.



Figura 1-1. Estrategia seguida para la elaboración del marco teórico referencial de la investigación.

Fuente Propia

1.1 Teoría de los Aerogeneradores

La fuerza que genera el aire en movimiento (viento) ha sido empleada desde hace siglos en distintos ámbitos, que van desde el transporte marítimo y aplicaciones agrícolas (molinos y bombas de agua), hasta la generación de energía eléctrica a gran escala.

La creciente preocupación por el cambio climático y la contaminación ha llevado al desarrollo y la mejora de las fuentes de energía renovables. Siendo la energía eólica la fuente renovable de más rápido crecimiento. Según predicciones del Consejo Mundial de la Energía (WEC), está última continuará su expansión en cualquiera de los escenarios de política dados hasta el año 2050 [3].

La energía eólica, tiene su origen en el movimiento de las masas de aire, es decir, el viento. Dispone de una tecnología madura, por lo que su explotación es técnica y económicamente viable, lo que la convierte en una alternativa de generación eléctrica rentable frente a las tradicionales (nuclear, carbón, petróleo y gas) [8].

Las modernas turbinas eólicas son sistemas capaces de transformar, de forma eficiente, la energía cinética contenida en el viento en energía mecánica en un eje. Esta energía se puede aprovechar, o bien directamente, en instalaciones aisladas para aplicaciones de bombeo o, como es más habitual, en sistemas de producción de energía eléctrica [9; 10].

Las aspas de rotores, de ventiladores y las aspas de aerogeneradores, son componentes estructurales que están sometidos a la acción de cargas dinámicas [11]. De Ahí, la necesidad de mayores exigencias de rigidez y resistencia a la fatiga de este elemento para su mayor rendimiento, reducción del tiempo de inactividad y mejora de la confiabilidad de las turbinas eólica. Por lo que se debe tener muy en cuenta en un diseño óptimo, la tecnología empleada y los materiales utilizados en su fabricación, siendo este último uno de los aspectos más importantes en el diseño y fabricación de álabes.

1.1.1 Tipologías de turbinas eólicas

Existe una gran cantidad de variables utilizadas mediante las cuales es posible hacer una clasificación de los aerogeneradores. Sin embargo, dos de ellas resultan las más apropiadas para el trabajo de tesis.

1.1.1.1 Clasificación según el tipo de rotor eólico y la disposición de su eje de giro

Las turbinas eólicas se pueden clasificar atendiendo al tipo de rotor eólico y la disposición de su eje de giro en turbinas con rotor de eje vertical y turbinas con rotor de eje horizontal.

1.1.1.1.1 Rotores de eje vertical

Las turbinas con rotores de eje vertical presentan tres ventajas fundamentales con respecto a las turbinas con eje horizontal. Una primera ventaja a citar es que la sujeción de las aspas en este tipo de turbinas es de fácil diseño y ejecución. No precisan ningún sistema de orientación activo para captar la energía contenida en el viento. Y una tercera ventaja, la de disponer el tren de potencia, el generador eléctrico y los sistemas de control, a nivel del suelo. De forma general podemos decir que el rendimiento de los aerogeneradores de eje vertical se encuentra por debajo de la mitad que el correspondiente a aerogeneradores de eje horizontal, hecho que ha dirigido la industria al desarrollo de esto últimos frente a los primeros.

Los diseños más conocidos de eje vertical son los rotores tipo Darrieus y los rotores tipo Savonius [9; 10].

➤ Rotores Darrieus

Los aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieus, deben su nombre a una patente americana de 1931 del ingeniero G.J.M. Darrieus, consta de dos o más aspas dispuestas como la forma que toma una cuerda sujeta por sus extremos y sometida a un movimiento giratorio, tal como se muestra en la Figura 1-2.a.

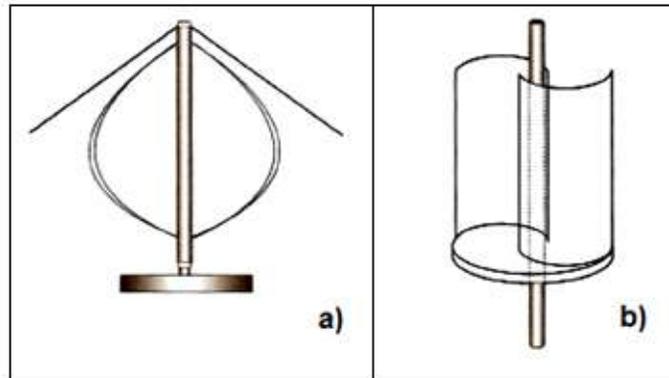


Figura 1-2. Rotores de eje vertical a) Darrieus y b) Savonius) [9].

Los principales inconvenientes de este diseño son la necesidad de monitorización debido a que los perfiles aerodinámicos y la simetría de las aspas no permiten el autoarranque. Otro inconveniente importante es la necesidad de utilizar tensores para garantizar la estabilidad estructural de la turbina.

A pesar de estos inconvenientes se llegaron a desarrollar a finales de los años 80, prototipos de 625 kW de potencia y 34 m de diámetro en los laboratorios Sandia/DOE. De manera comercial se instalaron máquinas comerciales tipo Darrieus de 17 m de diámetro y 170 kW comercializadas por la empresa Flowind en la zona californiana de Altamont Pass.

➤ Rotores Savonius

Otro tipo de turbina de eje vertical desarrollada en Finlandia por S.J. Savonius, es la turbina que lleva su nombre, rotor tipo Savonius (Figura 1-2.b). Se caracteriza por disponer de dos aspas que son las mitades de un cilindro cortadas por una generatriz y desplazadas lateralmente. Tienen la ventaja de ofrecer par de arranque y se pueden construir fácilmente, pero su bajo rendimiento y su reducida velocidad de giro hacen que sus aplicaciones se

limiten a bombeo de pistón. No obstante, se han desarrollado prototipos de 5 kW para aplicaciones de producción de electricidad en sistemas aislados como el Kansas State University Savonius.

1.1.1.1.2 Rotores de eje horizontal

Los rotores de eje horizontal se caracterizan por girar sus aspas en dirección perpendicular a la velocidad del viento incidente. La velocidad de giro de las turbinas de eje horizontal sigue una relación inversa al número de sus aspas, o de forma más precisa al parámetro denominado solidez que indica el cociente entre la superficie ocupada por las aspas y la superficie barrida por ellas. Así, las turbinas de eje horizontal se clasifican en turbinas de rotor multipala o aeroturbinas lentas y rotor tipo hélice o aeroturbinas rápidas. Las características básicas y aplicaciones de los dos tipos de turbinas se indican a continuación [9; 10].

➤ Rotores multipala. Aeroturbinas lentas

Los rotores multipala (*Figura 1-3*), se caracterizan por tener un número de aspas que puede variar de 6 a 24 y por lo tanto una solidez elevada. Presentan elevados pares de arranque y una reducida velocidad de giro. La velocidad lineal en la punta de la pala de estas máquinas, en condiciones de diseño, es del mismo orden que la velocidad del viento incidente. Estas características hacen que la aplicación fundamental de estas turbinas haya sido tradicionalmente el bombeo de agua. No se utilizan en aplicaciones de generación de energía eléctrica debido a su bajo régimen de giro.

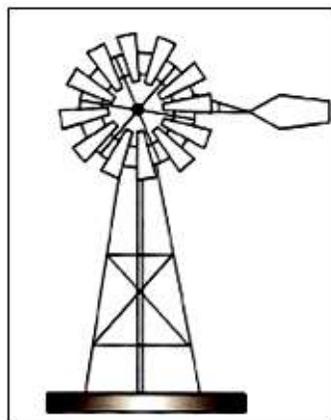


Figura 1-3. Rotor multipala americano [9].

➤ Rotores tipo hélice. Aeroturbinas rápidas

Los rotores tipo hélice (*Figura 1-4*) giran a una velocidad mayor que los rotores multipala. La velocidad lineal en la punta de la pala de estas máquinas varía en un margen de 6 a 14 veces la velocidad del viento incidente en condiciones de diseño. Esta propiedad hace que las aeroturbinas rápidas sean muy apropiadas para la generación de energía eléctrica, ya que el elemento mecánico que acondiciona la velocidad de giro de la turbina con la velocidad de giro del generador es menor en tamaño y coste. Los rotores tipo hélice presentan un par de arranque reducido que, en la mayoría de las aplicaciones, es suficiente para hacer girar el rotor durante el proceso de conexión.

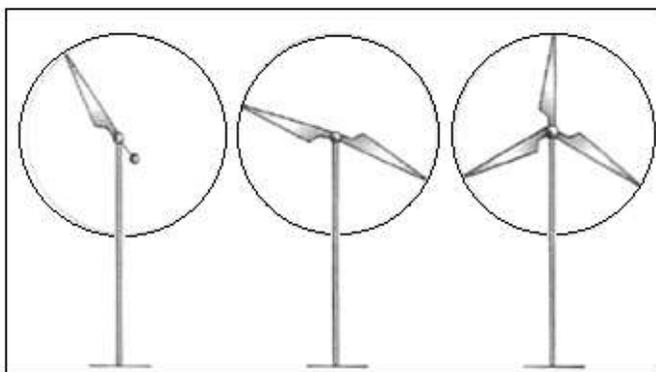


Figura 1-4. Rotor de eje horizontal tipo hélice (monopala, bipala y tripala) [9].

1.1.1.2 Clasificación de los aerogeneradores según potencia suministrada

- Equipos de baja potencia: Históricamente son los asociados a la utilización mecánica, tal como bombeo del agua. Proporcionan potencias alrededor del rango de 50 kW , aunque pueden utilizarse varios equipos adyacentes para aumentar la potencia total suministrada. Hoy en día siguen utilizándose como fuente de energía para sistemas mecánicos o como suministro de energía en equipos aislados.

También se utilizan en grupo y junto con sistemas de respaldo como motores de gasolina para suministro de energía de zonas rurales o edificios, ya sea conectándose a red o con baterías para almacenar la energía producida y garantizar la continuidad de la cobertura energética.

- Equipos de media potencia: Son los que se encuentran en el rango de producción de energía de 150 kW . Son utilizados de forma similar a los equipos de baja potencia, pero para mayores requerimientos energéticos. No suelen estar conectados a baterías

de almacenamiento, por lo que se utilizan conectados a red o junto con sistemas de respaldo.

- Equipos de alta potencia: Son los utilizados para producción de energía de forma comercial, aparecen conectados a red y en grupos conformando centrales eolieléctricas, ya sea en tierra como en entorno marino (offshore). Su producción llega hasta el orden del gigavatio. El diseño elegido mayoritariamente para estos equipos son los aerogeneradores de eje horizontal tripalas, orientados a barlovento y con torre tubular.

1.1.2 Aerogeneradores de baja potencia

Una de las tecnologías que emplea fuentes renovables, con pronóstico creciente en el mercado, son las turbinas eólicas pequeñas; siendo denominadas de esta forma, según la norma IEC-61400-1, aquellas turbinas cuya potencia es menor de 50 kW [12].

Existen dos aplicaciones generales para utilizar la energía eléctrica generada a partir de los aerogeneradores de baja potencia: instalaciones aisladas e instalaciones conectadas a la red eléctrica.

1.1.2.1 Instalaciones aisladas a la red eléctrica

Las pequeñas turbinas eólicas, pueden ser fuente económica de electricidad para sitios aislados. La aplicación más común de sistemas aislados es la electrificación de viviendas rurales, para la cual existen las configuraciones [13] siguientes:

- Sistemas individuales

Generalmente, cuentan con un pequeño aerogenerador, una o más baterías para almacenar la energía generada y un regulador que controla la carga y descarga de las baterías. Dependiendo de la aplicación, pueden incluir un inversor para transformar la electricidad de corriente continua en alterna.

Los aerogeneradores de baja potencia, se pueden utilizar sin conectar a la red eléctrica en diferentes aplicaciones. Generalmente se utilizan para cargar baterías, suministrando tanto corriente alterna como continua. Con los modernos sistemas de control electrónicos, pueden ser usados para mover bombas eléctricas directamente, sin emplear baterías. Los pequeños aerogeneradores también se pueden emplear para la calefacción de viviendas, etc. Por ejemplo, la “Universidad de Massachusetts”, propuso un calentador eólico a mediados de los

años setenta, y varias compañías trataron de sacar este proyecto al mercado. El concepto nunca tuvo acogida en Norteamérica porque no daba beneficios económicos, pero si lo tuvo en Dinamarca, donde los precios de la calefacción eran considerablemente altos. El Folkecenter for Renewable Energy de Dinamarca, demostró que una turbina eólica que cubre las demandas de la calefacción en el invierno, puede fácilmente cubrir las necesidades de agua caliente en verano.

Prospectiva y Vigilancia Tecnológica: Además de los usos tradicionales, miles de microturbinas son utilizadas en barcos. Una de las primeras aplicaciones fue la alimentación de instalaciones remotas de telecomunicaciones. Éstas eran habitualmente emplazadas en las cimas de inaccesibles montañas, donde el suministro de combustible era difícil y caro.

➤ Sistemas centralizados

Si las viviendas a electrificar se encuentran relativamente próximas entre sí, la opción más apropiada puede ser un sistema eólico centralizado, debido a la concentración de equipos y energía, lo cual ofrece ventajas desde los puntos de vista técnico y económico. Un sistema eólico centralizado satisface la demanda energética de una comunidad con electricidad producida, almacenada y transformada en un “sistema eólico central” y luego se distribuye, a través de líneas eléctricas, hasta cada una de las viviendas y otros sitios. Generalmente, este tipo de sistemas cuenta con más de una fuente de generación, para lograr mayor confiabilidad del sistema.

➤ Sistemas híbridos

Las pequeñas turbinas eólicas, como se comentó anteriormente, brindan una solución muy atractiva para la electrificación rural en muchos lugares, pero muchas veces la fluctuación del viento hace que no se pueda obtener una producción de electricidad de manera constante. Por esta razón, frecuentemente, se usa una turbina eólica en combinación con otra fuente de generación: por ejemplo, paneles fotovoltaicos o un generador eléctrico a base de diésel. Este tipo de sistemas se denominan “sistemas híbridos”, y una de las mayores ventajas que presentan, con respecto a un sistema individual, es que dan una mayor seguridad para la generación de energía eléctrica.

1.1.3 Partes de un aerogenerador

A continuación, se hace una breve descripción de los elementos más importantes de los aerogeneradores: el equipo multiplicador de potencia, el generador, el bastidor o góndola, las aspas, el buje, la torre, los ejes de alta y baja velocidad, el controlador electrónico y el rotor.

En la *Figura 1-5*, se muestra un dibujo de un aerogenerador detallando cual es cada parte.

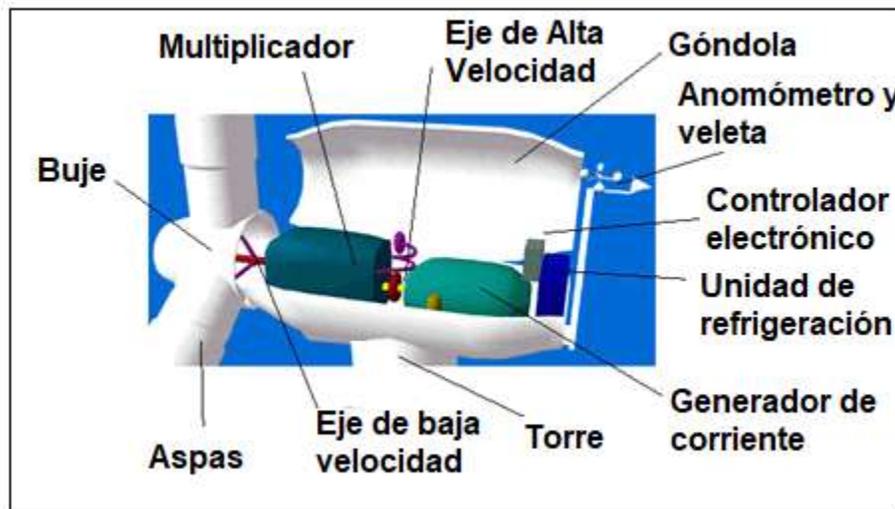


Figura 1-5. Partes de un aerogenerador [14; 15].

El rotor, es la parte de la máquina que transforma la energía del viento en energía mecánica. Aumentando el diámetro de las aspas, se puede aumentar la superficie de captación de viento y la potencia proporcionada por la máquina. La potencia que suministra el viento por unidad de superficie barrida se conoce como intensidad de potencia del viento.

Las aspas, son los elementos del aerogenerador que capturan la energía cinética del viento. Todas las aspas del aerogenerador son adheridas a un soporte denominado buje o cubo. El buje, es el elemento que realiza la unión de todas las aspas del aerogenerador. El buje se monta sobre el eje de baja velocidad, desde el cual se transmite el par motriz a la transmisión de potencia del aerogenerador (normalmente al multiplicador).

El equipo que permite la multiplicación de velocidad, adaptando el eje de baja velocidad al eje de alta velocidad donde se acopla el generador recibe el nombre de multiplicador.

Los ejes, son los elementos de transmisión que acoplan el multiplicador con las aspas (eje de baja velocidad) y el multiplicador con el generador (eje de alta velocidad). El eje de alta

velocidad está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.

El generador, está formado por una máquina eléctrica encargada de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Al ser una máquina eléctrica se compone de un rotor (parte móvil que genera un campo magnético variable al girar las aspas) y un estator (parte fija sobre la que se genera la corriente eléctrica inducida).

Excepcionalmente, algunos aerogeneradores incorporan un controlador electrónico que tiene un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación y la posición de las aspas, así como dirige los frenos. Éste es el caso de aerogeneradores de grandes potencias, como los que se ven en los parques eólicos.

El bastidor o góndola, es la estructura en la cual se montan los distintos componentes del aerogenerador. En la góndola se montan el buje, el multiplicador de velocidad, los ejes y el generador.

Finalmente, la torre, es el componente que sustenta todo el conjunto del aerogenerador y le une al suelo.

1.1.4 Aspas de un aerogenerador

El aspa o pala, como también se conoce, es el componente crítico en el funcionamiento de una turbina eólica, debe estar diseñada para aprovechar la máxima potencia disponible en el recurso eólico que actúa sobre ella y resistir las cargas aerodinámicas distribuidas a lo largo de su longitud [12; 16; 17].

La pala de un rotor eólico, es el elemento encargado de convertir la energía cinética y de presión del aire en energía mecánica. La variedad y magnitud de cargas a las que se ven sometidas las aspas de aerogenerador requieren de materiales que respondan a la complejidad planteada. La versatilidad de fabricación de los materiales compuestos, sus buenas propiedades estructurales, su alta rigidez y resistencia, su reducido peso, su buen comportamiento a fatiga y propiedades como su baja dilatación térmica o su baja conductividad eléctrica, hacen de ellos una solución ideal para el desarrollo de las aspas de un aerogenerador.

Las cualidades mecánicas que debe cumplir un aspa de turbina eólica son:

- Resistencia a fatiga (en particular a tensiones alternas debidas a vibraciones).
- Tener una resistencia estructural adecuada a las condiciones de trabajo a las que va a ser sometida.
- Peso bajo.
- Resistencia a agentes medioambientales (erosión, corrosión, impactos de aves), las cuales han ido incrementándose en los últimos 20 años.

1.1.4.1 Diseño óptimo de la pala

1.1.4.1.1 Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia y por lo tanto la potencia mecánica desarrollada por una turbina depende en gran medida de la geometría de sus aspas. Es posible obtener de forma matemática la geometría óptima de las aspas empleando la teoría del elemento de pala (BEM theory en terminología inglesa). Una buena aproximación a esta geometría debe ser uno de los objetivos del diseñador, sin embargo, la geometría final vendrá impuesta también por criterios estructurales y de fabricación.

Se define coeficiente de potencia de una turbina, como el rendimiento con el cual funciona y expresa qué cantidad de potencia total, de la que posee el viento, es capaz de capturar el rotor. Y se determina como:

$$C_p = \frac{P_m}{P_v} \quad (1)$$

Siendo P_v la potencia del viento incidente que se puede calcular por la ecuación 2, y P_m la potencia mecánica extraída del viento.

La potencia del viento por unidad de área en función de la velocidad está descrita por:

$$P = A \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2)$$

Dónde:

P (W) es la potencia que atraviesa el área A (m^2), ρ (kg/m^3) la densidad del aire, y v (m/s) la velocidad del viento.

El límite de Betz es el máximo coeficiente de potencia con el que puede funcionar una turbina ideal. Ocurre cuando la velocidad del viento después del disco del rotor es un tercio de la velocidad del viento inicial. Haciendo cálculos, $C_p \approx 59\%$.

1.1.4.1.2 Factor de actividad

La forma en planta de la pala se determina cualitativamente mediante el factor de actividad. En la *Figura1-6*, se representan los factores de actividad para diseños óptimos de rotores tripala. Un factor de actividad elevado implica, una velocidad específica (λ) de diseño, reducida. Lo que hace que el factor de actividad deba reducirse cuando la velocidad de giro aumenta. En el diseño óptimo, velocidades específicas de diseño crecientes implican menor torsión de las aspas. La velocidad específica está definida como:

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (3)$$

Siendo R el radio de la pala, v la velocidad del viento, y ω la velocidad angular.

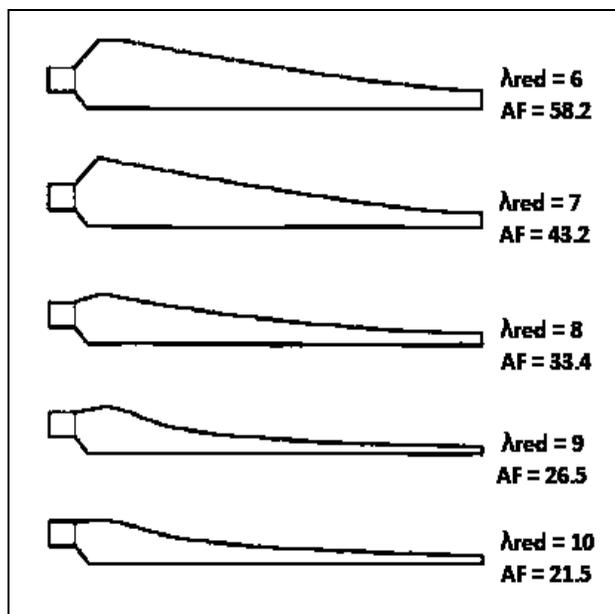


Figura 1-6. Factor de actividad en un diseño óptimo en función de la velocidad específica de diseño [9].

Si se sustituye la geometría óptima de las aspas por otras configuraciones más fáciles de construcción como son: la regular o la semi-trapezoidal, se observa que al menos en esta última configuración, el coeficiente de potencia no se diferencia mucho de la geometría óptima. En el caso de la configuración rectangular el coeficiente de potencia máximo se reduce considerablemente y se produce un deslizamiento en el parámetro λ de diseño (*Figura1-7*).

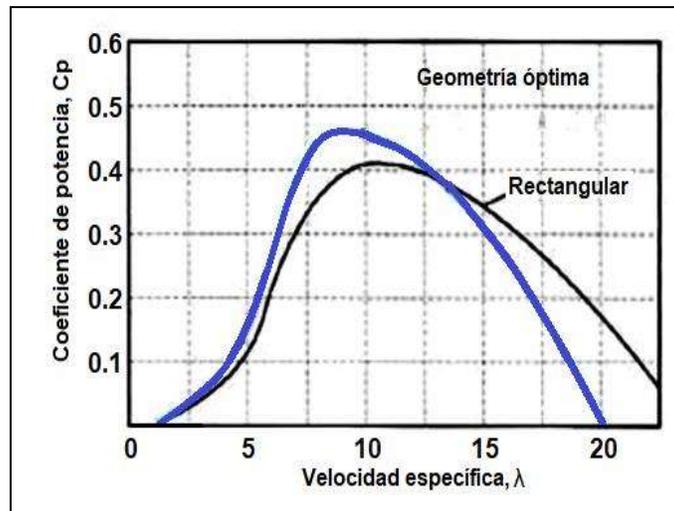


Figura 1-7. Influencia de la geometría de las aspas en el coeficiente de potencia [9].

1.1.4.2 Tecnología de las aspas. Geometría

El contorno aerodinámico de las aspas está formado en la parte exterior por perfiles aerodinámicos delgados; longitudinalmente, las aspas se van haciendo estrechas y se van torciendo. El reto de los diseñadores es por lo tanto ir desde un simple diseño rectangular hasta integrar la forma aerodinámica, la disminución y la variación del ángulo de torsión a lo largo del aspa, en un diseño de la estructura de la misma que optimice el uso de los materiales y permita una producción rentable [18].

Los perfiles aerodinámicos empleados en las aspas de las primeras turbinas eólicas modernas fueron desarrollados para aviones y no estaban optimizados para ángulos de ataque mayor, que son frecuentemente comunes en las turbinas eólicas. En la actualidad se ha comenzado a emplear perfiles aerodinámicos optimizados específicamente para éstas. Algunas turbinas modernas que emplean estos perfiles operan cercanas al límite de Betz, con un coeficiente de potencia (C_p) de 0.5 [19; 20].

La optimización aerodinámica de las aspas está asociada con la optimización de la longitud de la cuerda y la variación del ángulo de recepción del viento a lo largo del aspa, el número de aspas, la forma del perfil, y el cociente de velocidad de punta (TSR, por sus siglas en inglés) [21]. Es un problema multidisciplinario y complejo. Si se realiza la optimización del aspa, es posible alcanzar un coeficiente de potencia cercano al límite de Betz. En una turbina, el coeficiente de potencia depende del ángulo de ataque del viento, y el ángulo de inclinación del aspa [22; 23]. Para lograr determinar un diseño óptimo que permita el mejor

funcionamiento de la turbina al menor costo, deben ser hechas y tomadas en cuenta muchas consideraciones de diversa naturaleza [12; 16].

Los coeficientes de sustentación y arrastre de un perfil se encuentran dados en función del ángulo de ataque, α , y el Número de Reynolds, Re . En una turbina eólica pequeña se tienen números de Reynolds igual o inferior a 10^6 [24; 25].

El rotor es el componente de la turbina eólica que ha tenido un gran desarrollo en años recientes. El comportamiento aerodinámico de los rotores de aeroturbinas depende en gran medida de la geometría de la pala, que se define indicando la distribución de cuerdas, ángulos de torsión, espesores relativos y tipos de perfil a lo largo de su radio. Además, por la geometría de perfiles adoptada, definiremos también una distribución de grosores del material. Partiendo de esta información se definen algunos parámetros que caracterizan de forma sencilla la forma geométrica de las aspas. Estos parámetros son:

- Solidez: Es la relación, expresada en porciento, entre la superficie en planta de las aspas con respecto al área barrida por el rotor al que pertenece.
- Relación de aspecto: Cociente entre el radio de la pala al cuadrado y la superficie en planta de la pala.
- Relación de cuerdas: Cociente entre la cuerda en la punta y la cuerda en la raíz.
- Espesor relativo: Cociente entre el espesor del perfil respecto a la cuerda. Este parámetro se suele indicar para un radio determinado (por ejemplo, $r/R = 0.7$).

La relación de aspecto de las aspas de turbinas eólicas suele ser bastante elevada con relación a los diseños de alas de avión. Este diseño de aspas con relaciones de aspecto elevadas (aspas muy esbeltas) da lugar a una distribución de espesores relativos que puede llegar incluso a no cumplir los requisitos estructurales. Los espesores relativos son más reducidos en la zona de la punta de la pala (12 – 15 %) y se acercan más al diseño óptimo aerodinámico. Por el contrario, los espesores relativos aumentan en la zona cercana a la raíz. La prioridad de diseño en esta zona es aportar rigidez estructural a la pala, aunque la distribución de espesores no sea la más adecuada desde un punto de vista aerodinámico.

La distribución de cuerdas y del ángulo de torsión depende en gran medida de las preferencias que el diseñador establezca en las actuaciones de la aeroturbina.

Se han propuesto diseños con alerones en la punta para favorecer estos aspectos (*Figura 1-8*), sin embargo, no han sido muy efectivos.

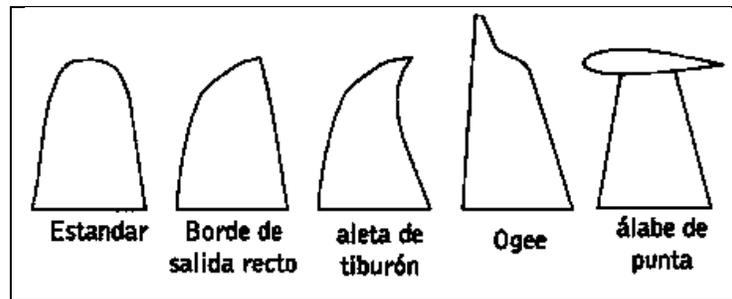


Figura 1-8. Forma geométrica de la punta de la pala [9].

La forma geométrica de la punta de la pala es otro aspecto que se debe considerar en el diseño aerodinámico ya que influye en la potencia generada de la turbina y en la emisión de ruido acústico. En la *Figura 1- 8*, se muestran diferentes configuraciones de la punta de pala utilizadas en el diseño de rotores eólicos. Los parámetros indicados anteriormente, se pueden considerar como una información resumida de la geometría de la pala. Sin embargo, las especificaciones técnicas de una pala deben incluir al menos: distribución de cuerdas, ángulo de torsión, la capacidad de potencia, tipo de perfil y espesor relativo a lo largo de toda la envergadura de la pala.

1.1.4.3 Materiales empleados en el diseño de aspas de aerogeneradores

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de aspas es la elección de los materiales empleados en su fabricación. Históricamente los materiales empleados en el diseño de aspas de aeroturbinas han sido la madera, los metales, las cerámicas y más recientemente los materiales compuestos.

Los primeros diseños de pala se realizaron con madera. Este material, tiene como ventajas su baja densidad, facilidad de mecanizado, buen comportamiento a fatiga y desde luego bajo coste. Sin embargo, sus propiedades mecánicas han sido superadas por otros tipos de materiales, además la propia naturaleza de la madera hace presente irregularidades en su constitución que puede provocar fisuras y por tanto una reducción de sus propiedades mecánicas. Otra desventaja del empleo de la madera, es su capacidad de absorción de agua, que reduce igualmente su comportamiento estructural. Durante los años 80 el programa americano de tecnología de aspas utilizó este material en sus diseños, de hecho, un prototipo americano de la época, MOD-0, utilizaba aspas de madera. El empleo actual de la madera como único material de las aspas está en desuso, o se emplea para la construcción de aspas

de pequeño tamaño (hasta 10 m). Hoy día se utiliza la madera junto con la resina epoxy en la construcción de materiales compuestos.

El acero se utilizó durante los años 80 como material para aspas en grandes máquinas, en concreto, en los aerogeneradores Growian, MOD-2, WTS-75 y MOD-5B. Las propiedades mecánicas de este material en cuanto a resistencia y tenacidad hicieron de este material una opción muy válida para la fabricación de aspas, sin embargo, su elevada densidad provoca un aumento considerable de cargas inerciales y gravitatorias sobre la turbina. Por otra parte, su facilidad para la corrosión constituye otra de sus desventajas, sin embargo, este problema se soluciona con un adecuado tratamiento superficial.

El aluminio, al contrario que el acero, posee una baja densidad y un buen comportamiento frente a la corrosión, sin embargo, presenta una resistencia a fatiga relativamente baja. Una aplicación tradicional de aspas de aluminio ha sido en máquinas de eje vertical tipo Darrieus. El diseño actual de las aspas de aerogeneradores requiere una geometría específica y un tanto complicada de las mismas para optimizar su rendimiento aerodinámico. Por otra parte, las aspas deben presentar un peso reducido y tener un comportamiento mecánico adecuado durante su período de funcionamiento, ya que estarán expuestos a inclemencias climáticas, fuertes vientos y en los casos de aerogeneradores offshore¹ a un alto grado de salinidad.

Los materiales que cumplen todos estos requisitos son los denominados materiales compuestos, ya que poseen una serie de ventajas [26] superiores a la de los materiales tradicionales. Entre ellas se podrían destacar las siguientes: menor densidad, óptimas resistencias y rigideces, mejorada resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión, y, con buena práctica de diseño, reducción en los costos de ensamblaje, debido al menor número de piezas de detalle y elementos de fijación.

En la *Tabla 1-1* se presentan las propiedades mecánicas de diferentes materiales utilizados en la fabricación de aspas. Los parámetros que se presentan son:

- Densidad ρ (g/cm^3)
- Límite elástico del material σ_y (N/mm^2)

¹ Afuera de la costa o del mar

- Módulo de elasticidad E (kN/mm^2)
- Resistencia a la fatiga $\pm \sigma_a$ (10^7) (N/mm^2)

Tabla 1-1. Características de los materiales empleados en la fabricación de aspas de aerogeneradores [9].

| Materiales | ρ(g/cm³) | σ_y (N/mm²) | E(kN/mm²) | $\pm \sigma_a$ (10⁷) (N/mm²) |
|-------------------|--|---|-----------------------------|--|
| Acero | 7.85 | 520 | 210 | 60 |
| Aleación de acero | 7.85 | 680 | 210 | 70 |
| Madera | 0.38 | ~ 65 | ~ 8 | ~ 20 |
| Aluminio | 2.7 | 480 | 70 | 40 |
| F.V.(*) poliéster | 1.8 | ~ 400 | ~ 15 | --- |
| F.V.(*) epoxy | 1.7 | ~ 400 | 15 | --- |
| F.C.(*) epoxy | 1.4 | 550 | 44 | --- |
| Madera - epoxy | 0.58 | ~ 75 | ~ 11 | ~ 35 |

1.2 Teoría de los Materiales Compuestos

1.2.1 Generalidades

Se define como material compuesto todo sistema o combinación de materiales constituido a partir de la unión (no de tipo químico, materiales insolubles entre sí) de dos o más componentes, que dan lugar a uno nuevo con propiedades características específicas, siendo sus propiedades distintas y generalmente superiores a las de los materiales que lo conforman [27].

Los materiales compuestos están formados por una matriz y por materiales de refuerzo. El refuerzo es el encargado de aportar la resistencia y rigidez necesarias al material para conseguir un buen comportamiento mecánico. En el caso de los compuestos con fibra, estos soportan la mayor parte de la carga, mientras que la matriz tiene como función el crear una fase continua alrededor de las fibras que transmita la carga entre ellas, las proteja del medio y las mantenga en la orientación deseada. Además, la matriz proporciona toda la resistencia al esfuerzo cortante interlaminar del compuesto y aporta en la resistencia a la propagación de grietas. Una fibra que ha fallado todavía puede transmitir carga, puesto que la matriz puede transmitir la carga entre los extremos de la falla. En los compuestos con fibras, las fibras pueden ser continua o discontinua, y su orientación permite obtener materiales isotrópicos o con gran anisotropía [28].

De las diferentes clasificaciones que se pueden hacer de los materiales compuestos, quizás las más importantes sean las que se refieren al tipo de matriz y la referente al tipo de refuerzo, las cuales se pueden identificar en tres categorías o grupos.

Clasificación de los materiales compuestos según su matriz:

- Materiales compuestos de matriz metálica.
- Materiales compuestos de matriz cerámica.
- Materiales compuestos de matriz polimérica.

De acuerdo a la geometría del reforzante, se tienen (*Figura 1-9*):

- Materiales particulados (reforzados por agregados de partículas).
- Materiales reforzados por fibras.
- Materiales estructurales (laminares o “sándwich”).

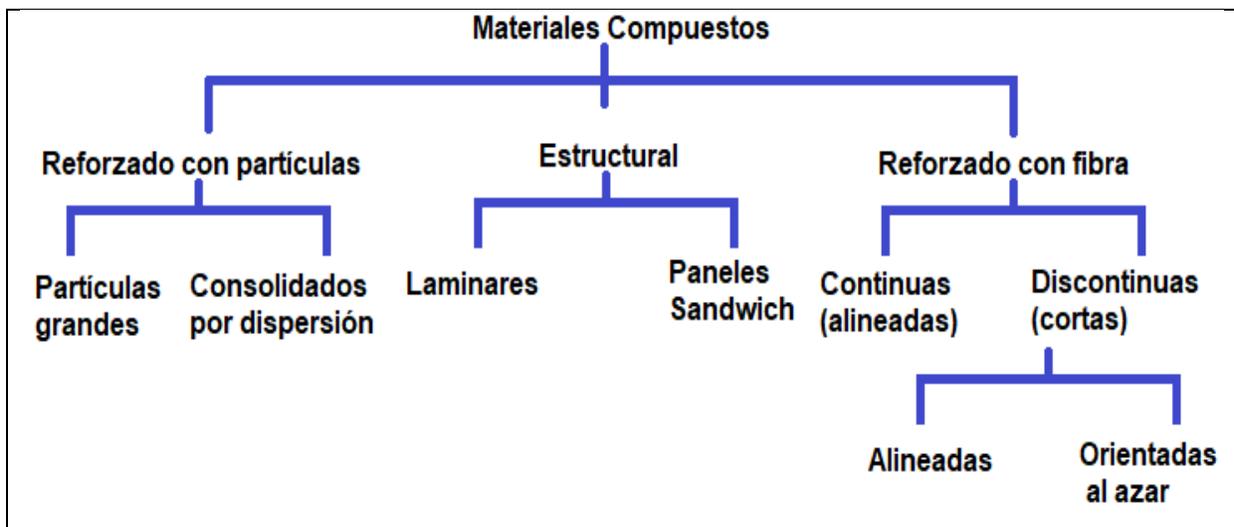


Figura 1-9. Clasificación de los materiales compuestos por la geometría del reforzante según lo referenciado en [29].

Ejemplo de estos son: el concreto que es una mezcla de cemento, grava y arena, es un compuesto particulado; la fibra de vidrio con resina poliéster, es un compuesto reforzado con fibras; y la madera contrachapada o triplay que contiene capas alternas de chapa de madera, es un compuesto laminar, aunque cabe mencionar que esto mismo se hace con los laminados de fibra de vidrio.

Existe una amplia gama de materiales de refuerzo aplicados a la construcción de aspas para aerogeneradores, pero los más utilizados son los compuestos con fibras, tales como, las fibras de vidrio, las fibras de aramida (kevlar) y las de carbono.

1.2.2 La Fibras de vidrio como material de refuerzo

Las fibras de vidrio son el refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de materiales compuestos (del tipo reforzados con fibras), sobre todo en aplicaciones industriales. Esto se debe a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas y su bajo coste.

La historia de la fibra de vidrio se remonta a la época de los egipcios, quienes descubrieron sus virtudes de resistencia para armar vasos y ánforas en las tumbas de los faraones. Los primeros estudios ingenieriles sobre materiales compuestos fueron realizados sobre materiales compuestos de fibra de vidrio.

1.2.2.1 Tipos de fibra de vidrio

En la práctica, los vidrios más utilizados son aquellos a base de sílice que contiene en disolución por lo menos dos silicatos: un silicato alcalino (silicato de sodio) y uno alcalinotérreo (silicato de calcio). El óxido de sodio actúa como fundente, facilitando el proceso al bajar la temperatura de fusión de la sílice, así como su viscosidad. Por el contrario, su presencia afecta a la resistencia química del vidrio y por ello se introduce un alcalinotérreo. La alta resistencia que presentan las fibras de vidrio es debida a los enlaces covalentes entre el silicio y los radicales de oxígeno. Los átomos forman una retícula tridimensional con estructura amorfa²; por lo que presentan características isotrópicas (propiedades iguales en todas las direcciones).

Los principales tipos son [30; 31]:

- **Vidrio E (Eléctrico)**: representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90% de los refuerzos, de uso general y tiene buenas propiedades eléctricas. La primera gran aplicación industrial de fibra de vidrio E fue el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas.
- **Vidrio A (Alto contenido en álcali)**: es menos resistente y tiene un módulo más bajo que el vidrio E. Presenta gran resistencia química.
- **Vidrio AR (Alcali resistente)**: es el único tipo de vidrio que puede combinarse con el hormigón o cemento ya que cualquier otro sería atacado por los álcalis liberados en la hidratación del hormigón o cemento.

² Estos sólidos carecen de formas bien definidas.

- **Vidrio C (Químico):** se sitúa entre el vidrio A y el E y se utiliza en las capas superficiales de estructuras anticorrosión, tiene una alta resistencia química.
- **Vidrio R o S (Resistencia):** empleado en estructuras de elevadas características mecánicas (aeronáutica, sobre todo), tiene una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a los otros tipos de vidrio. Nació por la demanda de los sectores punta (aviación, espacio, armamento) y responde a sus exigencias en el campo de los materiales resistentes a fatiga, temperatura y humedad.
- **Vidrio D (Dieléctrico):** con sus altas propiedades dieléctricas se utiliza sobre todo en la construcción de materiales electrónicos de telecomunicación, fabricación de radares y ventanas electromagnéticas. Estos materiales presentan muy débiles pérdidas eléctricas y de aquí su empleo como material permeable a las ondas electromagnéticas.
- **Vidrio B (Boro):** de excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad. Es borosilicato de calcio de bajo contenido en álcali.
- **Vidrio ERC (Eléctrico y Resistente químico):** con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.
- **Vidrio X:** con base de óxido de litio (Li_2O) por su transparencia a Rayos X.

1.2.2.2 Propiedades de la fibra de vidrio

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y se obtiene por fusión de la mezcla de estas materias.

Las principales características de la fibra de vidrio son [30]:

1. Alta adherencia: resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.
2. Características eléctricas: es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tiene buena permeabilidad dieléctrica. Permeable a las ondas electromagnéticas.
3. Incombustibilidad: materia mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza. No propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.
4. Estabilidad dimensional: poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría³, tiene un bajo coeficiente de dilatación.

³ Parte de la física que mide y estudia el nivel de humedad, especialmente de la atmosférica.

5. Compatibilidad con las materias orgánicas: su aptitud de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso o el cemento.
6. Imputrescibilidad: no sufre ninguna alteración, es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.
7. Débil conductividad térmica: la utilización de los materiales compuestos en la industria de la construcción permite suprimir los puentes térmicos, dando lugar a un considerable ahorro de calefacción.
8. Flexibilidad.
9. Bajo coste: comparado con otros materiales de refuerzo.

1.2.2.3 Obtención de fibras de vidrio

Aunque hay varios procedimientos para la obtención de fibras de vidrio, todos se basan en el mismo principio, estiramiento a muy alta temperatura por distintos medios, de una vena de vidrio fundido y su inmediata solidificación. Hay que destacar dos procedimientos:

- **A partir de bolas:** La materia prima (arena, caolín o dolomita) se introduce en un horno a 1550 °C, obteniendo bolas de un diámetro de 20mm, que se pasan a otro horno y posteriormente son hiladas. De esta manera se obtienen dos tipos distintos de fibras:
 - Siliconne: Fibras continuas obtenidas mediante estirado mecánico. Presentan las mejores propiedades mecánicas.
 - Verranne: Fibras discontinuas obtenidas por estirado por fluido.
- **Por fusión directa:** El vidrio pasa por unos agujeros, distribuidos sobre una superficie de platino. Las fibras se obtienen estirando monofilamentos de vidrio muy delgados.

1.2.3 Resina poliéster

Desde su descubrimiento, en 1936 las resinas de poliéster insaturado han ido ganando terreno hasta ser en la actualidad el 90% del total de las resinas utilizadas en el mercado de los materiales compuestos de matriz termoestable.

1.2.3.1 Forma de obtención de la resina poliéster

Estas resinas son los sistemas más sencillos y económicos entre las matrices termoestables presentando facilidad de uso y buena resistencia química. Se producen a partir de reacciones de policondensación entre dos monómeros, algún ácido dicarboxílico (es decir que posee dos grupos ácidos, normalmente se utiliza el anhídrido maleico o ácido fumárico) y un diol (compuesto que cuenta con dos grupos hidroxilo (-OH)), con la particularidad que alguno de los monómeros debe de tener una insaturación (doble enlace). El subproducto de esta reacción de condensación es agua, por lo que normalmente lo que se hace es formar el polímero, eliminar el agua en forma de vapor, y posteriormente aplicarlo. El polímero resultante se disuelve en un medio reactivo (normalmente estireno) para disminuir la viscosidad de la resina y permitir la impregnación de las fibras por parte de la resina. Se utiliza el estireno porque contiene un grupo insaturado que puede reaccionar con la insaturación de la resina de poliéster, permitiendo la formación de la estructura reticulada rígida mediante la reacción de endurecimiento. La cantidad de estireno presente en el producto final viene a ser el 40 – 45%. El estado de suministro de una resina de poliéster es estabilizado con un inhibidor de reticulación, normalmente una hidroquinona, debido a su tendencia natural a polimerizar y forman un gel.

1.2.3.2 Características de la resina poliéster

Las resinas de poliéster presentan una baja temperatura de transición vítrea, y su resistencia y rigidez no son elevadas. Como principal inconveniente podemos mencionar que tienden a contraerse durante el endurecimiento (hasta un 7% en volumen) pero aun así se encuentra entre los sistemas de matriz más económicos [29].

Según la naturaleza de sus monómeros se dividen en:

- **Resinas ortoftálicas:** Son las más frecuentes y las más baratas. Se obtienen a partir de la combinación de anhídrido maleico y anhídrido ftálico con glicoles. Absorben hasta una 2.5% de agua en inmersiones prolongadas.
- **Resinas isoftálicas:** Presentan mejores propiedades de resistencia al desgaste y a los agentes químicos y menor absorción de agua que las ortoftálicas, lo que las hace más resistentes en ambientes marinos. En este caso se sustituye en su formulación

el anhídrido ftálico por ácidos isoftálicos. La mayor parte de los gelcoats de uso naval son de este tipo.

- **Resina isoftálica NPG:** En este caso se sustituye el polipropilenglicol por neopentil glicol para mejorar la resistencia química de la resina.
- **Resinas bisfenólicas:** Estos tipos de resinas presentan mejores propiedades mecánicas y químicas que las resinas ortoftálicas e isoftálicas, pero con un coste mayor. Se obtienen a partir de bisfenol A y ácido fumárico con polipropilenglicol. Son las resinas con mejor comportamiento en medios corrosivos.

1.2.4 Matriz polimérica

Los materiales compuestos de matriz polimérica presentan buenas propiedades mecánicas, son resistentes a la corrosión y a los agentes químicos. Debido a las características de las matrices poliméricas pueden adoptar cualquier forma mediante moldeo. Las principales matrices utilizadas en este tipo de materiales compuestos son polímeros termoestables, aquellos cuyas cadenas forman una red tridimensional espacial, entrelazándose con fuertes enlaces covalentes, provocando que estos materiales sean infusibles e insolubles. Destacan en su utilización las resinas de poliéster, viniléster, epoxi y fenólicas. Como refuerzo se suelen utilizar fibras de vidrio, aramídicas (kevlar) y de carbono, en forma de distintos tipos de estructuras textiles simples o combinadas [29; 32].

1.2.4.1 Funciones de la matriz polimérica

En general, no sólo exclusivamente las poliméricas, las principales funciones que debe cumplir la matriz en un material compuesto es la de distribuir los esfuerzos entre las fibras a través de la intercara. Actúa como ligante manteniendo unidas las fibras por medio de fuerzas adhesivas y cohesivas. Además de tener otras funciones como:

Fijación de las fibras en el ordenamiento geométrico deseado

Protección a las fibras de los esfuerzos de compresión

Protección a las fibras de los medios externos (humedad, ataque químico)

Juntamente con los materiales poliméricos, existen otros materiales aptos para ser utilizados como matriz de unión (hormigón, aleaciones de aluminio y magnesio, cerámicos, etc.)

1.2.5 Materiales compuestos de polímero reforzado con fibra

Los materiales compuestos de polímero reforzado con fibra (PRF) suelen ser materiales heterogéneos y anisotrópicos que no presentan deformación plástica. Han sido utilizados en una amplia gama de aplicaciones contemporáneas, especialmente en el espacio y la aviación, automoción, marítimo y fabricación de equipos deportivos. Los materiales compuestos de polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC o CFRP: carbon fiber reinforced plastic) y de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV o GRP: glass reinforced plastic), entre otros materiales reforzados con fibra, han sustituido cada vez más a los materiales convencionales por su excelente resistencia y propiedades de bajo peso específico. Su capacidad de fabricación en diversas combinaciones con propiedades de resistencia personalizadas, también su alta resistencia al desgaste por fatiga, dureza y alta temperatura y capacidades de resistencia a la oxidación hacen de estos materiales una excelente opción en aplicaciones de ingeniería.

Los materiales compuestos más recientes son los basados en fibra de carbono. Este tipo de material, que se usa en la industria aeronáutica, se considera actualmente muy caro para aplicaciones eólicas.

Para nuestro estudio se analizará la fibra de vidrio con resina de poliéster, uno de los materiales compuestos más utilizado en la actualidad. Este tipo de material se empleó previamente con éxito en la industria naval y presenta como ventajas fundamentales su versatilidad de fabricación y sus buenas propiedades estructurales y de resistencia a fatiga. Tienen también un bajo coeficiente de dilatación y una reducida conductividad eléctrica lo que hace que estos materiales sean especialmente interesantes para la protección del sistema frente al rayo. Además, estos materiales son transparentes frente a ondas electromagnéticas.

1.2.5.1 Constituyentes de los materiales compuestos reforzados con fibras

En la actualidad, existe una amplia variedad de fibras y materiales de matrices para la fabricación de materiales compuestos, la cual con el transcurso del tiempo y el desarrollo de investigaciones continúa creciendo. La elección de la fibra y la matriz no se hace de manera arbitraria, estos, deben ser cuidadosamente seleccionados para que cumplan con los requerimientos estructurales especificados en el diseño.

Entre las principales fibras que se pueden citar se encuentran el Boro, el Carbono, la Alúmina, la Aramida, el Carburo de Silicio y el vidrio, de las cuales haremos referencia a esta última.

Las fibras de vidrio son las que han tenido una mayor historia con respecto a su uso, ya que estas han sido empleadas desde 1930, pero a partir de 1950 comenzó a utilizarse en aplicaciones estructurales debido a que mostraba una mayor rigidez. Son consideradas de gran importancia debido a su alta resistencia específica y principalmente a su bajo costo.

1.2.6 Plástico reforzado con fibra de vidrio

El plástico reforzado con vidrio o plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), también denominado con las siglas GFRP (Glass - Fiber Reinforced Plastic), o GRP (Glass Reinforced Plastic), es un material compuesto, formado por una matriz de plástico o resina reforzada con fibras de vidrio. No es inusual denominar informalmente a este material simplemente como "fibra de vidrio".

Se trata de un material ligero, resistente y fácil de moldear, por lo que es muy usado en la elaboración de piezas de formas suaves y complejas. En la industria náutica se utiliza para confeccionar el casco de algunas embarcaciones; en aeronáutica y en la industria automovilística para piezas y carrocerías, y en el sector de la construcción como envolvente o fachada en edificios singulares con formas de irregulares.

Los plásticos más utilizados son epoxi, poliéster, viniléster y otros termoplásticos.

El desarrollo de los polímeros reforzados con fibra para uso comercial comenzó en los años 30. En el año 1932 la empresa OwensIllinois produjo a escala industrial las primeras partidas de fibra de vidrio de pequeño diámetro y en 1936 du Pont desarrolló la resina de poliéster. El PRFV empezó a utilizarse durante la II Guerra Mundial en la fabricación de componentes para aviones y cubiertas para equipos de radares electrónicos. Uno de los principales motivos que impulsaron el desarrollo del PRFV como material estructural en esta época fue la necesidad de radomos⁴ para los aviones, debido su mayor permeabilidad a las microondas [33].

⁴ Un radomo es en ingeniería de telecomunicación, el recubrimiento de una antena, utilizado con el fin de protegerla, sin que ello afecte a sus propiedades electromagnéticas, siendo transparente a las ondas de radio.

El PRFV se siguió utilizando más adelante y, aunque era caro, la facilidad del material para adquirir formas complejas al moldearlo lo hizo popular entre los diseñadores. En el ámbito civil empezó a utilizarse en la fabricación de embarcaciones, ganando aceptación en la década de los 50, cuando ya se utilizaba para fabricar láminas translúcidas. El interés por el material compuesto de fibra de vidrio/poliéster para la industria de la construcción comenzó en los años 60 y se fue acrecentando, aunque fue a finales de siglo cuando se empezó a aplicar con cierto criterio en elementos estructurales [33].

También se utiliza en la fabricación de rejillas y tornillería, usados en entornos que requieren resistencia al ataque químico o a la oxidación, y de diversos tipos de canalizaciones y tuberías. Es un material de uso común en tanques de agua [33].

1.2.6.1 Fabricación del compuesto

Existen varias formas de confeccionar un laminado de PRFV, dependiendo de cómo se dispongan las fibras de vidrio dentro de la matriz plástica. La fibra puede colocarse como una o varias mallas superpuestas, en una dirección o en direcciones perpendiculares, en función de los esfuerzos a los que tenga que estar sometido el material. En ocasiones se utilizan más mallas de fibra como refuerzo puntual en las zonas más solicitadas. También pueden proyectarse las fibras de vidrio con pistola, quedando los hilos dispuestos aleatoriamente dentro del material de forma análoga a como se elaboraba el adobe. El grosor, la cantidad y la disposición de las fibras modifican sustancialmente tanto el peso como la resistencia del compuesto, por lo que esta variable se mide utilizando conceptos y unidades de la industria textil, como el Tex (peso en gramos de 1000m de fibra), o los metros de hilo por cada kg de material, que en el sistema anglosajón se denomina Yield ⁵.

La cantidad de fibra de vidrio empleada varía dependiendo del tipo de PRFV, en porcentaje sobre el peso total. Las cantidades más habituales empleadas en la tipología de vidrio proyectado oscilan entre el 20% y el 45%, en mallas bidireccionales entre el 35% y el 65%, y en mallas unidireccionales entre el 50% y el 90% [33; 34].

⁵ Yards de hilo por cada libra de material

1.2.7 Estructuras textiles

Las características del material compuesto dependen en gran medida de la cantidad de material de refuerzo y de su posicionamiento. Para facilitar el procesado de las fibras estas se suelen configurar en distintos ordenamientos planos, que reciben el nombre genérico de estructuras textiles, y que pueden dividirse en:

- Fieltrros
- Sistemas no mallados (tejidos, ensamblados y trenzados)
- Sistemas mallados (mallas y encadenados)

1.2.7.1 Fieltrros (mats)

Los fieltrros son estructuras textiles de fibras de refuerzo que no poseen una orientación preferente, con una distribución intercalada y aleatoria (*Figura 1-10*). Para mantener unidas las fibras antes de la impregnación, se les aplica algún tipo de ligante en función del tipo de matriz que posteriormente se vaya a utilizar (poliéster, viniléster, epoxi, etc.). Los fieltrros pueden estar formados por fibras continuas, hilvanadas o fibras cortadas de una longitud entre 40 *mm* y 50 *mm*. Para la fabricación de fieltrros con fibras de vidrio se usan hilos de siliconne. Los fieltrros se consideran estructuras textiles isotrópicas bidimensionales, con valores no muy elevados de resistencia y rigidez. Los fieltrros se utilizan para mejorar la adherencia interlaminar entre capas de laminado sucesivas. A la mayoría de fieltrros se les denomina comercialmente mats.

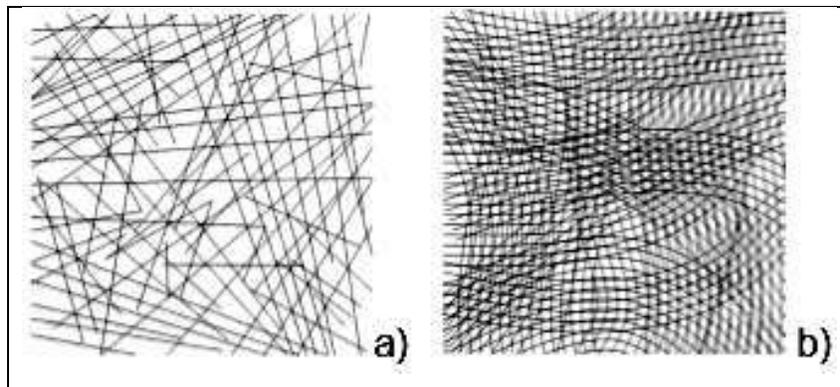


Figura 1-10. Dos tipos de fieltrros, a) Fieltro de fibras cortas y b) Fieltro de fibras continuas [29].

Los fieltrros de hilos cortados se suelen presentar en rollos bobinados sobre un tubo soporte de cartón y varían en cuanto al gramaje, que se encuentra entre 100 y 900 g/m^2 . Los mats

de hilos continuos se presentan en cuanto a gramaje en forma similar, pero son fieltros más deformables, y permite un mayor alargamiento en todas las direcciones, lo que permite utilizarlos preferiblemente en el caso de moldeo entre molde y contramolde de formas complejas por compresión, inyección o vacío. Un ejemplo de utilización de fieltros en la construcción naval, es el velo de superficie que es un fieltro de fibra de vidrio C de bajo gramaje (entre 30 y 80 g/m^2) que se coloca en contacto con el gelcoat exterior durante el proceso de laminación. Este fieltro tiene dos funciones principales, proporcionar resistencia mecánica al frágil gelcoat y resistencia química frente al ambiente exterior, al ser capaz de absorber una gran cantidad de resina. Además, proporciona una mayor resistencia al impacto y a la abrasión, impidiendo que se observen los tejidos utilizados en el laminado.

1.2.7.2 Sistemas no mallados

1.2.7.2.1 Tejidos

Son estructuras textiles formadas por fibras que se cruzan perpendicularmente, denominadas trama y urdimbre. Los hilos de urdimbre son aquellos situados en el sentido longitudinal, mientras que los de trama son los discurren de forman perpendicular, dando lugar a puntos de entrecruzamiento denominados ligamentos (*Figura 1-11*). En un tejido, las direcciones de máxima resistencia coinciden con las direcciones de la trama y la urdimbre (0° y 90°).

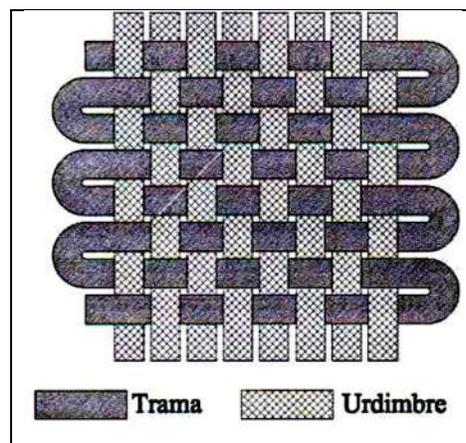


Figura 1-11. Esquema genérico de un tejido [29].

Existen diferentes tipos de tejidos:

- Tela o tafetán (plain weave): Es el más sencillo y utilizado (*Figura 1-12.a*), en este caso la trama pasa alternativamente por encima y por debajo de cada hilo de urdimbre, a modo de un sencillo enrejado.
- Sarga (twill): Es un tipo de tejido que presenta líneas en diagonal, en este tipo la urdimbre se divide en series cortas de hilos (de tres, cuatro o cinco), de los cuales sólo uno cubre la trama en la primera pasada y el siguiente hilo en la segunda pasada, etc. Así los puntos de ligadura se trasladan un espacio a cada pasada de la trama. La sarga tiene derecho y revés (*Figura 1-12.b*).
- Satén (satin): Los hilos de la urdimbre se dividen en series mayores que en la sarga (de cinco a ocho series), como se muestra en la *Figura 1-12.c*. Cada hilo de urdimbre hace una basta (hilo sin ligar) sobre cuatro pasadas de trama y se entrelaza con la quinta pasada de trama con una progresión de dos a la derecha o a la izquierda. Presenta derecho y revés.
- Raso: En el satén, las bastas van en sentido vertical, mientras que en el raso van en sentido horizontal. En este caso, cada pasada de trama hace una basta sobre cuatro hilos de urdimbre y se enlaza con el quinto hilo de urdimbre con una progresión de dos a la derecha o a la izquierda. También presenta derecho y revés.

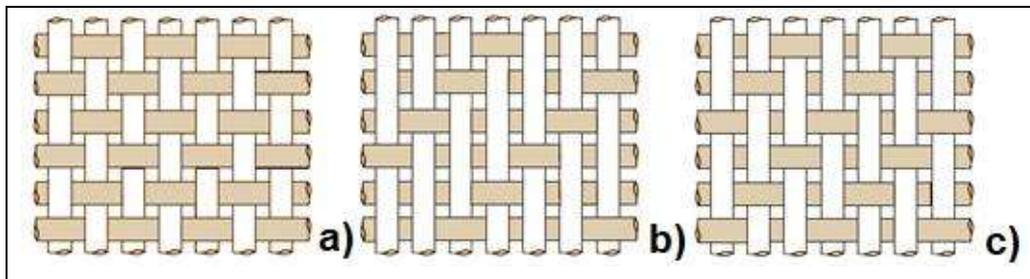


Figura 1-12. Esquemas de distintos tipos de tejidos: a) Tafetán, b) Sarga y c) Satén [29].

Las sargas, satenes y rasos, al tener un menor número de ligamentos que los tafetanes y telas son tejidos más deformables.

1.2.7.2.2 Ensamblados

En este caso, los hilos de trama y de urdimbre no se entrecruzan formando ligamentos. Las fibras paralelas se encuentran superpuestas unas a otras en distintas orientaciones, y para mantenerlas unidas sin que se deformen, normalmente se encuentran cosidas mediante una fibra ligera auxiliar (*Figura 1-13*).

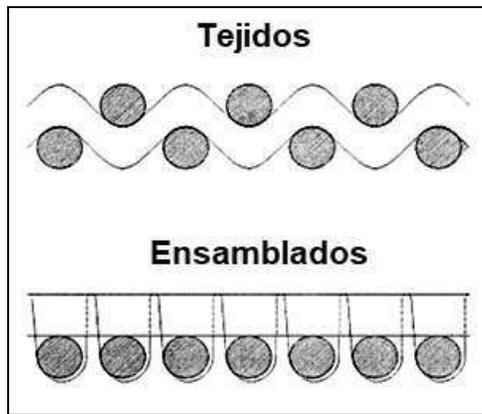


Figura 1-13. Comparación de la estructura de un tejido y un ensamblado [29].

Este tipo de estructura textil, presenta mejores propiedades mecánicas que los fieltros y que los tejidos, al encontrarse los hilos perfectamente alineados con el sentido del esfuerzo. Estos ensamblados son los refuerzos utilizados en piezas de altos requerimientos estructurales. En función de la orientación de las fibras existen ensamblados unidireccionales (*Figura 1-14.a*), biaxiales (*Figura 1-14.b*), triaxiales, cuatriaxiales y multiaxiales. Los ensamblados son muy utilizados en la construcción naval.

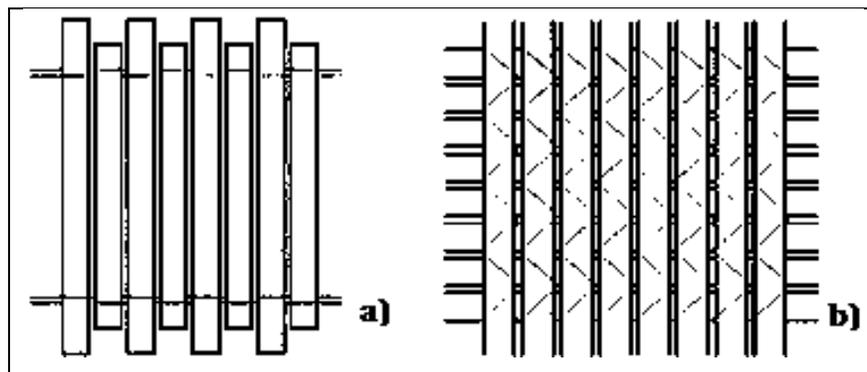


Figura 1-14. Ejemplos de ensamblados: a) Unidireccional y b) biaxial [29].

1.2.7.2.3 Trenzados

Los trenzados presentan fibras con un cierto ángulo respecto del esfuerzo aplicado (*Figura 1-15*). Se confeccionan en forma de calcetín o en forma de cintas, y el ángulo que forman puede elegirse. Prácticamente no se utilizan en construcción naval, sólo en pequeñas piezas.

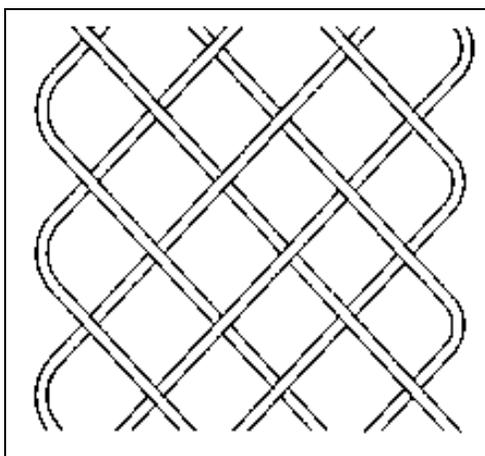


Figura 1-15. Esquema de trenzado [29].

1.2.7.3 Mallados y encadenados

También son ordenamientos textiles planos que se confeccionan mediante mallado o encadenado de una fibra o conjunto de fibras a otra fibra o conjunto de fibras. Para su confección son necesarias máquinas especiales, de género de punto. Los *mallados* o también denominados tejidos multiaxiales son estructuras textiles confeccionadas a partir de fibras con distintas orientaciones, con una estructura que no se deforma proporcionada durante la acción de tejido (*Figura 1-16.a*). Estos mallados pueden presentar problemas de impregnación debido a la gran cantidad de fibras que los constituyen. Además, en función del número y cantidad de capas que forman el mallado, pueden ser realmente rígidos.

En los *encadenados* (*Figura 1-16.b*) las fibras presentan orientaciones poco usuales, por lo que no es posible obtener buenos valores de resistencia con este tipo de refuerzo. Además, las fibras de vidrio y carbono presentan baja resistencia al entrelazamiento y baja resistencia a las flexiones a las que son sometidas durante la confección.

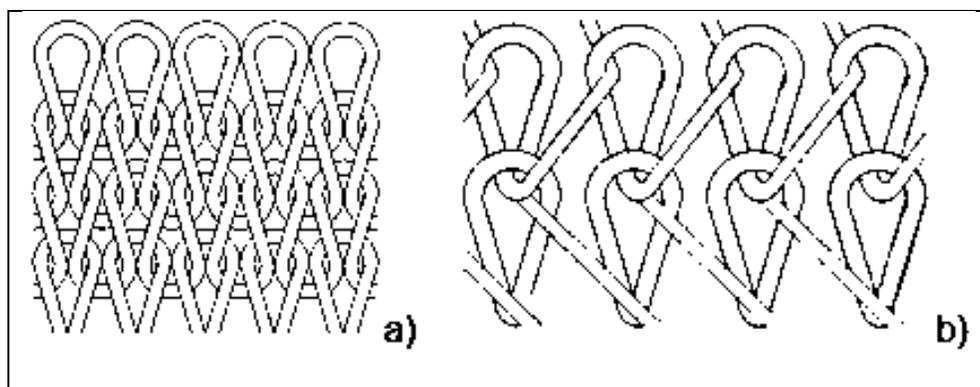


Figura 1-16. a) Esquema de mallado, b) Esquema de encadenado [29].

1.2.8 Propiedades de los polímeros reforzados con fibra

La combinación macroscópica de las fibras con la matriz da como resultado propiedades que no se pueden conseguir mediante los componentes por separado. Las fibras, presentan una gran resistencia a la tensión, sin embargo, no soportan las fuerzas de control de compresión o de flexión; por su parte la matriz polimérica presenta una baja resistencia a la tensión. El resultado es un material con buena resistencia a la tensión, que además soporta cargas de compresión y reflexión.

Las fibras largas y continuas presentan una mayor resistencia a la tensión en su dirección axial (anisotropía), Y éstas pueden orientarse con la dirección de la carga, pero las fibras presentarán propiedades pobres en la dirección transversal. Lo anterior se puede resolver al colocar láminas por ventos en diferentes direcciones, teniendo como resultado un material con buenas propiedades en diferentes direcciones, afectando en su anisotropía o incluso generando un material casi isotrópico.

Además de las propiedades mecánicas antes mencionadas, las fibras de vidrio reforzada tienen las siguientes características: buena relación resistencia-peso, resistencia a la humedad, a la corrosión, aislante térmico, facilidad de producción y un costo relativamente bajo.

La unión entre las fibras y la matriz debe ser muy buena, particularmente para compuestos con matrices poliméricas o metálicas. Si existe una mala unión entre fibras y matriz, las fibras pueden salir de la matriz, y su resistencia y resistencia a la fatiga disminuyen. Además, para compuestos laminados la unión entre láminas y láminas también resulta importante, para evitar la delaminación, el cual consiste en el desplazamiento de una lámina sobre otra, y, por consiguiente, en la pérdida de la unión entre ellas.

La importancia del uso de materiales compuestos avanzados en el campo energético radica en la necesidad de reducir el peso de componentes para aumentar la eficiencia de las máquinas, así como el mejorar comportamiento de dichos materiales bajo condiciones críticas de temperatura y corrosión.

Si consideramos el volumen total del compuesto como V_c , la fracción volumétrica de las fibras y de la matriz será:

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (4)$$

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (5)$$

Donde el volumen del compuesto es la suma de los volúmenes de las fibras y la matriz:

$$v_c = v_f + v_m \quad (6)$$

Por lo tanto:

$$V_m = 1 - v_f \quad (7)$$

Las propiedades de un material compuesto pueden estimarse mediante la regla de las mezclas, donde P_i es la propiedad del material compuesto, el subíndice i se refiere al componente, y V esa fracción volumétrica:

$$P_c = \sum_{i=1}^n V_i P_i \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n V_i = 1 \quad (9)$$

La cantidad de fibras en el compuesto está dada por la fracción volumétrica de la fibra dentro del compuesto. Entre mayor sea la fracción volumétrica de las fibras mayor será la resistencia a la tensión del compuesto. Sin embargo, se necesita de un mínimo de aproximadamente 20% de matriz dentro del compuesto para que ésta contribuya con su tarea de mantener la forma de la pieza y de transmitir la carga entre las fibras.

1.3 Referencias básicas sobre la teoría de falla por fatiga de materiales compuestos

1.3.1 Antecedentes de la falla por fatiga

En ingeniería y en especial, en ciencia de los materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas (con esfuerzos muy por debajo a los valores límites del material). Aunque es un fenómeno sin definición formal, este comportamiento no fue de interés real hasta la revolución industrial, cuando, a mediados del siglo XIX los ejes de los carros de ferrocarril comenzaron a fallar después de tan sólo un tiempo limitado en servicio. El término “fatiga” fue usado por primera vez por Poncelet en 1839, para describir la situación de falla de los materiales sometidos a cargas variables. Debido a que la falla por fatiga tiene apariencia frágil, se pensaba que el material se había “cansado” y hecho frágil después de soportar un cierto número de fluctuaciones de esfuerzo [35].

Rankine, en 1843, fue el primero en publicar sobre el tema, que publicó un estudio sobre las causas de ruptura inesperadas en la sección giratoria de los ejes de ferrocarril, donde postuló que el material se había “cristalizado” y se volvió frágil debido a la fluctuación de los esfuerzos [35].

En 1871, el ingeniero alemán August Wohler efectuó la primera investigación científica (durante un período de 12 años) sobre falla por fatiga haciendo fallar ejes en un laboratorio, sujetos a ciclos de carga invertida y mostrando como culpable de la falla al número de ciclos de esfuerzo. Al realizar pruebas sobre las mitades rotas de los ejes que habían fallado por fatiga, observó que el material tenía la misma resistencia y ductilidad bajo carga de tensión que el material original; es decir, el material no se había “cansado”, ni fragilizado como se creía. Sin embargo, el término fatiga se sigue utilizando para referirse a las fallas de elementos sometidos a cargas variables [35].

Con el devenir del tiempo se fueron llevando a cabo estudios diversos acerca de las fallas por fatiga, como pueden citarse los realizados por Bauschinger (1886), Griffith (1921) y Peterson (1953), mostrados en la *Figura 1-17*. Además de los realizados por Rosakis y Ravichandran (2000), Alves y Jones (2002), Dwivedi y Espinosa (2003), Lin Z y Lincang (2004), Roy Xu y Wang (2006), entre muchos otros que continúan en investigación actualmente.

| Año | Investigador | Suceso o logro |
|------|-------------------|---|
| 1829 | Albert | El primero en documentar fallas debidas a cargas repetidas. |
| 1839 | Poncelet | El primero en utilizar el término fatiga. |
| 1837 | Rankine | Estudio de la teoría de cristalización por fatiga. |
| 1849 | Stephenson | Estudio de los productos asociados con las fallas por fatiga de los ejes de ferrocarril. |
| 1850 | Bralthwaite | El primero en usar el término fatiga en una publicación en inglés y en estudiar la teoría de la cristalización. |
| 1864 | Fairbairn | Informa sobre los primeros experimentos con cargas repetidas. |
| 1871 | Wohler | Publica los resultados de muchos años de investigación sobre fallas en ejes, desarrolla las pruebas de flexión giratorias y el diagrama S-N, y también define el límite de resistencia. |
| 1871 | Bauschinger | Desarrolla el extensómetro de espejo con una sensibilidad de 10^{-6} y estudia el esfuerzo-deformación inelástico. |
| 1886 | Bauschinger | Propone un "límite elástico natural" cíclico, abajo del cual no ocurrirá la fatiga. |
| 1903 | Ewing/Humfrey | Descubren las líneas de deslizamiento, grietas por fatiga y crecimiento de la grieta por falla, refutando así la teoría de la cristalización. |
| 1910 | Bairstow | Verifica la teoría de Bauschinger de un límite elástico natural y el límite de resistencia de Wohler. |
| 1910 | Basquin | Desarrolla la ley exponencial de pruebas de resistencia (la ecuación de Basquin). |
| 1915 | Smith/Wedgewood | Separan la deformación plástica cíclica de la deformación plástica total. |
| 1921 | Griffith | Desarrolla criterios de fractura y relaciona la fatiga con el crecimiento de la grieta. |
| 1927 | Moore/Kommers | Cuantifica los datos de ciclos altos de fatiga para muchos materiales en "The Fatigue of Metals". |
| 1930 | Goodman/Soderberg | Determinan independientemente la influencia de los esfuerzos medios en la fatiga. |
| 1937 | Neuber | Publica la ecuación de Neuber para la concentración de deformaciones en muescas (traducida al inglés en 1946). |
| 1953 | Peterson | Publica "Stress Concentration Design Factors", que ofrece un buen enfoque para justificar las muescas. |
| 1955 | Coffin/Manson | Publican independientemente la ley de la fatiga con pocos ciclos con base en la deformación (ley de Coffin-Manson). |
| 1961 | Paris | Publica la ley de Paris de mecánica de la fractura del crecimiento de la grieta por fatiga. |

Figura 1-17. Cronología de eventos en la investigación y los logros de fallas por fatiga [35].

Querales, A. (1975), estudió la influencia de un tipo de tratamiento termomecánico sobre el comportamiento mecánico, estático y dinámico de un acero AISI 4340, encontrando una mejora en el comportamiento mecánico del acero, mejora que se pudo explicar por la formación de subgranos en coincidencia con una redistribución de microestructura del material [36].

En el 2001, Mariño C. y otros realizaron una investigación con el objetivo de estudiar el comportamiento a la fatiga y a la corrosión de un acero SAE 4140 recubierto con un depósito de cromo duro. Encontraron que el esfuerzo de fluencia y la resistencia máxima del material

recubierto disminuyeron de manera poco significativa con respecto al material base sin recubrimiento [36].

La fatiga en la aplicación particular de las aspas del rotor de la turbina eólica es discutida por Kensche (2004). Sutherland, Mandell, y Samborsky tienen un largo historial de investigación sobre la fatiga del material de la pala del rotor (1992-2005). Joosse y van Delft (1996) expresaron su preocupación sobre la exclusión de la fatiga como un tema y revisaron las investigaciones llevadas a cabo en los Países Bajos entre 1984 y 1996. Wahl ha proporcionado datos y análisis valiosos, que son más relevantes para el trabajo actual, especialmente el trabajo experimental realizado sobre el material DD16 [37].

Por otro lado, Miravete A (2012), plantea que desde el punto de vista ingenieril se debe definir rigurosamente la fatiga como el cambio estructural permanente, localizado y progresivo que tiene lugar en un material sujeto a deformaciones repetidas o fluctuantes; y que por lo general, estas deformaciones se presentan a esfuerzos menores que la resistencia última de tracción del material en un ensayo estático, y aparecen con frecuencia para esfuerzos menores que el límite de fluencia del material [38].

De forma general, se puede decir que la fatiga es el mecanismo mediante el cual las fisuras se incrementan en una estructura debido a un crecimiento que se produce bajo tensiones cíclicas (se produce una rotura final, normalmente en zonas sometidas a tensión de tracción cuando la sección transversal reducida se hace insuficiente para soportar la carga máxima sin que se produzca la rotura). Además, constituye el factor de diseño de los principales componentes de una turbina eólica, incluso algunos diseños de torre pueden ser sensibles a la fatiga. Sin embargo, hay algunos componentes que deben diseñarse limitando las cargas y los requisitos de rigidez.

El estudio del mecanismo de fractura por fatiga es un tema que se ha ido desarrollando con gran intensidad en los últimos años; y en la actualidad se ha llegado a afirmar que el 90 % de todas las fracturas en servicios se deben al mecanismo de fatiga [36].

1.3.2 Fatiga en polímeros reforzados con fibras de vidrio

Con el transcurso de tiempo, prácticamente todos los materiales sufren degradación de sus propiedades mecánicas por la aplicación de cargas cíclicas, o simplemente como

consecuencia de su exposición a determinadas condiciones ambientales. Los polímeros reforzados con fibras (PRF) no son una excepción, generalmente también sufren fatiga.

La fatiga en diversos polímeros de ingeniería fue analizada por Herman y sus colaboradores en 1990. Las muestras poliméricas ensayadas presentaron roturas debidas a fallos térmicos cuando fueron sometidas a fuertes niveles tensionales al provocar un elevado calentamiento de histéresis. Asimismo, estudios realizados por Pétrault (1993), acerca del comportamiento en fatiga sobre la poliamida (PA) ponen de manifiesto un fuerte calentamiento térmico de histéresis, cuyos efectos son gobernados por la amplitud de las tensiones impuestas y por la frecuencia a la que son aplicadas. La rotura obtenida puede considerarse, por lo tanto, de origen termodinámico [39].

La degradación de elementos de materiales compuestos puede ser debida a la aplicación de una carga estática o bien puede producirse progresivamente al someter el material a esfuerzos cíclicos, lo que se denomina daño por fatiga.

Al someter un laminado o una lámina de compuesto a un proceso de cargas cíclicas, es posible observar desde el punto de vista estructural dos fenómenos principales: la degradación de su rigidez a lo largo de la aplicación de los ciclos de carga y la rotura de la pieza al cabo de un determinado número de ciclos de aplicación de la carga, a niveles inferiores a los de la resistencia estática. Dicho comportamiento se debe a la unión de varios mecanismos de daño que surgen a lo largo de este período en distintos puntos del material. La coalescencia de estos daños o roturas locales provoca la degradación de las propiedades mecánicas globales. Estos mecanismos son los mismos que suceden al cargar el material cuasi-estáticamente, pero el distinto ritmo de evolución y la consiguiente interacción entre mecanismos al aplicar cargas cíclicas conducen a modos de degradación y fractura distintos. La participación relativa de cada mecanismo de daño depende tanto de las propiedades de los materiales constituyentes y de la configuración del laminado, como de las características de la carga aplicada.

1.3.2.1 Generalidades sobre la degradación a fatiga de un laminado

Existen dos propiedades fundamentales en un laminado que influye de manera decisiva en su comportamiento y en cómo se presenta en ellos el mecanismo de degradación por fatiga, su heterogeneidad y su gran anisotropía. Es posible observar estas propiedades a dos

escalas: una a nivel cuasi-macroscópico (cada una de las láminas posee un comportamiento mecánico anisótropo y dependiente de la orientación y contenido del refuerzo) y la otra a escala microestructural (la gran diferencia en las propiedades de matriz y refuerzo ocasiona que aparezcan tensiones y deformaciones adicionales a las producidas por las cargas externas). Esto se debe a que la falta de homogeneidad del material da lugar a la aparición de cargas internas entre los distintos componentes del material. Lo que trae consigo que se produzcan fuertes campos tensoriales en dos o tres direcciones superpuestos entre sí, inclusive en el caso de carga global unidireccional.

Para los materiales sometidos a cargas cíclicas, la heterogeneidad es el factor principal que marca su respuesta, ya que tomando en cuenta su comportamiento a fatiga se muestra un doble efecto contrapuesto. También se puede decir que a nivel micromecánico, es el factor que condiciona el inicio de la degradación, y asociado con el proceso del daño a fatiga, aún antes de comenzar la fase de degradación, favorece a la complejidad de los estados de tensión. Lo que significa que los mecanismos de degradación local que actúan iniciando el proceso global del daño están desencadenados por la existencia de distintas fases con distintas propiedades. La formación de grietas en la matriz, las pérdidas de adherencia, la rotura de fibras de refuerzo y la separación de láminas, son algunos ejemplos de estos mecanismos o sucesos. Se puede decir que en mayor o menor medida la heterogeneidad es un factor que contribuye a que los materiales compuestos laminados presenten una buena resistencia a la fatiga ya que, debido a la presencia de discontinuidades entre placas adyacentes, como resultado de las diferencias de propiedades y de comportamiento, la expansión del daño se ve frenada.

La anisotropía es un factor que influye en el desarrollo del daño por fatiga. Existe una estrecha relación entre la dependencia direccional de las propiedades y el complejo estado de tensiones que da lugar a acoplamientos, ejemplo de ello son las combinaciones de tracción axial y esfuerzo cortante. Sin embargo, el efecto más interesante de la anisotropía es la compleja distribución interna de tensiones asociadas a la degradación, lo que ocasiona estados de tensión tridimensional que constituyen un gran obstáculo para reflejar de manera eficiente las consecuencias de la acumulación de daño por fatiga en materiales compuestos laminados.

1.3.3 Modelos básicos para la predicción de Falla por Fatiga de PRF

Son muchos los esfuerzos realizados con el transcurso del tiempo por lograr desarrollar modelos que permitan predecir la vida de una estructura de PRF debido a cargas de fatiga en servicio, las cuales suelen ser cargas aleatorias y de amplitud variable. En la práctica, el procedimiento que se suele emplear es el mismo que para materiales metálicos.

La comprobación experimental de estos modelos se suele realizar en su mayoría en compuestos de fibra de vidrio (PRFV), ya que tienen una amplia aplicación en las aspas de los generadores de energía eólica [40-43].

Es difícil realizar una clasificación rigurosa de los modelos de fatiga más importantes y las metodologías de predicción del tiempo de vida para las pruebas de fatiga de polímeros reforzados con fibra. Una clasificación viable [44], plantea que los criterios de fatiga se pueden clasificar en cuatro categorías principales: los criterios de fatiga de resistencia macroscópica, los criterios basados en la resistencia residual y los basados en la rigidez residual, y finalmente los criterios basados en los mecanismos de daños reales. Los autores han utilizado una clasificación similar para clasificar la gran cantidad de modelos de fatiga existentes para laminados compuestos y consta de tres categorías principales: modelos de vida de fatiga (No tienen en cuenta los mecanismos de degradación reales, utilizan curvas S-N o tipo Goodman, los diagramas de vida constante (DVC)); los modelos que estiman la degradación de propiedades mecánicas como rigidez y resistencia residual, denominados modelos fenomenológicos; y finalmente los modelos de daño progresivo que usan una o más variables de daño relacionadas con manifestaciones medibles de daño (grietas de la matriz transversal, tamaño de delaminación, etc.) [45].

1.3.3.1 Modelos de vida a fatiga

Los modelos que estudian el comportamiento de la vida a fatiga de materiales estructurales tienen su base fundamentalmente en los esfuerzos, deformaciones o en la fase de propagación de la grieta. Buscan determinar una resistencia de fatiga y/o un límite de resistencia a la fatiga para el material, de modo que los esfuerzos cíclicos se mantengan por debajo de ese nivel y se elimine la falla para el número de ciclos requerido.

Normalmente, estos modelos se caracterizan por la generación de curvas de esfuerzo frente a la vida a fatiga. Estas curvas son conocidas como curvas S-N o curvas de Wöhler [35; 46].

Las curvas más comunes y a la vez las más simples que se emplean para representar los datos son las curvas empíricas representadas por líneas rectas, comúnmente en campos logarítmicos (10) y semi-logarítmico (11), como se muestra en la *Figura 1-18* [42]:

$$N = B \cdot \sigma_{max}^M \quad (10)$$

$$\log_{10} N = M \cdot \sigma_{max} + B \quad (11)$$

Donde:

B: constante

A: pendiente de la línea de ajuste.

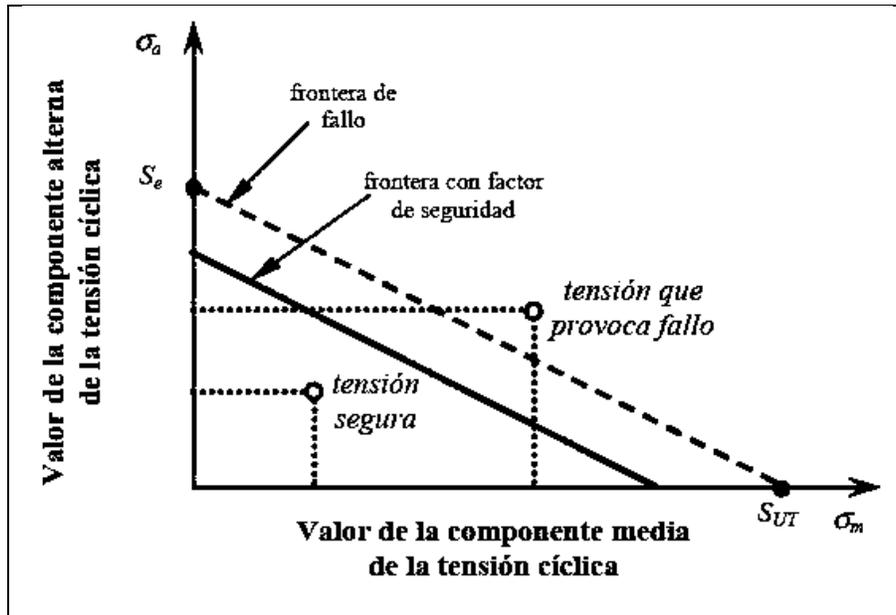


Figura 1-18. Aplicación al diseño del diagrama de vida constante en el plano $\sigma_a - \sigma_m$ según la regla lineal de Goodman S_{ut} en el eje horizontal es el límite de resistencia a tracción y S_e en el vertical es el límite de fatiga [47].

Tomando en cuenta el valor de “A”, es posible conocer el grado de sensibilidad que tiene el material. La pendiente de la línea de ajuste revela la sensibilidad que tiene el material determinado a fatiga. Se puede decir que un material tiene una alta resistencia a la fatiga, cuando se obtiene una pendiente plana, mientras que una pendiente pronunciada representa un material con baja resistencia a la fatiga [42].

Dependiendo de la magnitud del esfuerzo máximo al cual se espera que se someta una estructura durante su tiempo de vida a fatiga, existen otros modelos más sofisticados en donde la curva se puede dividir en zonas diferentes, diferenciando el régimen de fatiga como

régimen de fatiga de ciclo bajo (LCF) o régimen de fatiga de ciclo alto (HCF). Aunque no existe un parámetro que divida claramente ambos regímenes, varios investigadores sugieren divisiones ligeramente diferentes. Dowling, define el régimen de ciclo alto como aquel de 10^2 a 10^4 ciclos de variación esfuerzo/deformación, con cambio en el número de ciclos de acuerdo con el tipo de material. Juvinall y Shigley sugieren 10^3 ciclos y Madayag lo define de 10^3 a 10^4 ciclos como límite [35]. Por otra parte, [46], diferencia la pendiente de fatiga de bajos ciclos (menos de 1000 ciclos) de la fatiga convencional (entre 10^3 y 10^6 ciclos aproximadamente) y de la fatiga de alto ciclado (de 10^6 en adelante). Para este trabajo se tomará como referencia al igual que Roberto L. (2008) , que $N = 10^3$ ciclos es una aproximación razonable para dividir el LCF del HCF.

El comportamiento a fatiga de cualquier material, incluyendo los polímeros reforzados, no sólo depende del nivel máximo de tensión a que está sometido sino también del tipo de tensión cíclica que recibe. De todos los parámetros que definen la evolución temporal de la tensión cíclica (*Figura 1-19*) se admite comúnmente que los valores de tensión máxima y mínima (σ_{\max} y σ_{\min}) y su cociente (el cual se define como índice de reversión o relación de esfuerzos, $R_e = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) son los valores imprescindibles para su caracterización. En cambio, otros parámetros como la frecuencia o la forma de la evolución temporal del ciclo de tensión pueden considerarse que tienen una influencia más bien escasa. Otra forma de identificar correctamente la tensión cíclica es a través de la tensión media ($\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$) y la tensión alterna ($\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$) [47].

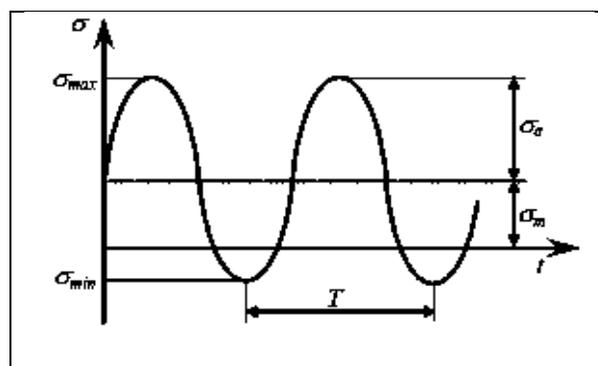


Figura 1-19. Carga cíclica típica de periodo T [47].

A partir de los diferentes valores que puede tomar R, es posible identificar la naturaleza de la tensión variable. Para valores de R_e comprendidos entre $-\infty$ y 0 se puede decir que la

tensión es de tracción – compresión (T–C), teniendo en cuenta que un valor de -1 indica una carga simétricamente oscilante. Cuando R_e toma valores entre 0 y $+1$ indica tensión de sólo tracción (T–T). Y se definen tensiones de sólo compresión (C–C), cuando R_e alcanza valores entre $+\infty$ y $+1$. La tensión a compresión o tracción es estacionaria para un valor límite de R_e igual a $+1$ [35; 46; 47].

Una revisión detallada de los modelos más relevantes utilizados para materiales compuestos, sobre todo para GFRP muestran que muchos de los modelos utilizan ecuaciones empíricas ajustadas a los datos de fatiga para cada valor de relación de esfuerzos R_e . Algunos autores desarrollan modelos que sean generalmente aplicables para varios valores de R_e [46], donde se pueda tener una única función con dos variables del tipo $N = f(S_{max}, R_e)$, sin embargo existen dificultades para generalizar todo el campo donde se abarquen cargas del tipo tensión-tensión (T-T), tensión-compresión (T-C) y compresión-compresión (C-C). Basado en el ajuste de familias de curvas hiperbólicas, [48], desarrolló un modelo estadístico general, el cual tiene una buena aplicación para el fenómeno de fatiga en materiales metálicos o cerámicos, donde no se contemplan las cargas cíclicas completamente a compresión (C-C). Este modelo no funciona correctamente si se generaliza, incluyendo a las curvas S-N con $R_e > 1$. Se desarrolló otro modelo [49], aplicado a los PRFV, del cual se obtienen dos ecuaciones, una aplicada a las cargas del tipo T-T y T-C (12) y la otra a cargas del tipo C-C (13).

$$N = \left[1 + \frac{1}{\alpha(1 - R_e)} \left(\frac{S_{ut}}{S_{max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (12)$$

$$N = \left[1 + \frac{1}{\alpha(1 - 1/R_e)} \left(\frac{S_{uc}}{S_{min}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (13)$$

Donde los parámetros de ajuste de ambas ecuaciones (α y β) se obtienen de manera independiente para una y otra ecuación.

Tener modelos generalizados da la oportunidad de obtener las curvas S-N de cualquier tipo de carga de amplitud constante (CAC), mediante la extrapolación de los datos adquiridos a partir de los ensayos ciclados a determinados valores de R . Estas extrapolaciones suelen obtenerse de los conocidos diagramas de vida constante (DVC).

Los DVC son familias de curvas, donde cada línea sobre el plano $\sigma_a - \sigma_m$ muestra la relación entre el esfuerzo medio y el esfuerzo alternativo, (R_e) en un ciclo de vida específico (un

mismo número N) [35]. Su representación gráfica se basa en la relación del esfuerzo alternativo σ_a correspondiente al eje ordenadas contra el esfuerzo medio σ_m correspondiente al eje de las abscisas. A continuación, se muestra una representación de los diagramas de vida constante (Figura 1-20).

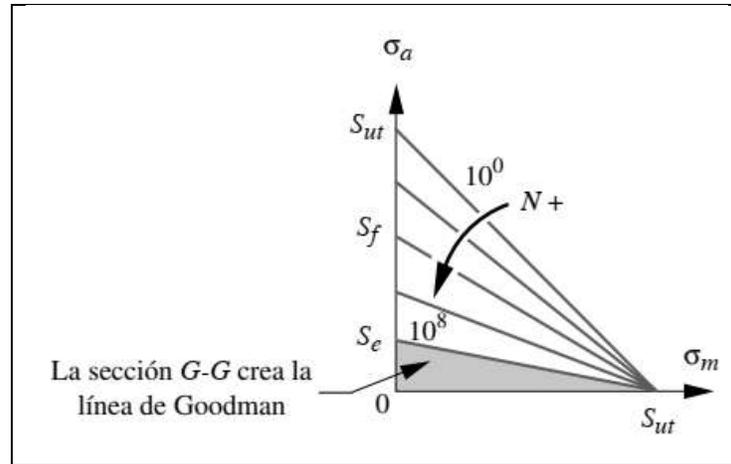


Figura 1-20. La proyección $\sigma_a - \sigma_m$ (diagramas de vida constante) [35].

Los DVC se pueden concebir por diferentes metodologías, cada una con sus respectivos criterios de falla a fatiga. Entre las formas más representativas o conocidas en la literatura [35; 37; 42], se pueden citar, la línea de Goodman modificada, la parábola de Gerber, la línea de Soderberg y la línea de fluencia, las cuales se definen por las ecuaciones (14 - 16) siguientes:

Parábola de Gerber:
$$\sigma_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma_m^2}{S_{ut}^2} \right) \quad (14)$$

Línea de Goodman modificada:
$$\sigma_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right) \quad (15)$$

Línea de Soderberg:
$$\sigma_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_y} \right) \quad (16)$$

Aun cuando la parábola de Gerber se ajuste bien a los datos experimentales, haciéndola útil para el análisis de piezas que fallan, la línea de Goodman modificada es un criterio de falla más conservador y se usa más frecuentemente cuando se diseñan piezas sometidas a esfuerzos medios y alternativos positivos. La línea de Soderberg se utiliza con menos frecuencia, en vista de que es demasiado conservadora [35].

Aunque estas alternativas son muy aplicadas y de gran utilidad para el análisis de fatiga en materiales metálicos, en el caso de los materiales compuestos no se cree que sean los métodos más capaces, ya que no tienen en cuenta que entre T-T, T-C y C-C existen diferentes mecanismos de daño que hacen que evaluar únicamente a un R no sea representativo [46]. Por lo que, siguen siendo las curvas S-N, una de las metodologías muy utilizadas en la industria para calcular la vida a fatiga de componentes estructurales cuando son sometidos a las cargas de servicio.

1.3.3.2 Modelos de estimación de la degradación de propiedades mecánicas

El daño de un material, a nivel microestructural, generalmente se establece por mecanismos tales como, la rotura de fibras, la formación de grietas en la matriz, la rotura de la interfase entre la fibra y la matriz (“*debonding*”), el pandeo de la fibra bajo esfuerzos de compresión y el despegue entre láminas adyacentes o delaminación, como se muestra en la *Figura 1-21* [50].

Como consecuencia de la presencia de estos modos de deterioro microestructural, a nivel macroscópico existen factores que reflejan dicho daño de forma interna la estructura del material, como una degradación de las propiedades elásticas y de la resistencia residual. A continuación, se establece una descripción más detallada de estos elementos.

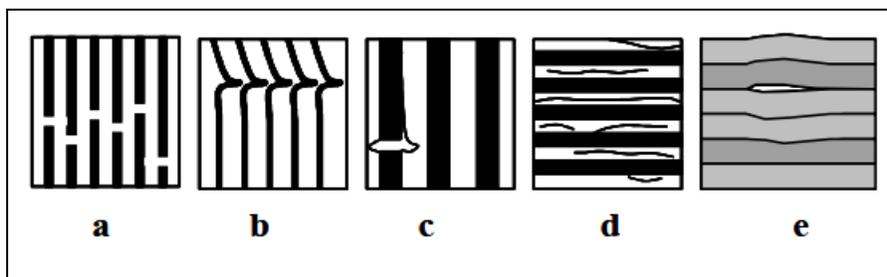


Figura 1-21. Mecanismos de daño en compuestos. a) rotura de fibras, b) pandeo de fibra por esfuerzos de compresión, c) debonding d) agrietamiento en la matriz, e) delaminación [50].

1.3.3.2.1 Degradación de la resistencia a rotura

Son varios los modelos de degradación [37; 42; 46; 51] de la resistencia a fatiga que se han ido desarrollando con el paso de las décadas. Estos modelos están basados fundamentalmente en el decrecimiento de la resistencia a la rotura en función de los ciclos y del tipo de carga aplicada. Son modelos en los cuales se asumen condiciones iniciales y finales en donde el valor inicial de resistencia es igual al esfuerzo de rotura del material

($S_{res} = S_{ut}$), y el valor final de resistencia es igual al esfuerzo máximo aplicado durante el ciclado ($S_{res} = S_{max}$) [46].

En los modelos de degradación por fatiga, la estimación del deterioro de la resistencia debido a la fatiga, constituye la variable fenomenológica más aceptada y utilizada para medir el daño [47]. Esto se debe a la relación directa existente entre la resistencia residual (S_{res}) y el esfuerzo máximo (S_{max}) aplicado durante el ciclado, que consiste en que la rotura del material se produce cuando se establece la relación siguiente $S_{res} \leq S_{max}$. Este fenómeno se muestra gráficamente en la *Figura 1-22*.

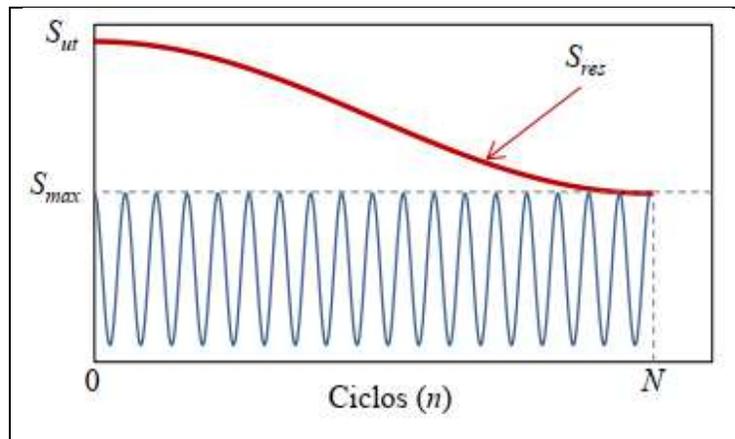


Figura 1-22. Esquema de degradación de resistencia a rotura (a medida que se dan los ciclos de fatiga, el momento en el que la resistencia residual se iguala al esfuerzo máximo aplicado ($S_{res} \leq S_{max}$) se da la rotura) [46].

En la práctica, el esfuerzo residual es una propiedad que no puede ser usada para determinar el estado de daño por fatiga de una estructura en servicio. Esto se debe a la imposibilidad de medir el esfuerzo de rotura de un material sin antes haberle hecho un ensayo destructivo. Un segundo problema consiste en la dificultad de obtener datos adecuados para validar los modelos existentes ya que existe una doble fuente de dispersión. La primera fuente de dispersión es la variabilidad existente en la resistencia a rotura inicial, y la segunda es la variabilidad en la vida a fatiga [46].

1.3.3.2 Modelos de degradación de la rigidez

Una alternativa a los problemas de medir la resistencia residual, es establecer una métrica de daño con una propiedad mecánica del material que se pueda medir de manera no destructiva, y la alternativa más común es la degradación de la rigidez.

La degradación de la rigidez es una función decreciente en función de los ciclos y el tipo de carga aplicado [52], la cual generalmente se da en tres etapas o fases (*Figura 1-23*). Una primera etapa consiste en la degradación rápida de la rigidez causada grietas que aparecen en la matriz de manera transversal, las cuales constituyen el mecanismo de daño dominante en esta etapa. En la segunda etapa, los mecanismos de daño dominantes son las delaminaciones entre capas con diferentes orientaciones de las fibras y las grietas longitudinales, y la degradación de la rigidez ocurre un poco más lenta y de forma casi lineal. La última etapa representa el daño generalizado del material, ya que ocurre la caída infranqueable de la rigidez debido a la rotura de las fibras.

Como bien se refleja en la literatura [4; 46; 47], muchos de estos modelos se basan en la hipótesis de que el fallo ocurre cuando las deformaciones unitarias producidas por la carga de fatiga, igualan a las deformaciones unitarias producidas por la aplicación de la carga de rotura estática. Este método tiene como ventaja que puede utilizarse como un método no destructivo. Además, es considerado como referencia métrica de daño para comparar diversos métodos de evaluación no destructiva. Pero como todo, también tiene su desventaja y es que, para estimar la rigidez de la estructura, se requiere contar con los utensilios adecuados y el ensayo se debe realizar en condiciones de carga bien controladas.

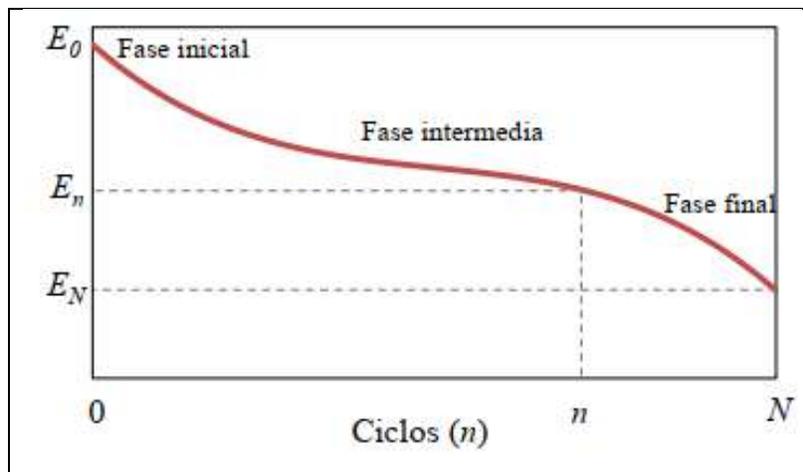


Figura 1-23. Esquema de degradación de rigidez (a medida que se dan los ciclos de fatiga, se pueden observar las tres fases de degradación) [46].

1.3.4 Mecanismos de fallo por fatiga en materiales compuestos de matriz polimérica

Según estudios realizados por diferentes autores [39; 53-56] sobre el comportamiento a fatiga de materiales poliméricos; el fallo a fatiga de algunos polímeros reforzados con fibras,

dependiendo de la amplitud de la tensión y de la frecuencia de aplicación del esfuerzo, se puede clasificar o describir por dos vías principales: fallo por fatiga térmica y fallo por fatiga mecánica.

1.3.4.1 Fatiga por fallo térmico de compuestos poliméricos

Cuando un material polimérico es sometido a una variación de cargas repetidas por encima del nivel de tensión crítico, una parte de la energía producida es almacenada por el material como consecuencia de su deformación y la otra parte se consume de forma irreversible, como resultado del calentamiento por fricción provocado por los movimientos moleculares, mejor conocidos como transiciones o relajaciones viscoelásticas. Debido a que estos tipos de materiales no son buenos conductores térmicos, gran parte de la energía producida en forma de calor no es disipada, por lo que ocurre un incremento de su temperatura, dependiente del calor específico. Dicha generación de calor está influenciada por el estado tensional aplicado, la frecuencia impuesta, las condiciones térmicas de partida y la fricción interna. Por otro lado, la disipación de calor depende de la geometría y dimensiones de la probeta, así como de la conductividad térmica del material.

Cuando la velocidad de transferencia de calor a los alrededores, por cualquiera de los mecanismos de transmisión, ya sea por conducción, convección o radiación, es inferior a la velocidad con que se genera el calor, se alcanzan las condiciones de inestabilidad térmica. En este caso, la temperatura del material aumenta, lo que conlleva que sus propiedades mecánicas disminuyan hasta que sus valores críticos alcancen el nivel de la carga aplicada, produciéndose la rotura. Este fenómeno se denomina fallo térmico [39; 57].

En un experimento cuando la velocidad de transferencia de calor generada desde la superficie de la probeta a los alrededores es igualada a la velocidad de generación de calor en su seno, se logra la llamada estabilidad térmica, la cual se alcanza en un valor constante para el cual el material es capaz de soportar los esfuerzos a los que está sometido.

De forma general, como ya se explicó antes, la generación de calor en un material polimérico se produce por fricción, resultado del deslizamiento de algunos segmentos de la cadena con respecto a otros. Como consecuencia directa de su naturaleza viscoelástica, los polímeros presentan propiedades mecánicas dependientes del tiempo. Es por ello que, al aplicar una determinada tensión externa variable sobre los mismos, su respuesta con respecto al

esfuerzo aplicado, es una deformación diferida o retrasada en el tiempo, acompañado de un calentamiento durante su estiramiento. Y es el propio sistema el encargado de proporcionar la energía necesaria para realizar este tipo de trabajo.

1.3.4.1.1 Consideraciones energéticas del comportamiento en fatiga

Haciendo uso de las ecuaciones que describen el comportamiento viscoelástico de los polímeros es posible modelizar analíticamente los mecanismos que conducen al fallo térmico, obtenido experimentalmente a través de ensayos mecánicos dinámicos en fatiga, donde el polímero se somete a una tensión o deformación sinusoidal oscilatoria.

Se puede expresar la variación cíclica tensional aplicada sobre un material polimérico mediante una relación matemática armónica (17), quedando de la manera siguiente:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin \omega_0 t \quad (17)$$

Donde, $\sigma(t)$ es la tensión al tiempo t , σ_0 es el valor de pico del ciclo de tensión y $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ es la frecuencia angular, siendo ν la frecuencia de la sollicitación aplicada.

En caso de ser lineal el comportamiento viscoelástico del material, su deformación (ε), tendrá oscilaciones sinusoidalmente y la señal estará desfasada con la tensión un cierto ángulo de desfase, δ , que es función de ω_0 .

Tomando en cuenta el desfase δ de la tensión con respecto a la deformación, es posible expresar su función a partir de la función senoidal (18), como muestra (19).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega_0 t \quad (18)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin \omega_0 t + \delta \quad (19)$$

expresión que desarrollada queda:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin \omega_0 t \cdot \cos \delta + \sigma_0 \cdot \cos \omega_0 t \cdot \sin \delta \quad (20)$$

La *Figura 1-24*, muestra cómo sería la representación gráfica del desfase, δ , entre las señales de la tensión aplicada, $\sigma(t)$, sobre el material y su respuesta en deformación, $\varepsilon(t)$, en función de ωt .

Asimismo, se ha representado en la misma figura, para el instante correspondiente a la máxima sollicitación, el incremento de deformación, $\Delta\varepsilon(\delta)$, experimentado por el material, durante el citado desfase, en el que se produce un decremento de tensión $\Delta\sigma(\delta)$. También se representa el valor de la deformación remanente ($\varepsilon_{\text{remanente}}$) cuando la tensión se anula.

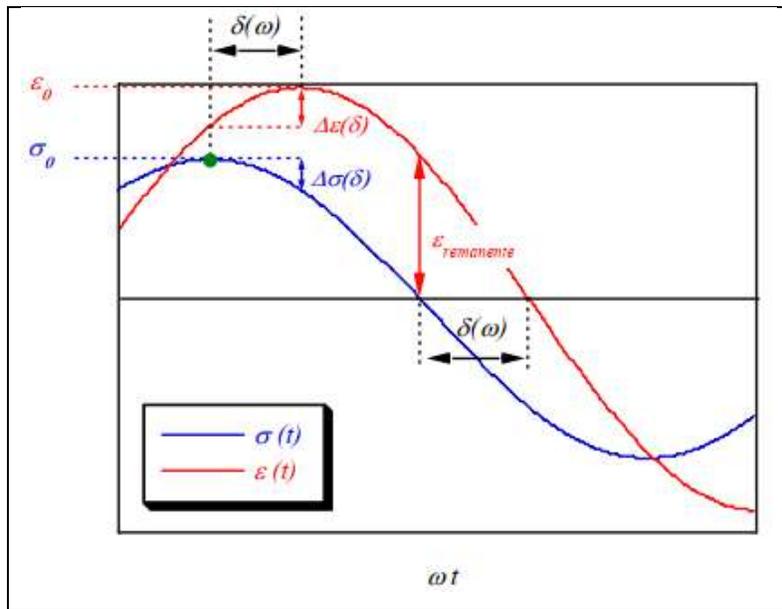


Figura 1-24. Desfase entre las ondas de tensión y deformación [39].

A través de variables complejas y bajo la definición de un módulo de elasticidad dinámico complejo, E^* , el comportamiento mecánico en régimen dinámico (21) se modeliza según la expresión siguiente:

$$E^* = \frac{\delta^*}{\varepsilon^*} = \frac{\delta_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\delta} = \frac{\delta_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \delta + i \frac{\delta_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \delta = E \cdot e^{i\delta} \quad (21)$$

que también se puede formular como:

$$E^* = E \cdot \cos \delta + iE \cdot \sin \delta = E'(\omega) + iE''(\omega) \quad (22)$$

Donde, E' , es el término correspondiente a la parte real y representa, para $\varepsilon_0 = 1$ la componente de la tensión que se encuentra en fase con la deformación y es proporcional a la energía que el material almacena como consecuencia de su deformación, de forma reversible y recuperable, estando asociado al comportamiento elástico (acumulativo):

$$E'(\omega) = \frac{\delta_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \delta \quad (23)$$

Por otro lado, el término correspondiente a la parte imaginaria, E'' , representa igualmente, para $\varepsilon_0 = 1$, la componente de la tensión que se encuentra desfasada $\pi/2$ con la deformación y es proporcional a la energía que el material disipa irreversiblemente, estando asociada al comportamiento inelástico (disipativo):

$$E''(\omega) = \frac{\delta_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \delta \quad (24)$$

Por estas razones, E' y E'' son llamados módulos de acumulación y de disipación, respectivamente.

Las expresiones anteriores conllevan unas condiciones energéticas, que se describen gráficamente en el diagrama σ - ϵ de la *Figura 1-25*, en donde se representa únicamente medio ciclo inicial de carga y descarga, correspondiente al estado de tensión en tracción. Se puede apreciar el comportamiento de tipo no hookeniano del polímero, y la aparición del fenómeno de histéresis que se observa en la descarga hasta llegar a la situación de tensión nula, con una deformación remanente, $\epsilon_{\text{remanente}}$. A pesar de que el término de histéresis sólo es aplicable estrictamente cuando el material recupera su forma original, o sea, deformación remanente nula, en muchos polímeros se produce esta deformación remanente final, posterior a la aplicación de un ciclo de carga, incluso para esfuerzos aplicados inferiores al de su límite elástico, pudiendo recuperar parte de ella de forma diferida en el tiempo.

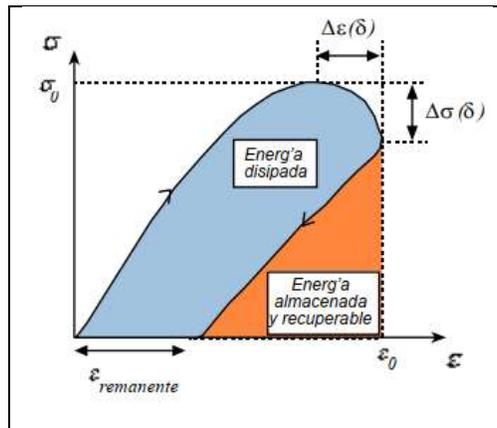


Figura 1-25. Diagrama tensión-deformación [39].

El valor del módulo correspondiente a la expresión compleja (25), o módulo de elasticidad así definido, es:

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} = \frac{\delta_0}{\epsilon_0} \quad (25)$$

que corresponde al que se modeliza en campo real.

1.3.4.2 Fallo por fatiga mecánica

Son muchos los factores de los que dependen los mecanismos de fallo por fatiga mecánica de PRF. Un ejemplo de ello es la secuencia de apilamiento, ya que la aparición de grietas y seguido la delaminación de la matriz puede estar provocado por los esfuerzos interlaminares generados por las diferentes orientaciones de las capas de los laminados. Otro factor es el

tipo de proceso de fabricación del material, ya que uno de los mecanismos de fallo puede ser la aparición de pequeños defectos. Un tercer factor es el tipo de carga cíclica aplicada, dentro de estas diferencias se encuentran diferentes valores de R para cargas de amplitud constante o secuencias de cargas de amplitud variable de diferente severidad, si la carga cíclica es de compresión o tracción, etc. La magnitud de la carga es otro factor potencial, ya que cargas muy cercanas al límite último del material pueden genera roturas de las fibras desde el principio de los ciclos, mientras que a menor carga las roturas de las fibras son consecuencia del deterioro de la matriz [46; 53; 56].

Existen tres fases o etapas que describen las fallas por fatiga [35]: inicio de la grieta, propagación de la grieta y fractura repentina debida al crecimiento inestable de la grieta. La primera etapa puede ser de corta duración, la segunda implica la mayoría de la vida de la pieza y la tercera es instantánea.

Además de sufrir fallos por fatiga térmica, los materiales poliméricos también pueden sufrir fatiga mecánica convencional, que causa un debilitamiento progresivo del material, seguido de su rotura como consecuencia de la propagación de fisuras o defectos inesperados en el mismo. Generalmente, dichas fisuras se propagan de forma estable por toda la sección normal a la sollicitación impuesta, lo que provoca un aumento gradual de los esfuerzos locales y globales netos aplicados hasta lograr la resistencia del material, dando lugar a la ocurrencia de su rotura brusca.

La frecuencia o velocidad de deformación con que se aplican los esfuerzos sobre un material viscoelástico es una variable de gran relevancia, que puede establecer, a un nivel de tensiones particular, el tipo de fallo por fatiga, ya sea térmico o mecánico. Una frecuencia de aplicación de esfuerzos alternos suficientemente baja sobre un polímero puede establecer su modo de rotura por fatiga puramente mecánica [39; 53; 54].

Con el objetivo de cuantificar la velocidad de crecimiento de la fisura por ciclo como una función del tiempo bajo carga, se establece una relación de la fisuración (26) en base a dos contribuciones diferentes. Donde, el crecimiento de la fisura debido al proceso real de la fatiga constituye una de las componentes, de tal forma que cada ciclo introduce una cierta cantidad de daño y su consecuente extensión de grieta. La segunda componente es el crecimiento de la fisura como resultado de la fluencia viscoelástica, cuyo valor es proporcional al tiempo bajo carga.

$$\frac{da}{dN_{Total}} = \frac{da}{dN_{fatiga}} + \frac{da}{dt_{fluencia}} \times \frac{dt}{dN} = \frac{da}{dN_{fatiga}} + \frac{da}{dt_{fluencia}} \times \tau \quad (26)$$

Donde:

$\frac{dt}{dN}$: periodo de tiempo de la oscilación cíclica,

τ : inversa de la frecuencia ν_0 , Período.

De esta relación matemática se puede interpretar que cuando la frecuencia de la sollicitación es baja, los incrementos térmicos son menores y los mecanismos que producen el fallo del material son los de fatiga y fluencia acoplados, que dan lugar a una rotura por fatiga de tipo mecánica. Mientras que se está en presencia de un mecanismo de fallo térmico cuando para una variación tensional dada, una frecuencia de oscilación de carga elevada puede producir fuertes incrementos de temperatura en el polímero.

CAPÍTULO 2. ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA EL DESARROLLO EXPERIMENTAL

El conocimiento de las propiedades de los materiales utilizados en Ingeniería es un aspecto fundamental para el diseñador en su propósito de desarrollar las mejores soluciones a las diversas situaciones que se presentan en su cotidiano quehacer. La realización correcta de ensayos en los materiales, permite conocer su comportamiento ante diferentes circunstancias, al igual que la determinación de sus propiedades fundamentales.

El Capítulo II, aborda aspectos fundamentales que permitirán determinar la metodología a emplear para el estudio de resistencia a la fatiga de una matriz polimérica con refuerzos de fibra de vidrio para su utilización en la fabricación de álabes de aerogeneradores de pequeñas capacidades de potencia; y de la misma manera, explica el desarrollo experimental utilizado para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos empleados para esta investigación.

2.1 Técnicas de caracterización de los materiales compuestos

Como respuesta al creciente uso y a la implementación de los materiales compuestos con fibra en la industria, la ASTM (American Society of Testing Materials) ha concebido una serie de prácticas estandarizadas que permiten determinar propiedades mecánicas fundamentales para la caracterización de estos materiales. Algunas de estas prácticas se recogen en la Tabla 2-1:

Tabla 2-1. Normas ASTM para la caracterización de materiales compuestos [58].

| Propiedades generales | Detalles | Normas |
|------------------------------------|--|--|
| Esfuerzo de tensión en compuestos. | Resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, tenacidad, deformación a la falla y la relación de Poisson en las direcciones axial y circunferencial. | ASTM D3039 Propiedades de tracción de los materiales compuestos de la matriz polimérica. |
| | Resistencia a la tracción circunferencial y resistencia aparente. | ASTM D2290 Resistencia a la tracción circunferencial aparente del plástico o tubo de plástico reforzado. |

| | | |
|--|--|--|
| Resistencia de unión de los compuestos. | Resistencia al corte y resistencia adhesiva interlaminada. | ASTM D3165 Propiedades de resistencia de los adhesivos en cizallamiento por carga a tracción de ensamblajes laminados de una sola vuelta. |
| Dureza en compuestos. | Dureza Barcol. | ASTM 2583 Dureza de indentación de plásticos rígidos por medio de un Barcol. |
| | Dureza Shore. | ASTM D2240 Propiedad de caucho - Dureza del durómetro. |
| Coeficiente de expansión térmica. | Coeficiente de expansión lineal térmica. | ASTM E831 Expansión linear térmica de materiales solidos por análisis termomecánico. |
| Temperatura de transición vítrea (Tg) o, temperatura de distorsión de calor (HDT). | Temperatura de transición vítrea. | ASTM E1640 Asignación de la temperatura de transición vítrea mediante análisis mecánico dinámico (DMA). |
| | Temperatura de transición vítrea. | ASTM D6604 Temperatura de transición vítrea de resinas de hidrocarburos por escaneo diferencial calorimétrico (DSC). |
| | Temperatura de distorsión. | ASTM D648 Temperatura de deflexión de plásticos bajo carga de flexión en la posición de Edgewise. |
| Módulo de compresión. | Módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, deformación más allá del punto de fluencia, y esfuerzo de compresión. | ASTM D695 Propiedades a compresión de plásticos rígidos. |
| | Esfuerzo último de compresión, deformación ultima de compresión, módulo de elasticidad a compresión, y razón de Poisson en compresión. | ASTM D6641 Propiedades de compresión de materiales compuestos de matriz polimérica usando un accesorio de prueba de compresión de carga combinada (CLC). |

2.1.1 Norma ASTM D3039: Método de prueba estándar para propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica

La norma ASTM D3039, como bien lo indica su nombre, constituye un método de prueba estándar que permite determinar las propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados por fibras de alto módulo. Las formas de material compuesto están limitadas a fibra continua o compuestos discontinuos reforzados con fibras en los que el laminado está equilibrado y es simétrico con respecto a la dirección de prueba. Dicha prueba consiste en montar una tira plana delgada de material que tiene una sección transversal rectangular constante sobre los agarres de una máquina de prueba mecánica, la cual se carga monótonamente en tensión mientras se registra la carga.

Este método de prueba está diseñado para conocer las propiedades de tracción para la especificación de materiales, investigación y desarrollo, garantía de calidad y diseño y análisis estructural. Lo que lo hace ideal para la determinación de un modelo experimental descriptivo, que permita la predicción del comportamiento mecánico de los materiales compuestos al ser sometidos a valores máximos de tensión una vez empleados en la fabricación de aspas para turbinas eólicas de baja potencia.

Las propiedades, en la dirección de la prueba, que se pueden obtener a partir de este método incluyen las siguientes: Máxima resistencia a la tracción, deformación máxima a la tracción, módulo de elasticidad de fibra a tracción, relación de Poisson y deformación de transición. Además, la norma cita una serie de factores que pueden influir en la respuesta a la tracción y que, por lo tanto, deben tenerse muy en cuenta. Dichos factores lo constituyen el material, el método de preparación del material y apilamiento, la secuencia de apilamiento de muestras, la preparación de muestras, el acondicionamiento de muestras, el entorno de prueba, la alineación y agarre de muestras, la velocidad de prueba, el tiempo a temperatura, el contenido vacío y el porcentaje de volumen de refuerzo.

Además de lo anterior, la norma brinda sugerencias y pautas sobre la geometría de las probetas a utilizar. De acuerdo con lo especificado por la norma (*Tabla 2-2*), las probetas son de carácter rectangular con sección transversal continua. Se sugiere el uso de pestañas de sujeción en caso de querer inducir la falla en la longitud calibrada. Sin embargo, estas requieren preparación adicional para el pegado de estas sobre la superficie del compuesto,

lo cual, en caso de no ser controlado, puede inducir en concentradores de esfuerzo o posibles inicios de falla:

Tabla 2-2. Geometría recomendada de probetas de tensión [58].

| Orientación de la fibra | Ancho mm [in] | Largo general mm [in] | Grosor mm [in] | Longitud de las pestañas mm [in] | Grosor de las pestañas mm [in] |
|-------------------------|---------------|-----------------------|----------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 0° Unidireccional | 15 [0.5] | 250 [10.0] | 1.0 [0.040] | 56 [2.25] | 1.5 [0.062] |
| 90° Unidireccional | 25 [1.0] | 175 [7.0] | 2.0 [0.080] | 25 [1.0] | 1.5 [0.062] |
| Balanceada y simétrica | 25 [1.0] | 250 [10.0] | 2.5 [0.100] | Tela de esmeril | - |
| Aleatoria - discontinua | 25 [1.0] | 250 [10.0] | 2.5 [0.100] | Tela de esmeril | - |

Finalmente, la norma ASTM D3039 brinda indicaciones sobre los típicos modos de falla encontrados en los especímenes de tensión (*Figura 2-1*), y de esta manera establece un código de categorización de acuerdo con el tipo de falla, el área de falla, y la localización de la misma en el cuerpo del espécimen:

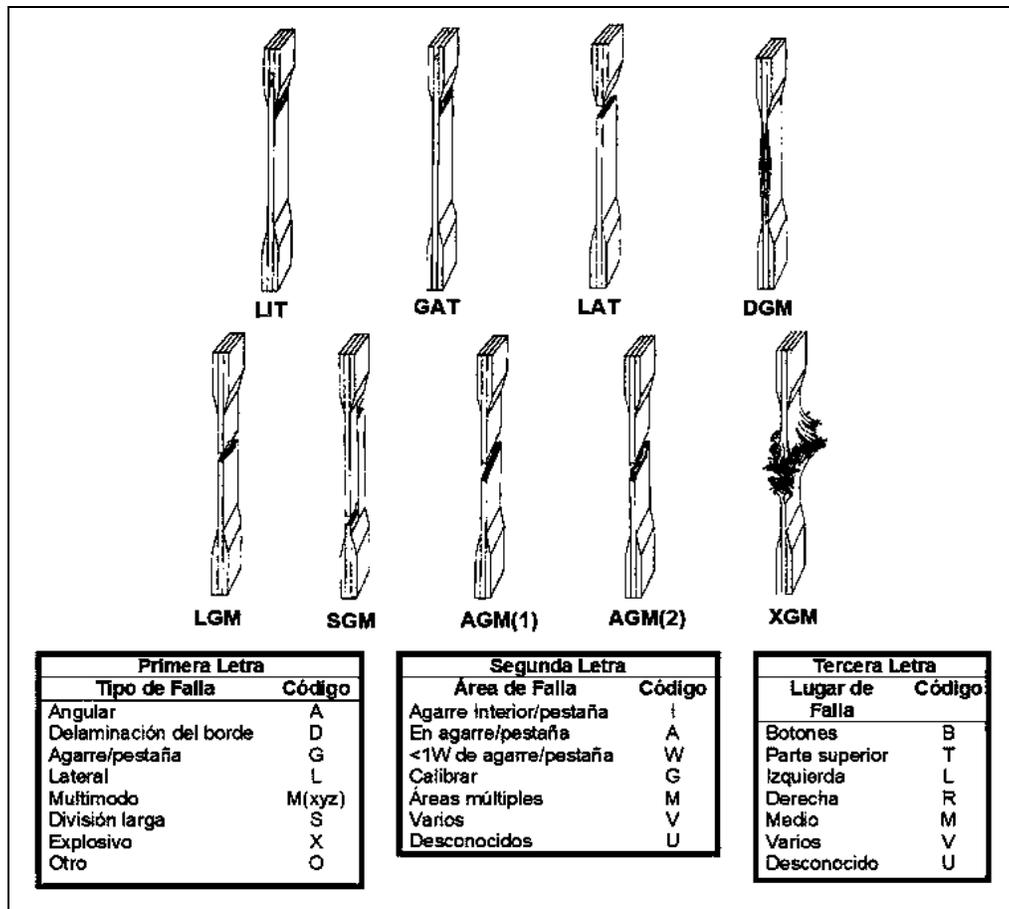


Figura 2-1. Modos típicos de falla a fatiga y su codificación de acuerdo a la ASTM D3039 [58].

2.2 Modelo numérico

La simulación computacional es una herramienta ampliamente utilizada en la actualidad por ingenieros, proyectistas y empresas en general para el análisis y la mejora de la calidad de productos y proyectos en desarrollo. Estos estudios, en su mayoría, son llevados a cabo mediante el uso de software que utilizan el análisis de elementos finitos (AEF), y que permiten obtener soluciones aproximadas de problemas que son susceptibles de ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales. En ingeniería, la mayoría de los procesos actuales están definidos de dicha forma, por lo que estos programas permiten obtener productos de calidad superior y a menor costo, mejorar procesos existentes, y estudiar el fallo de un componente estructural determinado.

2.2.1 Modelos de elementos finitos (MEF)

El método de elementos finitos es un procedimiento numérico que se puede utilizar para obtener soluciones a una gran clase de problemas de ingeniería que implican análisis de tensiones, transferencia de calor, electromagnetismo y flujo de fluidos [59].

2.2.1.1 Pasos básicos en el método de elementos finitos

Los pasos básicos involucrados en cualquier análisis de elementos finitos consisten en lo siguiente [59; 60]:

- Fase de pre-procesamiento
 - (1) Crear y discretizar el dominio de la solución en elementos finitos; es decir, subdividir el problema en nodos y elementos.
 - (2) Asumir una función de forma para representar el comportamiento físico de un elemento; es decir, se supone que una función continua representa el comportamiento aproximado (solución) de un elemento.
 - (3) Desarrollar ecuaciones para un elemento.
 - (4) Ensamblar los elementos para presentar todo el problema. Construcción de la matriz de rigidez global.
 - (5) Aplicar condiciones de contorno, condiciones iniciales y carga.
- Fase de solución

- (6) Resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales simultáneamente para obtener resultados nodales, como valores de desplazamiento en diferentes nodos o valores de temperatura en diferentes nodos en un problema de transferencia de calor.
- Fase de post-procesamiento
- (7) Se obtiene otra información importante. En este punto, se puede estar interesado en los valores de tensiones principales, flujos de calor, etc.
- (8) En general, hay varios enfoques para formular problemas de elementos finitos, entre los que se pueden citar los siguientes: formulación directa, formulación de energía potencial total mínima, y formulaciones residuales ponderadas. Es válido puntualizar, que los pasos básicos involucrados en cualquier análisis de elementos finitos, independientemente de cómo se genere el modelo de elementos finitos, serán los mismos que los enumerados anteriormente [59].

2.2.1.2 Conceptos generales del MEF

En síntesis, se puede decir que el método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Donde, las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo, serán también las encargadas de regir el comportamiento del elemento. Esto permite pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no [61; 62]. En un sistema a analizar, es necesario tener en cuenta las siguientes definiciones (Figura 2.2):

- Dominio: Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor, etc.
- Incógnitas: Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas.

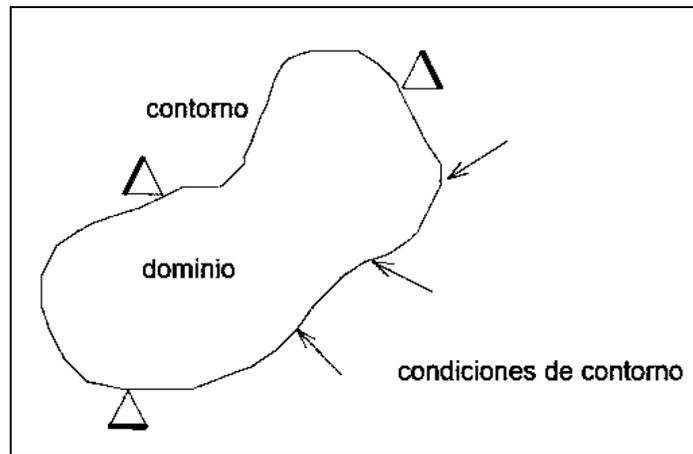


Figura 2-2. Representación de las definiciones que influyen en un sistema a analizar por el MEF [61].

Para resolver un problema por el método de los elementos finitos, este supone, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. En el caso de ser un sistema lineal, el dominio se divide mediante puntos, no así para el caso bidimensional, que es mediante líneas o superficies, o el tridimensional que se divide mediante volúmenes. Logrando de esta forma, aproximar mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide, el dominio total en estudio. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen: tensiones, deformaciones, etc. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo.

Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo. Por ejemplo, si el sistema a estudiar es una viga en voladizo con una carga puntual en el extremo y una distribución de temperaturas tal y como se muestra a continuación (Figura 2.3):

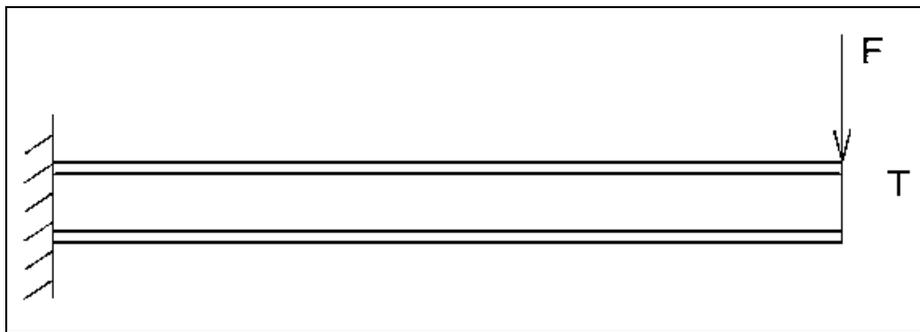


Figura 2-3. Viga en voladizo con carga puntual en el extremo [61].

A continuación, se ilustra (Figura 2.4) cómo podría ser un dominio discretizado:

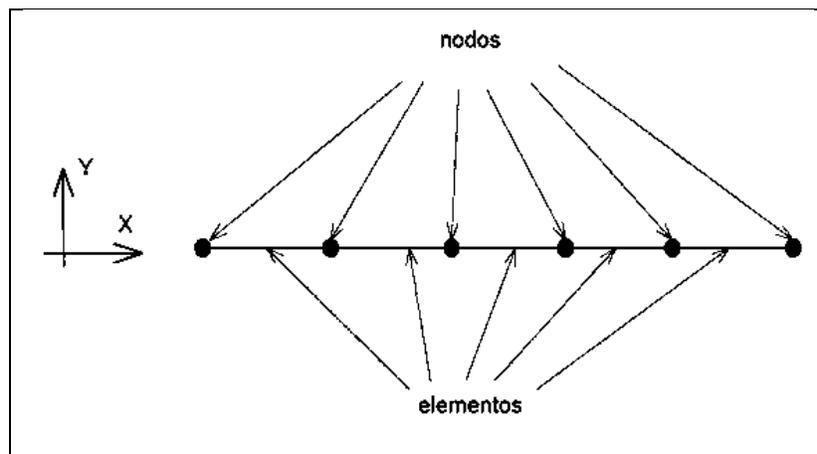


Figura 2-4. Ejemplo de discretización de un dominio determinado [61].

Los grados de libertad de cada nodo serán:

- Desplazamiento en dirección x
- Desplazamiento en dirección y
- Giro según z
- Temperatura

El sistema, debido a las condiciones de contorno: empotramiento, fuerza puntual y temperatura, evoluciona hasta un estado final. En este estado final, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema podemos determinar cualquier otra incógnita deseada: tensiones, deformaciones, etc. También es posible obtener la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad. Planteando la ecuación diferencial que rige el comportamiento del continuo para el elemento, se llega a fórmulas que relacionan el comportamiento en el interior del mismo con el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este paso se realiza por medio de unas funciones llamadas de interpolación, ya que

éstas ‘interpolan’ el valor de la variable nodal dentro del elemento. El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento (en el caso estructural serán las llamadas matrices de rigidez, amortiguamiento y masa, aunque esta terminología ha sido aceptada en otros campos de conocimiento) se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas, lineales o no, que resolviéndolas nos proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema.

2.2.1.3 Principios generales aplicados a un continuo elástico

A continuación, se muestran algunas de las ideas básicas relacionadas con los fundamentos matemáticos del MEF aplicadas al caso estructural.

2.2.1.3.1 Ecuaciones de equilibrio. Principio de los Trabajos Virtuales

Muchos problemas de medios continuos vienen expresados mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno sobre la función o funciones incógnitas. Ante la dificultad, y en muchos casos la imposibilidad, de encontrar una solución cerrada, se opta por realizar una aproximación, siendo necesaria la expresión integral del Principio de los Trabajos Virtuales (PTV).

Se considera un continuo elástico como el de la figura sometida a unas fuerzas superficiales $\{t\} = \{t_x, t_y, t_z\}^T$ y a unas fuerzas por unidad de volumen $\{X\} = \{X_x, X_z, X_y\}^T$ (las fuerzas por unidad de superficie podrían ser presiones y el peso propio sería una fuerza por unidad de volumen). El vector desplazamiento lo notamos por $\{u\} = \{u, v, w\}^T$. Las deformaciones correspondientes a estos desplazamientos son (27):

$$\{\mathcal{E}\} = \{\mathcal{E}_{xx}, \mathcal{E}_{yy}, \mathcal{E}_{zz}, \mathcal{E}_{xy}, \mathcal{E}_{yz}, \mathcal{E}_{zx}\}^T \quad (27)$$

y las tensiones debidas a estas deformaciones serán (28):

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}\}^T \quad (28)$$

Las ecuaciones de equilibrio para un elemento diferencial de volumen pueden escribirse de la forma (29):

$$\nabla\{\sigma\} + \{X\} = 0. \quad (29)$$

Donde el vector $\{X\}$ incluye de forma general las fuerzas de inercia (30):

$$\{X\} = \{X\} - \rho\ddot{u} \quad (30)$$

Es decir, consideramos las fuerzas de inercia como fuerzas por unidad de volumen. Multiplicando esta ecuación (29) por una función de ponderación $\{\delta u\}$ e integrando se obtiene:

$$\int_v \{\delta u\}^T \nabla\{\sigma\} dv + \int_v \{\delta u\}^T \{X\} dv = 0 \quad (31)$$

La cual mediante la fórmula de Green se puede escribir (32):

$$-\int_v \nabla\{\delta u\}^T \{\sigma\} dv + \int_s \{\delta u\}^T \{\sigma\} \cdot n ds + \int_v \{\delta u\}^T \{X\} dv = 0 \quad (32)$$

Si se asocia la función de ponderación $\{\delta u\}$ con un desplazamiento virtual, el operador ∇ actuando sobre él será una deformación virtual dada por (33):

$$\{\delta \varepsilon\} = \nabla\{\delta u\} \quad (33)$$

El equilibrio en el contorno exige que se cumpla la relación:

$$\{\sigma\} \cdot \{n\} = \{t\} \quad (34)$$

y sustituyendo en la expresión (32)

$$-\int_v \{\delta u\}^T \{\sigma\} dv + \int_s \{\delta u\}^T \{t\} ds + \int_v \{\delta u\}^T \{X\} dv = 0 \quad (35)$$

La fórmula de Green se obtiene a partir de la relación (36) y del teorema de la divergencia (37):

$$\nabla(ab) = a\nabla b + b\nabla a \quad (36)$$

$$\left(\int_v \nabla a dv = \int_s \overline{a n ds}\right), \quad (37)$$

que nos permite escribir:

$$\int_v a \nabla b = \int_s \overline{ands} - \int_v b \nabla a dv \quad (38)$$

En relación a la expresión anterior es posible introducir la ley de comportamiento del material mediante la matriz elástica con las propiedades de éste, $[C]$, de forma que:

$$\{\sigma\} = [C](\{\mathcal{E}\} - \{\mathcal{E}_0\}) + \{\sigma_0\} \quad (39)$$

siendo los vectores $\{\mathcal{E}_0\}^T$ y $\{\sigma_0\}^T$ las deformaciones y las tensiones iniciales respectivamente. Introduciendo la expresión (39), suponiendo deformaciones y tensiones iniciales nulas, en la ecuación (35), obtenemos

$$-\int_v \{\delta\epsilon\}^T [C] \{\epsilon\} dv = \int_v \{\delta u\}^T (\{X\} - \rho\{\ddot{u}\}) dv + \int_s \{\delta u\}^T \{t\} ds \quad (40)$$

que constituye la formulación del PTV y relaciona el sistema de cargas real y esfuerzos con el virtual de desplazamientos.

2.2.1.4 Funciones de interpolación

Discretizado el continuo, la idea es tomar un conjunto de funciones (funciones de interpolación) que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro del elemento en función de los desplazamientos en los nodos del mismo. Es decir:

$$\{u(x, y, z)\} = [N(x, y, z)]\{U\}, \quad (41)$$

Siendo $\{U\}$ el vector con los desplazamientos nodales. Una vez conocidos los desplazamientos en todos los nodos se determinan las deformaciones:

$$\{\mathcal{E}\} = [D]\{u\} \quad (42)$$

donde $[D]$ es el operador diferencial que depende del problema en estudio. Sustituyendo el valor del desplazamiento tenemos que:

$$\{\mathcal{E}\} = [D][N]\{U\} = [B]\{U\} \quad (43)$$

donde se obtiene el valor de las deformaciones en función de los desplazamientos nodales. Sustituyendo la ecuación anterior en la expresión del PTV (40) tenemos:

$$-\int_v [B]^T [C] [B] \{U\} dv + \int_v [U]^T (\{X\} - \rho [N] \{\ddot{U}\}) dv + \int_s [N]^T \{t\} ds = 0 \quad (44)$$

Reordenando esta ecuación podemos llegar a un sistema de la forma (45):

$$[M] \{\ddot{U}\} + [K] \{U\} = \{P\} \quad (45)$$

donde se definen:

- Matriz de masa consistente (46):

$$[M] = \int_v [N]^T \rho [N] dv \quad (46)$$

- Matriz de rigidez (47):

$$[K] = \int_v [B]^T [C] [B] dv \quad (47)$$

- Matriz de cargas nodales consistentes (48):

$$\{P\} = \int_v [N]^T \{X\} dv + \int_s [N]^T \{t\} ds = 0 \quad (48)$$

La expresión anterior es general y permite determinar las matrices elementales para cualquier tipo de discretización.

2.2.1.5 Síntesis de las características globales

Las anteriores matrices se calculan para cada uno de los elementos. Realizando una transformación de coordenadas a las denominadas coordenadas unitarias del elemento, las matrices quedan en función de parámetros puramente geométricos y se facilita la integración numérica. Antes de proceder al ensamblaje de todas las ecuaciones es necesario realizar la transformación a coordenadas globales con el objetivo de tener todas las matrices formuladas respecto al mismo sistema de coordenadas. Una vez que se dispone de las matrices y vectores elementales en coordenadas globales su acoplamiento en el sistema puede realizarse según el llamado método directo, por el que sumamos en cada posición nodal la contribución realizada por los distintos elementos.

2.2.1.6 Imposición de condiciones de contorno. Solución

Antes de obtener la solución al sistema de ecuaciones planteado es necesario imponer las condiciones de desplazamientos nodales que sean conocidas. El sistema resultante se puede subdividir en dos términos: uno que contenga los desplazamientos impuestos y otro las incógnitas. Resolviendo este sistema tendremos la solución. Una vez conocidos los desplazamientos nodales es posible calcular otro tipo de magnitudes (deformaciones, tensiones, etc.).

2.2.1.7 Métodos adaptativos

Los métodos adaptativos están basados en la estimación de error. Existen principalmente dos métodos para mejorar la exactitud de los resultados de los estudios estáticos:

- El método H

El concepto del método h consiste en la utilización de elementos más pequeños en regiones con altos niveles de error. Después de ejecutar el estudio y estimar los errores, el software automáticamente refina la malla donde sea necesario para mejorar los resultados.

- El método P

El concepto del método p consiste en la utilización de elementos más eficaces en regiones con altos niveles de error. Luego de ejecutar el análisis y estimar los errores, el programa aumenta el orden de los elementos en las regiones cuyo nivel de error es más alto que el nivel especificado por el usuario y vuelve a ejecutar el estudio. El método p no altera la malla, sino que cambia el orden de los polinomios utilizados para aproximar el campo de desplazamiento. La utilización de un orden polinomial unificado para todos los elementos no resulta eficaz. El software incrementa el orden del polinomio sólo donde es necesario. Este método se denomina método p adaptativo selectivo.

2.3 Metodología

La metodología empleada en este proyecto, como muchas de las metodologías empleadas en el diseño de componentes o sistemas mecánicos, requiere de una serie de pasos para determinar una forma idónea de estos. De la misma manera que en el diseño de estos componentes, el diseño de los materiales compuestos es un proceso iterativo en el que deben encontrarse las mejores características del material para la función especificada. Tomando en cuenta la información previamente revisada y comentada en epígrafes anteriores los pasos a seguir en esta investigación son los siguientes:

1. Selección de los materiales constituyentes del compuesto laminado.
2. Definición de la estructura de las capas de fibra de vidrio en el compuesto.
3. Fabricación y preparación de los moldes.
4. Fabricación del material compuesto.
5. Preparación de la probeta.
6. Aplicación de los ensayos experimentales.
7. Análisis y discusión de resultados.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

3.1.1 Selección de los materiales constituyentes

Tomando en cuenta que todo material compuesto requiere de una matriz en su estructura, para este trabajo se empleó como *matriz* la resina poliéster PP – 250 (Anexo 1), de la cual se muestra una imagen en la *Figura 3-1*. Esta resina es muy empleada en la industria mexicana (específicamente y relacionado al presente trabajo, en la fabricación de aspas para aerogeneradores, entre otras). Es un producto con el que se pueden fabricar piezas de manera sencilla y asequible, pues se puede encontrar con facilidad en el mercado nacional y a buen precio. Además, es un material que posee baja densidad y alta resistencia mecánica.

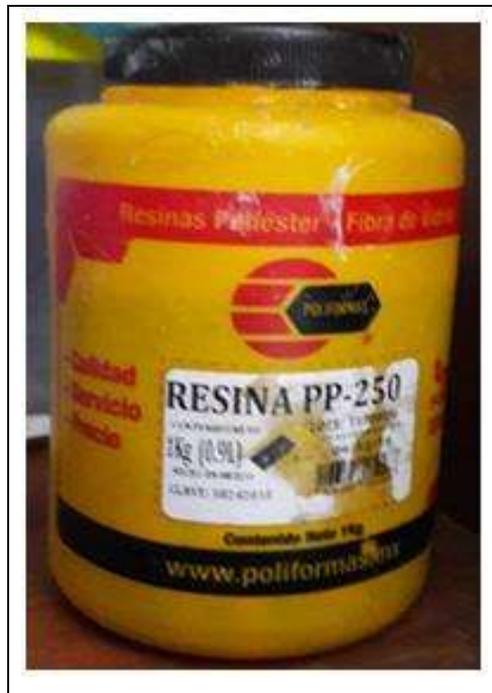


Figura 3-1. Resina poliéster PP – 250. Fuente Propia

En el caso del refuerzo, se seleccionó la fibra de vidrio: Petatillo FRD – 600 (*Anexo 2*), ya que además de ser relativamente barata, es resistente y se consigue en varias empresas mexicanas, aunque también se pueden obtener de importación. Es un material que posee excelentes propiedades mecánicas.

En este caso, ambos constituyentes son de origen nacional, comprados en la empresa Poliformas, para con ello abaratar el producto y así obtener mayores beneficios del mismo (*Figura 3-2*).

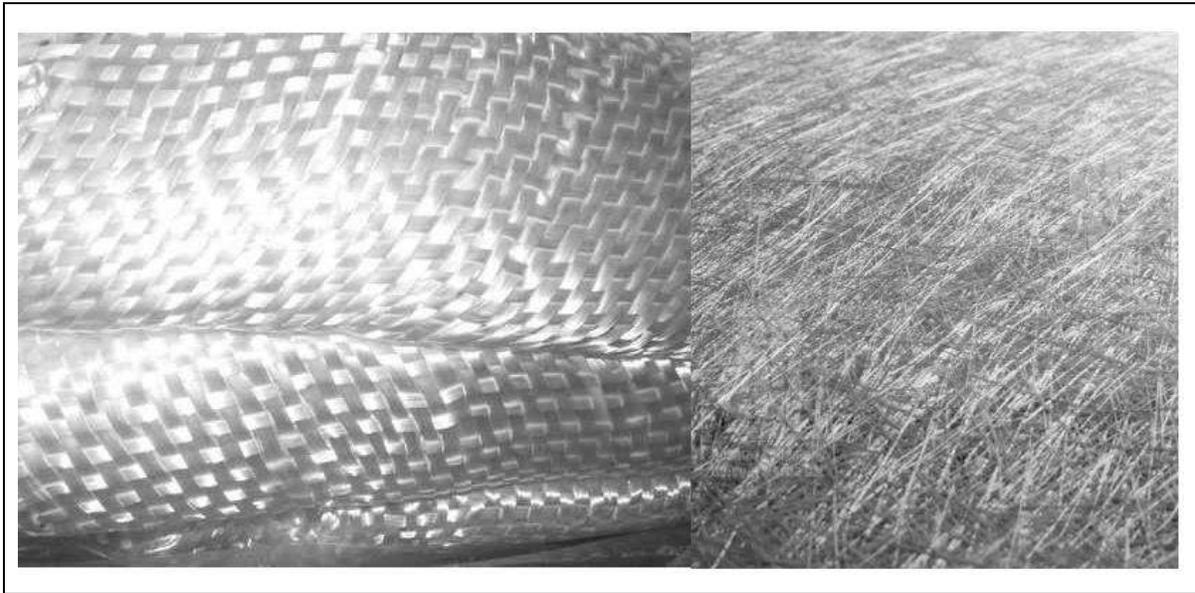


Figura 3-2. Fibra de vidrio: Petatillo FRD – 600. Fuente Propia

3.1.2 Fabricación y preparación de los moldes

Se fabricaron cuatro moldes de MDF, en dos piezas cada uno para ensamblar. Una vez pegadas ambas piezas del molde (*Figura 3-3.a*), los mismos se prepararon con los productos desmoldantes correspondientes para poder separar el material con mayor facilidad una vez transcurrido el proceso de fabricación y secado.

Primeramente, se procede a limpiar la superficie del molde de las impurezas y ácaros que pueda tener. Posteriormente, se aplica la cera, repitiéndose este proceso hasta aplicar entre tres y cinco capas de cera desmoldantes (*Anexo 3*), dejando reposar cada capa entre 10 y 15 minutos, hasta ver que se torna de color opaco. Una vez secada totalmente la cera, se le aplica la misma secuencia de capas, pero esta vez de película separadora (*Anexo 4*) y por último luego de haberse secado la película se le aplica el gel-coat blanco (*Anexo 5*), en nuestro caso se utilizó el de color blanco, el cual se preparó con una proporción de 40 gotas de catalizador (*Anexo 6*), por 100 gramos de gel-coat blanco, siendo este último el más demorado para su secado (*Figura 3-3.b*).

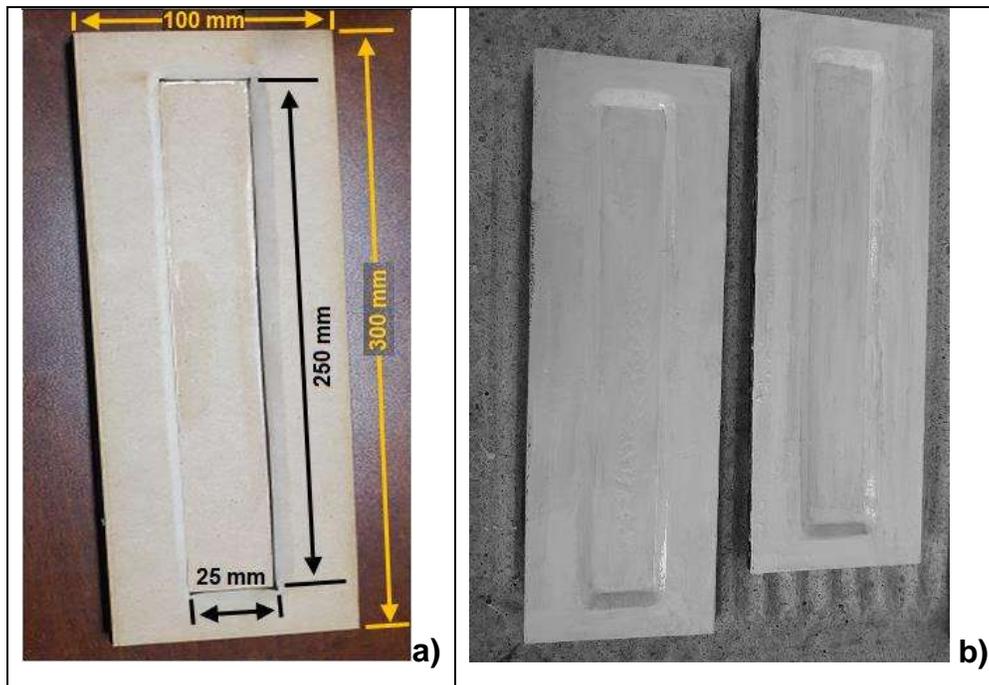


Figura 3-3. Etapas de la preparación de los Moldes a) Pegado de las dos partes de los moldes, b) Acabado final de los moldes. Fuente Propia

3.1.3 Fabricación de los materiales compuestos

En una investigación cuando se requiere realizar la valoración analítica de un material, se requiere obtener las propiedades mecánicas y físicas de una lámina que constituya al laminado, a diferencia del análisis experimental, en el cual se tiene que realizar el laminado y sobre él determinar las constantes elásticas.

Existen diferentes métodos de moldeo para estructuras de materiales compuestos. Generalmente, la técnica de moldeo a elegir depende de la geometría de la pieza, de la aplicación que está va a tener y de los aspectos económicos y tecnológicos con que se disponga.

Para este trabajo, se aplicó el método de tendido manual, aunque es un método para el cual obtener una pieza requiere de mayor tiempo, es un proceso de moldeo sencillo. Consiste en la colocación manual de telas de fibra sobre el molde de la pieza (previamente preparado), para después impregnarla con la resina. El conjunto se cura con o sin calor y usualmente sin aplicar presión.

La configuración del compuesto se diseñó basados en la referencia [3], donde se utilizan varias láminas del mismo materiales o refuerzo, las cuales se encuentran dispuestas en tres

direcciones diferentes, una uniaxial o a 0°C , otra biaxial o a 90°C y una tercera double bia o a 45°C , siendo la orientación de las fibras el factor diferenciador en los compuestos laminados. Durante el proceso de preparación de las probetas se trató de respetar siempre tanto al cortar las fibras como en la elaboración del laminado, el porcentaje volumétrico de los constituyentes (*Tabla 3-1*), como factor para poder establecer posteriormente la similitud de las probetas.

Tabla 3-1. Distribución en peso de los constituyentes de una probeta de material compuesto por fibra de vidrio y resina poliéster. Fuente Propia

| Constituyentes | Orientación de las fibras ($^{\circ}\text{C}$) | Peso de cada lámina (g) | Cantidad de Resina empleada en cada probeta (%resina/fibra) |
|-------------------------------------|--|-------------------------|---|
| Fibras Double bia | Cruce de las fibras a +45 y -45 | 6 | 38.89% |
| Fibras biaxial | Cruce de las fibras a 90 y 0 | 6 | |
| Fibras uniaxial | 90 | 3 | |
| Colchoneta | variable | 3 | |
| Resina | - | 50 | |
| Peso total del Compuesto (g) | | 25 | |

De la *Tabla 3-1*, se obtiene que las probetas de material compuesto ($2.5 \times 25 \times 250 \text{ mm}$) están constituidas por un 38.89% de resina poliéster y un 61.11% de fibra de vidrio, aproximadamente. Predominando en ella el material reforzante.

Luego, se procede a darle la forma deseada a las probetas a partir del compuesto elaborado (*Figura 3-4*), lo que constituye el paso siguiente.

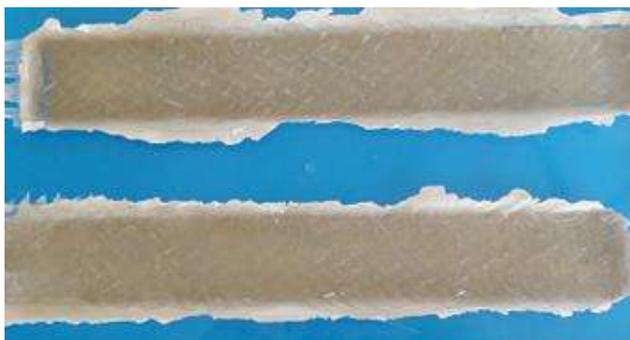


Figura 3-4. Compuesto elaborado. Fuente Propia

3.1.4 Preparación de las probetas

De acuerdo a la norma a ASTM D-3039 y atendiendo a las características exigidas por esta investigación, las dimensiones nominales inicialmente de las probetas para el ensayo fueron de $2.5 \times 25 \times 250 \text{ mm}$, y finalmente se realizó un corte a la mitad, quedando las mismas con

las dimensiones siguientes $2.5 \times 25 \times 120 \text{ mm}$ (Figura 3-5) de acuerdo a las características de la máquina a emplear en la experimentación.



Figura 3-5. Probetas acabadas. Fuente Propia

3.1.5 Ensayos experimentales

3.1.5.1 Determinación del módulo de elasticidad

Al realizar ensayos de fatiga, es importante definir los esfuerzos que actuarán sobre la probeta a ensayar y su variación durante el experimento o ensayo. Con el propósito de determinar el módulo de elasticidad del material a ensayar, se montó un sistema compuesto por una probeta que se sometió a diferentes cargas (P) conocidas y se midieron las respectivas deformaciones (y). Con los resultados obtenidos se realizaron cálculos aplicando las ecuaciones básicas de la rigidez. Se logró determinar el momento de inercia (I) y con ello, se pudo obtener el valor del módulo de elasticidad (E) con muy buena precisión.

En el análisis se utilizaron instrumentos de medición de alta precisión, un pie de rey digital, dinamómetro digital y un comparador de carátulas digital, del ensayo se obtuvieron los resultados que se muestran en la *Tabla 3-2*.

Tabla 3-2. Resultados obtenidos del ensayo experimental. Fuente Propia

| CÁLCULOS EXPERIMENTALES | | | | |
|-------------------------|---------|----------|---------|-----------|
| P (g) | P (N) | y (mm) | y (m) | EI |
| 170 | 1.6677 | 1.63 | 0.00163 | 0.2655661 |

| | | | | |
|--|--------|------|---------|------------------|
| 130 | 1.2753 | 1.26 | 0.00126 | 0.2627145 |
| 130 | 1.2753 | 1.5 | 0.0015 | 0.2206802 |
| 170 | 1.6677 | 1.82 | 0.00182 | 0.2378421 |
| 170 | 1.6677 | 1.71 | 0.00171 | 0.2531419 |
| 120 | 1.1772 | 1.2 | 0.0012 | 0.254631 |
| 140 | 1.3734 | 1.36 | 0.00136 | 0.2621201 |
| Área [$A (m^2)$] | | | | 0.0000014 |
| Valor Total de EI | | | | 1.7566959 |
| Valor Promedio de EI | | | | 0.2509566 |
| Momento de Inercia [$I (m^4)$] | | | | 3.78E-11 |
| Módulo de Elasticidad [$E (N/m^2)$] | | | | 6.646E+09 |
| Módulo de Elasticidad [$E (N/mm^2)$] | | | | 6646.0217 |

El valor promedio del módulo de elasticidad obtenido, se encuentra en los rangos publicados por otros autores [63; 64] para el material compuesto por fibra de vidrio con resina epóxica.

3.1.5.2 Ensayo de fatiga a alta frecuencia del material

3.1.5.2.1 Simulación de la carga inicial ejercida al material

Una vez obtenido el módulo de elasticidad, mediante el empleo del software SolidWorks 2017, se simuló el comportamiento de la probeta bajo una carga (presión) que se varió desde $0.1MPa$ hasta $2MPa$, detectándose que las deformaciones y esfuerzos para el estudio de fatiga, se encuentran en el orden de entre $0.247MPa$ y $4.93MPa$, de lo cual es conveniente tomar para el estudio como deformaciones medias sobre la probeta los valores desde 100.1 hasta 2002 micrómetros respectivamente.

Los resultados del estudio de carga –esfuerzo – deformación, se muestran en la *Tabla 3-3*.

Tabla 3-3. Resultados obtenidos del estudio de carga –esfuerzo – deformación. Fuente Propia

| CÁLCULOS MEDIANTE MEF | | | | |
|-----------------------|------------|----------|----------|----------------|
| Presión (MPa) | Fuerza (N) | $m (g)$ | $y (mm)$ | $Sigm (N/m^2)$ |
| 0.1 | 0.14 | 14.27115 | 0.01001 | 2.47E+05 |
| 0.2 | 0.28 | 28.5423 | 0.02002 | 4.93E+05 |
| 0.4 | 0.56 | 57.08461 | 0.04005 | 9.87E+05 |
| 0.45 | 0.63 | 64.22018 | 0.04505 | 1.11E+06 |
| 0.5 | 0.7 | 71.35576 | 0.05006 | 1.23E+06 |
| 1 | 1.4 | 142.7115 | 0.1001 | 2.47E+06 |
| 1.5 | 2.1 | 214.0673 | 0.1502 | 3.70E+06 |
| 2 | 2.8 | 285.423 | 0.2002 | 4.93E+06 |

En la *Tabla 3-3* se reflejan los valores de presión para los cuales, supuestamente, el material no supera los esfuerzos máximos aplicados, los cuales alcanzan valores de presión desde

0.1MPa con su respectiva deformación de 0.01001mm hasta una presión de 2MPa con su respectiva deformación de 0.2002mm. Este análisis permite tener una visión más clara del resultado esperado.

Para mayor precisión de los resultados, tomando en cuenta la presión máxima para la cual el material no supera los esfuerzos máximos aplicados, determinada anteriormente (2MPa), se llevó a cabo un análisis de convergencia de malla para los máximos esfuerzos de tensión von mises, del cual se obtuvo como resultado que los esfuerzo convergen (Figura 3-6) con un 9% de error, lo que es muy favorable para el estudio. En relación al desplazamiento, se alcanzan valores muy similares.

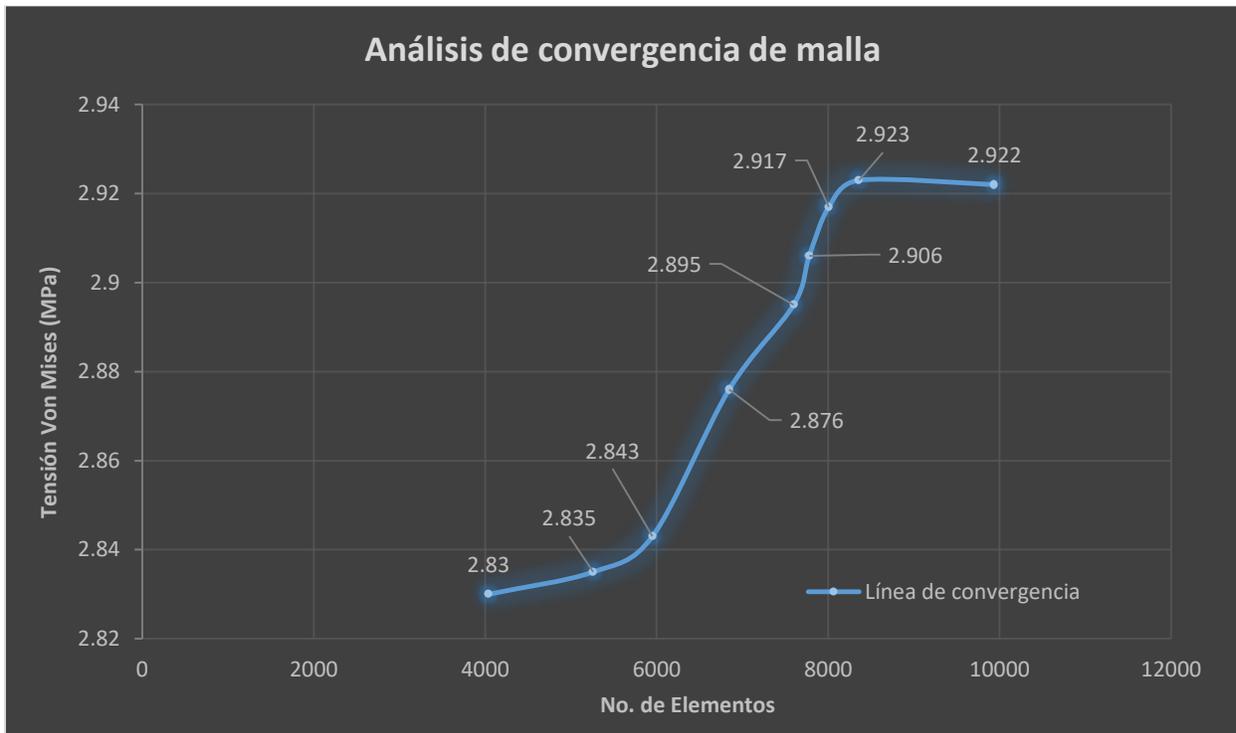


Figura 3-6. Análisis de convergencia de malla de la probeta de material compuesto. Fuente Propia

Para el estudio de fatiga, inicialmente se empleó una máquina de alto número de ciclos (20kHz), la cual conociendo el voltaje con el que se realizan los ensayos, permite obtener la amplitud de onda con la que se aplica dicha frecuencia. De esta manera, es posible obtener la deformación; además, de las componentes de deformación mínima y deformación máxima resultante sobre la probeta; y con estos datos, los valores de los esfuerzos mínimos y máximos respectivamente. Lo que resulta ser un caso de ciclo variable fluctuante (Figura 3-7.c), es decir, varían los esfuerzos sin cambiar de signo.

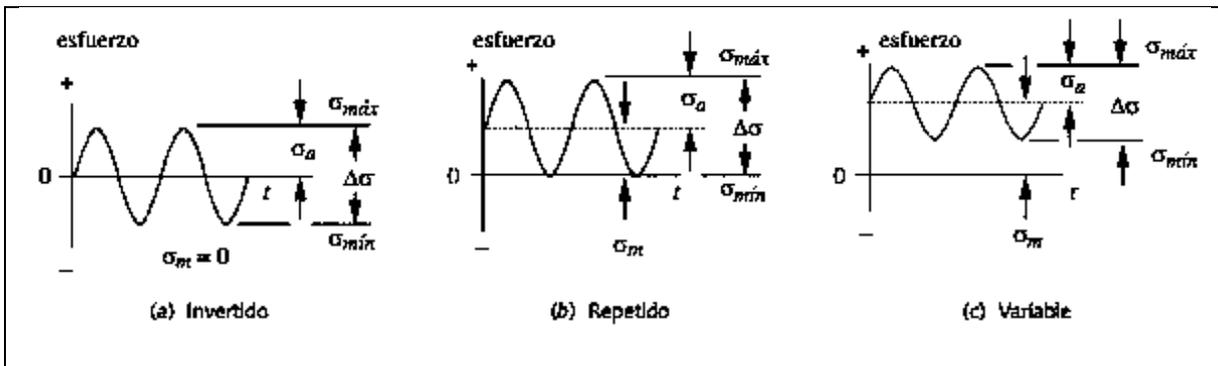


Figura 3-7. Valores alternativos, medio y del intervalo del ciclo de esfuerzos invertido, repetido y fluctuante [35].

En el caso de flexión los esfuerzos resultantes son de forma variable tanto de compresión como de tracción; y en el caso de análisis, los esfuerzos de compresión se encuentran en la parte superior de la probeta y los de tracción en la parte inferior de la misma, sin embargo, en ambos casos los esfuerzos tienen la misma variación, por lo que resulta igual calcular el caso de esfuerzos de tracción, que el de compresión. Para nuestro estudio, se determinó conveniente llevar a cabo el cálculo para el caso de esfuerzos de tracción. Tomando en cuenta lo explicado anteriormente, se puede esperar que el inicio de la grieta se forme en cualquiera de las superficies, inferior o superior.

Del análisis en SolidWorks de la probeta, se aprecia (*Anexo 7 y 8*) que sobre la probeta aparecen tres zonas de altos esfuerzos, dos cerca de los apoyos y una en el centro de la misma, esto indica que, al someter la probeta al ensayo de fatiga, pueden ocurrir fallas en cualquiera de los tres puntos. Aunque, se espera que el fallo ocurra en el centro porque los puntos donde se aplican las cargas siempre introducen concentradores de esfuerzos adicionales.

Al analizar los valores de esfuerzos medios, máximos y mínimos, se necesita analizar el comportamiento de la probeta al deformarse, considerando que la deformación obtenida resulta ser el valor medio (100 micrómetros) y que este valor se verá afectado por la amplitud de la vibración, recordando que dicha amplitud es una función del voltaje que se aplica en la máquina de fatiga, se comienza el análisis con 10V, lo que representa una amplitud de onda considerable, y con ella grandes variaciones en los esfuerzos respecto a los valores medios.

3.1.5.2.2 Experimentación a alta frecuencia

Para el ensayo a fatiga, como se mencionó antes, se empleó una máquina ultrasónica de alto número de ciclos ($20kHz$), donde ocho probetas fueron sometidas a una serie de ciclos repetidos, con diferentes valores de carga contra deformación. Se tomaron en cuenta factores propios de este tipo de sollicitación, como son la frecuencia de aplicación de la carga, los límites tensionales superior e inferior y la forma de la onda de carga, es decir, aquéllos relacionados con la evolución en el tiempo de la sollicitación que afectan este tipo de comportamiento.

Del ensayo (*Figura 3.8*) se obtuvo como resultado que debido a la baja conductividad térmica del material y a la frecuencia impuesta al mismo, pasados pocos segundos del inicio del experimento, una elevada proporción del trabajo mecánico realizado se convirtió en calor; las probetas empezaron a expandir cierto olor a quemado y a desprender humo, y con ello la ocurrencia de un deterioro térmico, fundamentalmente en la zona de aplicación de la carga. Lo que complicó en gran medida el análisis hasta la aparición de daños por fatiga mecánica, siendo necesario detener el análisis.

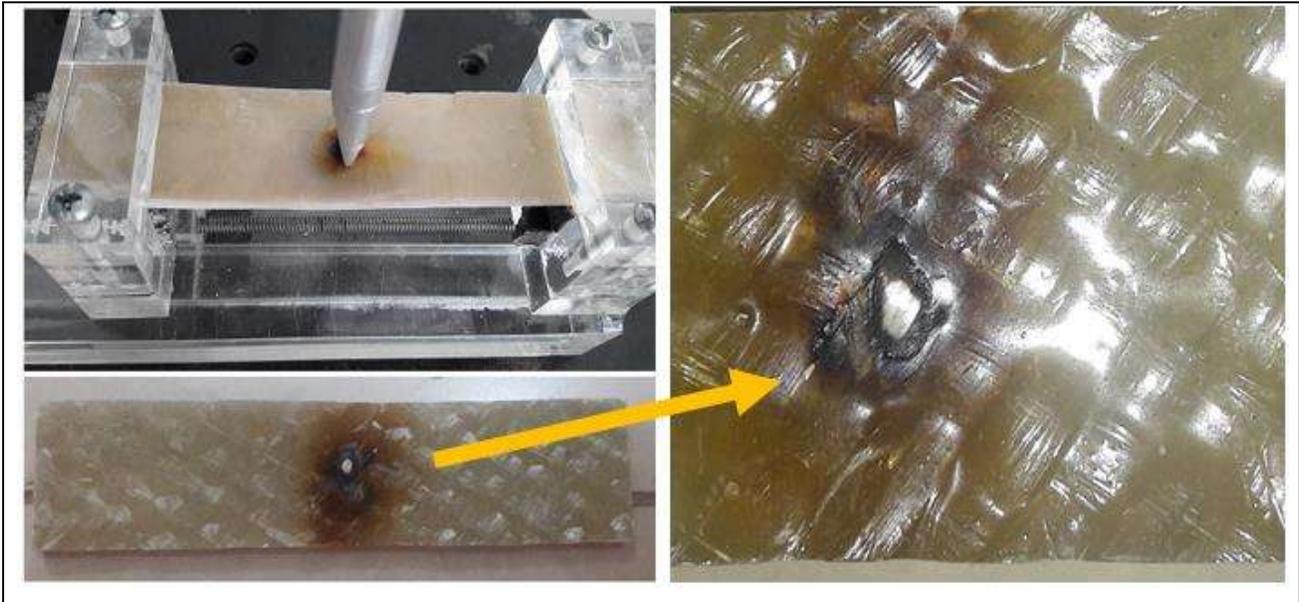


Figura 3-8. Ensayo a Fatiga de un Material Compuesto por Fibras de Vidrio y Resina Poliéster en una Máquina de Alta Frecuencia. Fuente Propia

3.1.5.3 Ensayo de fatiga a baja frecuencia del material

A partir de los resultados obtenidos del ensayo a fatiga en el equipo ultrasónico, se decidió construir un nuevo sistema para ensayar las probetas a menor frecuencia y evitar el efecto de calentamiento, para de esta forma lograr llegar a la fractura por fallo a fatiga de las mismas. El dispositivo construido es un “actuador de baja frecuencia” (*Figura 3-9*) y permite variar tanto la frecuencia de ensayo, como el desplazamiento de la probeta.

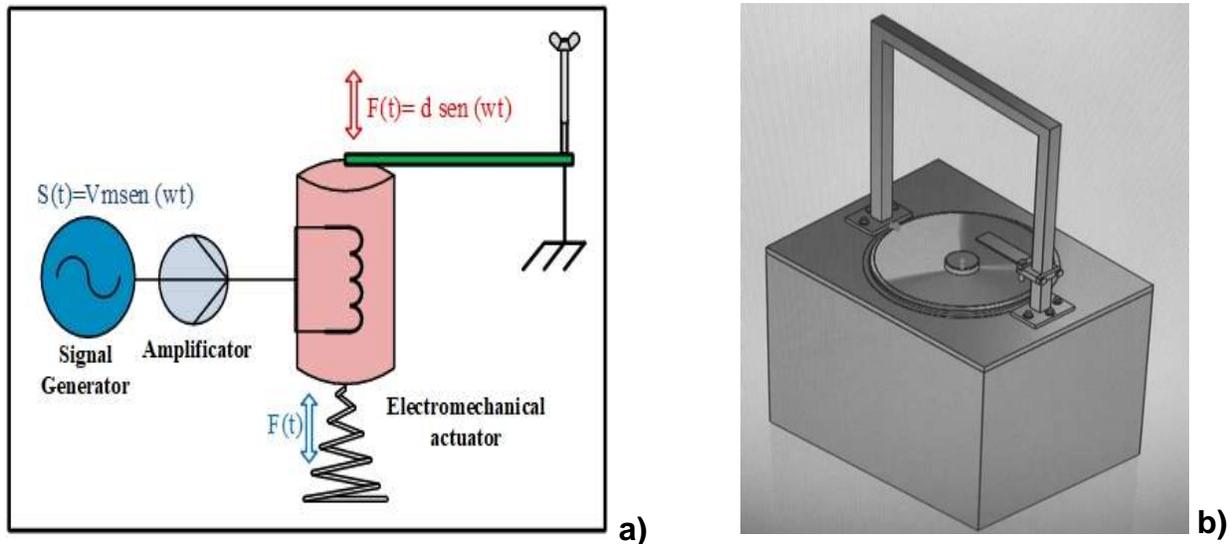


Figura 3-9. Actuador de baja frecuencia. a) Diagrama funcional, b) Imagen del actuador. Fuente Propia

Sin embargo, este actuador de baja frecuencia no soporta la potencia adecuada (se calienta con facilidad si se opera de forma continua) para trabajar durante largos períodos de tiempo (una hora) aplicando la carga variable a las probetas; por lo que se determinó conveniente para el estudio modificar la forma de la probeta, variando sus dimensiones ($2.5 \times 12 \times 120 \text{ mm}$) y su forma, así como el montaje de la probeta en la máquina de ensayo, quedando finalmente configurada como se muestra en la *Figura 3-10*.



Figura 3-10. Geometría de la probeta utilizada en el ensayo a fatiga a baja frecuencia. Fuente Propia

En este caso se redujo la sección en la zona de mayores cargas internas, con el propósito de mejorar las condiciones de funcionamiento de dicha máquina.

3.1.5.3.1 Determinación de los esfuerzos mediante el Software SolidWorks

Con el objetivo de determinar los esfuerzos sobre la probeta a tener en cuenta en el ensayo experimental, se simularon varios casos en SolidWorks. Mediante un análisis lineal se aplicaron diferentes valores de presión en una zona próxima al extremo libre, lográndose determinar la carga de presión ($3700Pa$) que se debe aplicar a la probeta durante el ensayo experimental.

Para garantizar mayor precisión de los resultados, también se realizó un análisis de malla y convergencia de malla, el cual se llevó a cabo aplicando diferentes valores de densidad de malla a la geometría, y se obtuvieron los resultados presentados en la *Tabla 3-4*.

Tabla 3-4. Datos obtenidos de la convergencia de malla de la geometría final de la probeta. Fuente Propia

| No. de Mallado | No. de Elementos | Máxima Tensión Von Mises (MPa) | Máximo Desplazamiento resultante (mm) |
|----------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 8040 | 1.451 | 0.1257 |
| 2 | 19259 | 1.484 | 0.126 |
| 3 | 32510 | 1.493 | 0.1261 |
| 4 | 43849 | 1.486 | 0.1262 |
| 5 | 56187 | 1.491 | 0.1262 |

Una vez realizado el análisis se llevó a cabo las comparativas de los resultados (*Tabla 3-4*) de tensión y desplazamiento obtenidos, determinándose que mediante el empleo de esta técnica se logra una visión más clara de donde podrían ocurrir las fallas, mientras que si sólo

se aplica el mallado una vez solo se lograría una posible tendencia de en dónde fallaría la estructura analizada, no significando ser la posibilidad real. Cómo se puede apreciar (*Tabla 3-4*) el desplazamiento máximo (*Anexo 9*), prácticamente mantiene el mismo valor para todas las pruebas. En cuanto a los resultados de tensión máxima de von mises (*Anexo 10*), se logra una convergencia (*Figura 3-11*) dentro del 9% de error entre las diferentes pruebas, por lo que se logra para este análisis una precisión satisfactoria y de esta manera la convergencia de la pieza.

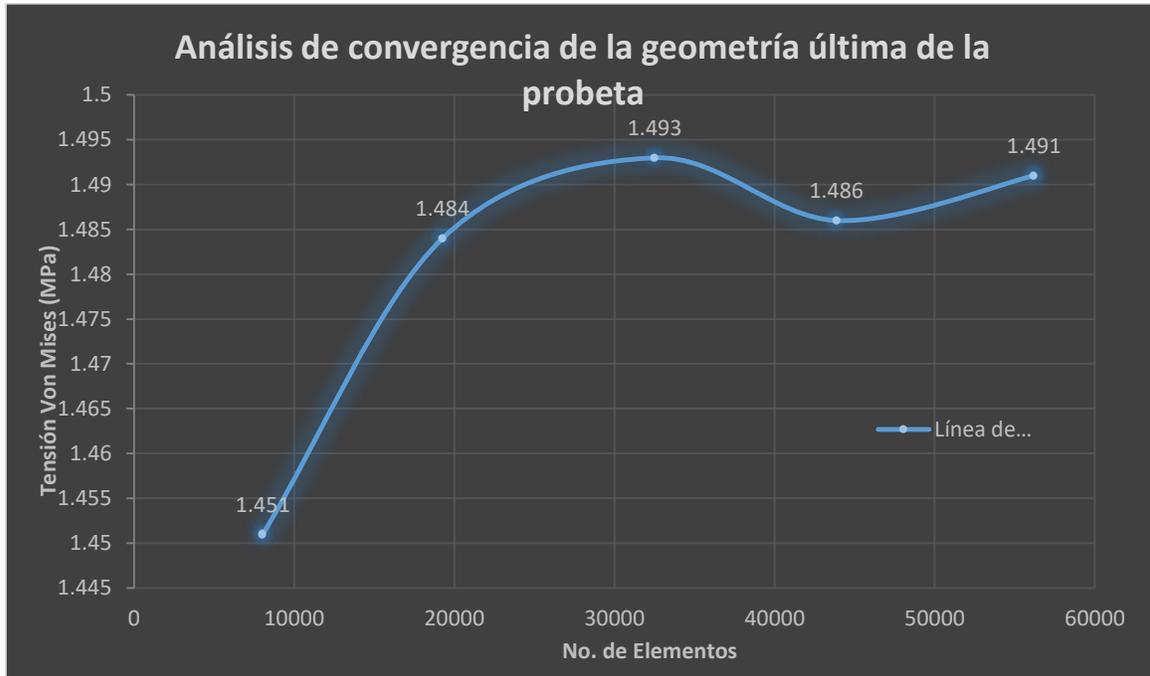


Figura 3-11. Análisis de convergencia de tensión von mises de la geometría final de la probeta.

Fuente Propia

De los resultados anteriores, se determinó aplicar para el ensayo experimental de la probeta una carga de presión de $3700Pa$, y como deformación máxima $2mm$ aproximadamente, esperando obtener la ruptura de la misma por falla de fatiga.

3.1.5.3.2 Parte experimental del ensayo de fatiga a baja frecuencia

La primera probeta se ensayó durante 10 horas equivalentes a $2.23e + 06$ ciclos aproximadamente, a una frecuencia de 62 Hz, y para un desplazamiento senoidal de $2mm$. Obteniéndose cómo resultado del ensayo que, pasado el tiempo de ensayo, la misma no fracturó, por lo que se procede a ensayar la segunda probeta.

En el caso de la segunda probeta ensayada, se mantuvieron exactamente las mismas condiciones del ensayo anterior, disminuyendo la presión de ensayo a $3200 Pa$ resultando, una deformación de $3.07mm$ y un esfuerzo de $12.75 MPa$. En este caso la probeta pasada unas 4 horas y medias sufre fallo por fatiga, el cual se puede apreciar mediante el agrietamiento de la misma, tal como se muestra en la *Figura 3-12*.

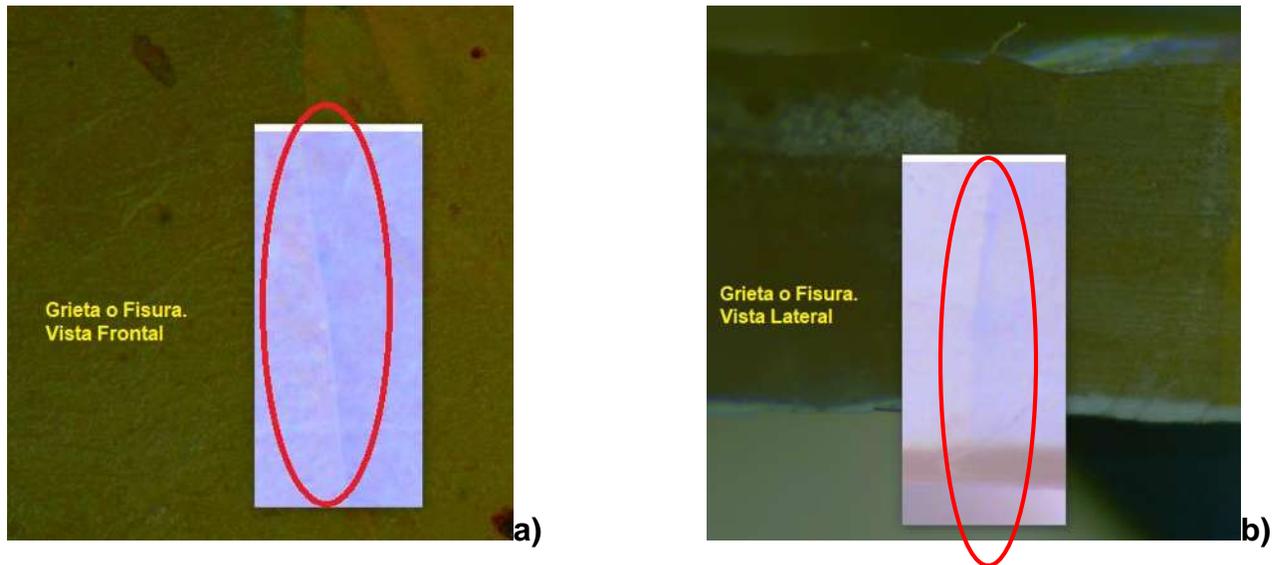


Figura 3-12. Agrietamiento como respuesta a la falla por fatiga mecánica. a) Vista frontal, b) Vista lateral. Fuente Propia

➤ Otros datos del ensayo

Además de la información anterior, también se considera como dato para el ensayo las igualdades siguientes:

$$\sigma_m = 0 \quad (49)$$

$$\sigma_a = \pm 1.2 MPa, \quad R = -1 \quad (50)$$

3.2 Simulación del comportamiento del material aplicado a un fragmento del álabe de un aerogenerador de baja potencia

Con el objetivo de poder corroborar la aplicación del material estudiado en el desarrollo de aspas de aerogeneradores de baja potencia, se realiza, tomando en cuenta las propiedades y características del material, la simulación de una sección de aspa de turbina eólica pequeña.

La geometría se diseña a partir de la referencia [3], en donde el autor presenta una metodología novedosa para diseñar aspas de turbinas eólicas utilizando el método de

elementos finitos inversos (IFEM); y considera en su estudio una pala de aerogenerador de 40 KW de potencia que supone está hecha de múltiples capas de material compuesto. En el diseño, se toman las medidas del fragmento correspondiente a los 4.02m del álabe representado en la figura 13 de la referencia [3], el cual tiene una longitud de 0.67m y está diseñado bajo el perfil SG-6042. Se escogió esta sección del álabe, tomando en cuenta que precisamente es en esta zona donde recibe mayor esfuerzo. La simulación por elementos finitos al igual que las anteriores, se realizó mediante el software de SolidWorks, usando el criterio de von mises como criterio de falla, tomando en cuenta que es un criterio de resistencia estática y lo que se quiere medir es la capacidad del material de sufrir deformaciones sin romperse. También se llevó a cabo, la convergencia de malla esperando obtener los resultados del análisis con mayor precisión.

3.2.1 Condiciones de contorno impuestas en el modelo

Para la simulación se introducen una serie de condiciones de contorno que limiten el movimiento del modelo, o partes de este, en una dirección u otra, de forma tal que simule de forma veraz lo que puede suceder en la realidad. La presión aplicada sobre la sección del álabe es la misma que se le aplicó al material en la simulación. Y para el mallado se utilizaron elementos cuadráticos de alto orden, obteniéndose 5040 elementos y 10082 nodos.

A continuación, se van a listar las distintas condiciones de contorno aplicadas en el modelo para una mejor comprensión.

- **Condición de contorno 1:** En el análisis estático se selecciona la sujeción de geometría fija y se fijan los extremos paralelos al eje “Y”, quedando de esta forma el movimiento limitado en dicho eje.
- **Condición de contorno 2:** Como carga, se determinó aplicar una presión en la dirección de la normal de $3700 \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)}$, tomando en cuenta que es la misma carga aplicada durante el análisis del material.

La *Tabla 3-5*, muestra los resultados arrojados del análisis de convergencia de malla para la sección del álabe analizada.

Tabla 3-5. Datos obtenidos de la convergencia de malla de la sección analizada correspondiente al álabe. Fuente Propia

| No. de Mallado | No. de Elementos | Máxima Tensión Von Mises (MPa) | Máximo Desplazamiento resultante (mm) |
|----------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 1052 | 7.228 | 4.618 |
| 2 | 1460 | 7.793 | 4.704 |
| 3 | 1986 | 7.465 | 4.837 |
| 4 | 2884 | 8.035 | 4.946 |
| 5 | 3014 | 8.045 | 4.957 |
| 6 | 3632 | 9.222 | 4.994 |
| 7 | 4092 | 9.364 | 5.011 |
| 8 | 4272 | 9.532 | 5.035 |
| 9 | 4442 | 9.529 | 5.036 |
| 10 | 5040 | 9.535 | 5.036 |

Cómo se muestra en la *Tabla 3-5*, para el desplazamiento máximo (*Anexo 11*) de la sección del álabe se alcanza un error del 1% en la convergencia, lo que es muy significativo, pues indica un nivel de confianza de los resultados obtenidos del 99%. Y con respecto a los resultados arrojados por el análisis de tensión máxima de von mises (*Anexo 12*), se logra una convergencia (*Figura 3-13*) dentro de un 7% de error entre las diferentes pruebas, por lo que se logra para este análisis una precisión satisfactoria y de esta manera la convergencia de la pieza.

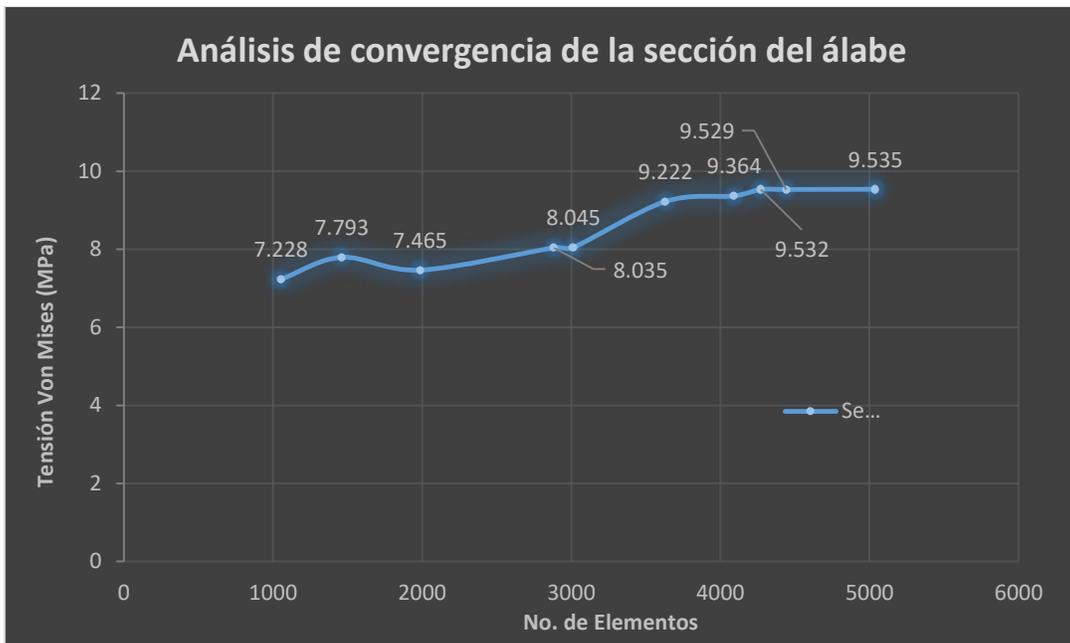


Figura 3-13. Análisis de convergencia de la tensión máxima de von mises de la sección del álabe.

Fuente Propia

De la simulación estructural de la sección de álabe se obtienen los resultados siguientes:

➤ Deformaciones del compuesto

Las deformaciones sufridas en la geometría que representa el compuesto como se aprecia (Anexo 10), no son uniformes. Se muestran con mayor énfasis en el centro y la punta de la de la cara de la geometría donde se aplica la carga.

➤ Tensiones en el compuesto

Las principales tensiones que soporta el compuesto son las generadas debido al esfuerzo a tracción que se aplica al modelo para su simulación. Éste esfuerzo se aplica en la dirección del eje de coordenadas “Y”, por lo que deben estudiarse los valores de tensión en dicha dirección. Según los resultados del software, el valor de tensión que ha soportado la estructura es de aproximadamente 9.535 MPa. Está tensión que ha soportado el material, es la resultante de las tensiones soportadas por fibras y matrices de cada uno de los laminados.

3.3 Resultados del estudio

Tomando en cuenta el proceso de manufactura de las probetas, aunque se procuró la homogeneidad y similitud de sus componentes en toda su longitud, no fue posible construir probetas exactamente iguales, por lo que para el caso en cuestión se prefirió analizar el

módulo de rigidez (*Valor promedio del producto $E \times I = 0.2509566$*) y no los resultados obtenidos del Módulo de Yong para el material estudiado, aun cuando el mismo se corresponde con los valores reportados en la literatura.

Del ensayo de fatiga a alta frecuencia en el equipo ultrasónico se determinó que, al someter el material a una variación de esfuerzos con alta frecuencia, el mismo sufre efectos denominados transiciones o relajaciones viscoelásticas⁶. Esto, trajo consigo que gran parte de la energía producida por el material fuera almacenada y transformada en calor por fricción aumentando rápidamente la temperatura de la probeta en la zona de carga, hasta llegar a su punto de combustión.

Como resultado de la experimentación se observó, que el factor principal que incide en los resultados es la frecuencia impuesta o bien la fricción interna. Esto unido a que los materiales poliméricos son malos conductores térmicos, dieron lugar a que gran parte de la energía producida en forma de calor no se disipara, provocando un incremento de la temperatura del material, interpretado como un deterioro térmico del mismo, el cual es posible observar a simple vista en la zona de aplicación de la carga (*Figura 3-14*).



Figura 3-14. Efecto resultante del ensayo de fatiga a alta frecuencia en el equipo ultrasónico.

Fuente Propia

⁶ Movimientos moleculares localizados inicialmente en los grupos laterales de las cadenas poliméricas que provocan una modificación de su conformación para adaptarse a determinada perturbación impuesta.

Al modificar las condiciones experimentales, con cambios en la probeta, el sistema de montaje, las cargas y la frecuencia de ensayo, una vez que se incrementó la amplitud del desplazamiento, las probetas se fracturaron. Se ensayó otra probeta en iguales condiciones, para reajustar los ciclos de trabajo hasta el fallo, obteniendo que la probeta resistió 8.92×10^5 ciclos.

Al observar las probetas después del fallo, se aprecia que, aunque las mismas fallaron a fatiga, los refuerzos de fibra de vidrio impidieron la separación total de las partes rotas.

Finalmente, se realizó la simulación estructural del material aplicado a una sección de un álabe de pequeña capacidad y los resultados arrojaron que el mismo se encuentra sometido a esfuerzos por debajo del esfuerzo último del material, permitiendo concluir que el material es factible para su aplicación en la fabricación de los álabes de turbinas eólicas de baja capacidad de potencia.

CONCLUSIONES

1. Mediante una revisión exhaustiva de la bibliografía tanto a nivel nacional como internacional, se logró valorar el estado del arte en el conocimiento del límite de resistencia a la fatiga de materiales empleados en la fabricación de álabes de turbinas eólicas, y se verificaron los aspectos de mayor coincidencia con una matriz polimérica con refuerzos de fibra de vidrio.
2. Apoyados en las normas que describen las diferentes prácticas estandarizadas que permiten determinar propiedades mecánicas para la caracterización de un material compuesto (Norma ASTM D3039), se elaboró y se llevó a cabo el diseño de experimento para el estudio de resistencia a la fatiga del material compuesto por fibra de vidrio y resina polimérica.
3. Se diseñó un material compuesto de matriz polimérica y fibra de vidrio como reforzante, para determinar sus propiedades estructurales y de este modo, su respectiva validación para su aplicación en la fabricación de turbinas eólicas de baja potencia.
4. Mediante la aplicación de las ecuaciones básicas de la rigidez, se logró obtener el valor promedio del módulo de elasticidad (6646.0217 MPa).
5. Del análisis de convergencia de malla de la geometría final de la probeta, en relación al desplazamiento, se determinó que prácticamente los tres desplazamientos obtenidos mantienen los mismos valores (0.1266 mm); y que los resultados de la tensión están dentro del 9% de error entre el estándar y los adaptativos. De esta forma se concluye que, para este análisis, se logra una precisión satisfactoria, y así la convergencia.
6. Se logró estimar la resistencia a la fatiga del material cuando es sometido a una presión de 3200 Pa con un desplazamiento de 3.07 mm , determinándose que el material bajo estas condiciones resiste 8.92×10^5 ciclos.
7. Las pruebas del material se realizaron, primeramente, en una máquina de alto número de ciclos de frecuencia (20 kHz). Del ensayo se concluye, que a pesar de la reducción del número de ciclos que se logra con dicha máquina, el mismo, aunque aportó una serie de información para la investigación, no se considera viable para el alcance de los objetivos, ya que de acuerdo a las condiciones propiciadas para el ensayo, para las cuales no fue posible aislar el material, y debido a que el material no es un buen conductor del calor, se hizo imposible desarrollar el experimento de fatiga producto a que

la temperatura se elevó grandemente (Más de los 100°C según lo referenciado en [65-67]) provocando deterioros térmicos prematuros al material. Es válido mencionar que, en el tiempo analizado, no se observaron daños superficiales relacionados con la fatiga (*Figura 36*), teniendo presente que el avance de las grietas en estos materiales se aprecia por separaciones de las capas de fibras en la probeta.

8. Se realizó un segundo ensayo, pero esta vez a baja frecuencia (*62 Hz*), sometiendo el material a esfuerzos de tracción - compresión, tomando en cuenta que en la fabricación del material se emplearon diferentes ángulos ($\pm 45^\circ \text{C}$ y 90°C) de orientación de las fibras. Y se determinó que, en los materiales poliméricos reforzados con fibra, en particular los reforzados con fibra de vidrio, la falla por fatiga mecánica ocurre cuando la matriz o material base, o sea la resina para este caso, sufre alguna fractura, ya que generalmente es el material de refuerzo el que tiende a resistir más los esfuerzos. Si se determinara el límite de resistencia a partir de dicha fibra, el valor sería muy elevado.
9. Tanto del ensayo a alta frecuencia como del ensayo a baja frecuencia se tiene que el comportamiento mecánico de la resina y su resistencia térmica, son los principales puntos por considerar al momento de seleccionar la matriz polimérica para la fabricación de materiales compuestos.

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar diferentes métodos o mecanismos para lograr aislar un material expuesto a elevadas temperaturas por la concentración de esfuerzos.
2. Buscar nuevas alternativas de fibras, quizás de materiales naturales.
3. Finalmente, la implementación de este material en la fabricación de álabes y poder darle un seguimiento al comportamiento que pueda presentar el mismo una vez la estructura en funcionamiento.

REFERENCIAS

1. SAIDUR, R., M. ISLAM, N. RAHIM, and K. SOLANGI A review on global wind energy policy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010, 14(7), 1744-1762.
2. SIMIC, Z., J.G. HAVELKA, and M.B. VRHOVCAK Small wind turbines—A unique segment of the wind power market. *Renewable Energy*, 2013, 50, 1027-1036.
3. ALBANESI, A., et al. Application of the inverse finite element method to design wind turbine blades. *Composite Structures*, 2017, 161, 160-172.
4. PÉREZ, M.A. and M. SÁNCHEZ Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos. *OmniaScience Monographs*, 2014.
5. HAU, E. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Edtion ed.: Springer Science & Business Media, 2013. ISBN 3642271510.
6. BASTIANON, R.A. Calculo y diseño de la hélice optima para turbinas eolicas,[en linea]. Fecha de consulta: Octubre de 2011. In., 2011.
7. MOLINA, K., et al. Modelado de la interacción fluido estructura (FSI) para el diseño de una turbina eólica HAWT 2018.
8. LLIVISACA PUMA, C.M. and C.E. MEJÍA MAYANCELA Sistema de instrumentación para la medición de esfuerzos sobre el aspa de un aerogenerador 2018.
9. FUENTES RUIZ, J.-F. Análisis simplificado de la respuesta estructural de una pala de aerogenerador 2009.
10. MUÑOZ, G., et al. OptiWindSeaPower: Gestión Integral Óptima de Parques Eólicos Offshore Mediante Nuevos Modelos Matemáticos (2ª parte) 2019.
11. ZARADNIK, R., S. RAICHMAN, and A. MIRASSO *Vibraciones Libres de Palas de Turbinas Eólicas de Materiales Compuestos Considerando Cinemática No Lineal Mediante Modelos de Elementos Finitos*. Edtion ed., 2007.
12. HAU, N. Metodología para el diseño aerodinámico de las aspas de una turbina eólica pequeña. *Ingeniantes*, 01/01 2015, 1, 100-108.
13. TEISA, C.D. Aerogeneradores de baja potencia. TEISA.
14. HERNÁNDEZ AGRIARTE, J. Diseño de un aerogenerador de baja potencia 2005.
15. XU, F., F. YUAN, J. HU, and Y. QIU. *Design of a miniature wind turbine for powering wireless sensors*. in *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
16. POURRAJABIAN, A., P.A.N. AFSHAR, M. AHMADIZADEH, and D. WOOD Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade. *Renewable Energy*, 2016, 87, 837-848.
17. SHEN, X., et al. Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, 2016, 119, 266-278.
18. BRØNDSTED, P., H. LILHOLT, and A. LYSTRUP Composite materials for wind power turbine blades. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2005, 35, 505-538.
19. HANSEN, M.O.L. *Aerodynamics of wind turbines*, Earthscan. James & James, 2008, 8(9), 14.
20. HANSEN, M.O.L. *Aerodynamics of wind turbines*. Edtion ed.: Routledge, 2015. ISBN 1317671031.
21. SINGH, R.K., M.R. AHMED, M.A. ZULLAH, and Y.-H. LEE Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines. *Renewable energy*, 2012, 42, 66-76.

22. RAJADURAI, J.S. and G. THANIGAIYARASU Structural analysis, failure prediction, and cost analysis of alternative material for composite wind turbine blades. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2009, 16(6), 467-487.
23. CHEN, X., W. ZHAO, X.L. ZHAO, and J.Z. XU Failure test and finite element simulation of a large wind turbine composite blade under static loading. *Energies*, 2014, 7(4), 2274-2297.
24. SHYY, W., et al. Computational aerodynamics of low Reynolds number plunging, pitching and flexible wings for MAV applications. *Acta Mechanica Sinica*, 2008, 24(4), 351-373.
25. SHYY, W., et al. *Aerodynamics of low Reynolds number flyers*. Edtion ed.: Cambridge University Press, 2007. ISBN 113946891X.
26. URIZAR ARECHAGA, R. Materiales de alto rendimiento para el sector más exigente. *Revista digital Metalmecánica*, 2012.
27. MORAGA RAMÓN, G. Estudio técnico-económico de diseño y desarrollo de una pala de micro aerogenerador fabricada con material compuesto. 2017.
28. ASKELAND, D.R. and W. WRIGHT *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Edtion ed.: International Thomson Editores México, 1998.
29. BESEDNJAK, A. and A.B. DIETRICH *Materiales compuestos*. Edtion ed.: Univ. Politèc. de Catalunya, 2009. ISBN 8483018209.
30. MIRAVETE, A. and L. CASTEJÓN *Materiales compuestos*. Temes de disseny, 2002, (20), 123-139.
31. HULL, D. *Materiales compuestos*. Edtion ed.: Reverté, 1987. ISBN 8429148396.
32. GEMIN, L. Fabricación y caracterización de recipientes a presión basados en materiales compuestos reforzados con fibras de carbono. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería. Argentina, 2017.
33. WIKISPEDIA, C.D. *Plástico reforzado con vidrio [en línea]*. *Wikipedia, La enciclopedia libre*. 2017 [cited 2017 9 de Febrero]; Available from: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pl%C3%A1stico_reforzado_con_vidrio&oldid=119642768.
34. GIBSON, R.F. *Principles of composite material mechanics*. Edtion ed.: CRC press, 2016. ISBN 0429190581.
35. ROBERT, L. NORTON, "Diseño de Maquinaria"-Síntesis de máquinas y mecanismos, Cuarta edición, Editorial Mc GrawHill 2009. 11. Dr. EMILIO JUAN GARCIA, "CIR Ortopedia y traumatología" Artículo científico. In., 2008.
36. ESTE, P. and L.A. SÁENZ Evaluación de la resistencia a fatiga y límite de fatiga de aceros de medio y bajo carbono. *Revista Ingeniería UC*, 2004, 11(1), 69-75.
37. NIJSSEN, R.P.L. Fatigue life prediction and strength degradation of wind turbine rotor blade composites. Contractor Report SAND2006-7810P, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2006.
38. MIRAVETE, A. *Materiales compuestos II*. Edtion ed.: Editorial Reverté, 2012. ISBN 8429192611.
39. CASADO DEL PRADO, J.A. *Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta*. Edtion ed.: Universidad de Cantabria, 2010. ISBN 8469355376.
40. LEE, H.G., M.G. KANG, and J. PARK Fatigue failure of a composite wind turbine blade at its root end. *Composite Structures*, 2015, 133, 878-885.

41. MISHNAEVSKY, L., et al. Materials for wind turbine blades: an overview. *Materials*, 2017, 10(11), 1285.
42. PASSIPOULARIDIS, V. and P. BRØNDSTED Fatigue evaluation algorithms 2010.
43. ZANGENBERG, J., P. BRØNDSTED, and J.W. GILLESPIE JR Fatigue damage propagation in unidirectional glass fibre reinforced composites made of a non-crimp fabric. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(22), 2711-2727.
44. SENDECKYJ, G.P. Life prediction for resin-matrix composite materials. In *Composite materials series*. Elsevier, 1991, vol. 4, p. 431-483.
45. QUARESIMIN, M., L. SUSMEL, and R. TALREJA Fatigue behaviour and life assessment of composite laminates under multiaxial loadings. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(1), 2-16.
46. ZULUAGA RAMÍREZ, P. Fatiga en CFRP: Caracterización y Método Óptico para la Estimación del Daño 2015.
47. MAYUGO, J.A. Capítulo 2: Fatiga en materiales compuestos: comportamiento y mecanismos de degradación 2010.
48. CASTILLO, E. and A. FERNÁNDEZ-CANTELI *A unified statistical methodology for modeling fatigue damage*. Edtion ed.: Springer Science & Business Media, 2009. ISBN 1402091826.
49. CAPRINO, G. and G. GIORLEO Fatigue lifetime of glass fabric/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, 30(3), 299-304.
50. PAGÈS, S., J. COSTA, J.A. MAYUGO, and N. BLANCO. *Tratamiento de la fatiga en el diseño estructural con materiales compuestos*.
51. POST, N.L., S.W. CASE, and J.J. LESKO Modeling the variable amplitude fatigue of composite materials: A review and evaluation of the state of the art for spectrum loading. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(12), 2064-2086.
52. WHITWORTH, H.A. A stiffness degradation model for composite laminates under fatigue loading. *Composite structures*, 1997, 40(2), 95-101.
53. CASADO, J., et al. Analysis of fatigue behaviour of notched specimens made of fibreglass reinforced polyamide by means of a cohesive model. *Polymer Testing*, 2017, 64, 337-344.
54. CASADO, J., et al. Fatigue behavior enhancement of short fiber glass reinforced polyamide by adding phase change materials. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 93, 115-122.
55. DIEGO CAVIA, S. Estudio de viabilidad de reutilización de poliamida reforzada con fibra de vidrio corta para inyectar placas de sujeción de vía de ferrocarril para Alta Velocidad Española (AVE) 2015.
56. IBÁÑEZ GUTIÉRREZ, F.T. Análisis del proceso de fractura en poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio corta en condiciones entalladas: aspectos microestructurales y determinación de cargas de rotura mediante métodos tensionales y energéticos 2018.
57. KATUNIN, A. and M. FIDALI Fatigue and thermal failure of polymeric composites subjected to cyclic loading. *Advanced Composites Letters*, 2012, 21(3), 096369351202100301.
58. ASTM, D. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials 2008.
59. MOAVENI, S. *Finite element analysis theory and application with ANSYS, 3/e*. Edtion ed.: Pearson Education India, 2011. ISBN 8131760642.

60. ESPARZA, F.P. Fundamentos Matemáticos del Método de los Elementos Finitos.
61. CUBO PÉREZ, J.M. Aplicación del análisis por elementos finitos en la ingeniería naval 2010.
62. MANZANEDA PEÑA, M.A. Análisis de un muro de contención sometido a la acción de cargas horizontales mediante el método de elementos finitos 2018.
63. FAYÓ, P. Aumento de tenacidad en resinas usadas para fabricar aspas de molinos eólicos incorporando micropartículas reactivas 2010.
64. GÓMEZ MIRA, A.F., E. CHICA ARRIETA, and F. LATORRE CORREA Analysis of stress distribution in different prefabricated intraradicular retention elements. Revista Facultad de Odontología Universidad de Antioquia, 2008, 20(1), 31-42.
65. BELARDI, A. Comportamiento a la fatiga de materiales compuestos de fibra de vidrio y poliuretano nanoestructurado 2017.
66. BERNARDO REYES, L. Caracterización de los Plásticos Reforzados con Fibra de Vidrio fabricados en Cuba. Universidad Central" Marta Abreu" de las Villas, 2010.
67. SANIPATÍN BASANTES, S.N. Estudio Comparativo de las propiedades mecánicas de residuos de polipropileno obtenido por extrusión y reforzado con fibras de Abacá y de Plátano. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2019.

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica de la Resina Poliéster PP-250



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Fecha de emisión: 21/05/2018

Fecha próxima revisión: 21/05/2019

Versión que Sustituye:

Revisión.-

| Sección 1. Identificación de la Sustancia Química peligrosa o mezcla y del proveedor o fabricante | | |
|---|---|-----------------|
| 1.1 Nombre del producto: | RESINA POLIESTER INSATURADA | |
| 1.2 Otros medios de identificación: | RESINAS POLIESTER | |
| 1.3 Uso recomendado de la sustancia química peligrosa o mezcla, y restricciones de uso: | Resina poliéster insaturada utilizada en la manufactura de Plásticos Termofijos Reforzados. | |
| 1.4 Distribuidor: | Poliformas Plásticas S. A. de C. V. Calzada Ignacio Zaragoza No. 448 Col. Federal, Del. Venustiano Carranza. Ciudad de México. CP.15700 Tel. (55) 5785 0430 Horario: 08:00 – 18:00 de Lunes a Viernes | |
| 1.5 En caso de emergencia: | Poliformas: (55) 5785 0430 horario 08:00 – 18:00 de Lunes a Viernes SETIQ: 01 800 002 1400 (República Mexicana las 24 horas) 5559 1588 (Ciudad de México y área metropolitana) 011 52 5559 1588 (para llamadas originadas en otra parte) | |
| Sección 2. Identificación de los Peligros | | |
| 2.1 Clasificación de la sustancia química peligrosa o mezcla: | AROMÁTICOS. | |
| 2.2 Elementos de señalización Sistema Globalmente Armonizado (SGA): Pictograma de peligro. | | |
| Palabra de advertencia: | PELIGRO | |
| 2.3 Otros Peligros: | Información complementaria: (DL50 CL50, etc): de acuerdo a la agencia internacional para la investigación de cáncer (IARC) incluye al Estireno como agente carcinógeno grupo 2B (posible carcinógeno para seres humanos) | |
| Sección 3. Composición / Información sobre los Componentes | | |
| 3.1 Sustancias: | | |
| Nombre del Ingrediente: | # CAS | % en peso |
| Resina poliéster insaturada Monómero de Estireno | Mezcla 100-42-5 | 80-100 10-20 |
| 3.2 Mezclas: | No aplica | |

Producto.- RESINA POLIESTER

Página: 1/7

Sección 4. Primeros Auxilios

4.1 Descripción de los Primeros Auxilios:

| | |
|------------------------------|--|
| Contacto con los ojos | Lavar inmediatamente con abundante agua limpia durante al menos 15 minutos, solicitar inmediata atención médica. |
| Inhalación | Trasladar a la víctima al aire fresco, mantener abrigada y tranquila, si no respira aplicar respiración artificial. Si la respiración es difícil, que el personal capacitado le aplique oxígeno. SOLICITAR INMEDIATA ATENCIÓN MÉDICA. |
| Contacto con la piel: | Lavar con jabón neutro y abundante agua durante al menos 15 minutos, cambiar la ropa contaminada, solicitar atención médica. |
| Ingestión: | NO INDUCIR VÓMITO, este material puede entrar a los pulmones durante el vómito, administrar uno o dos vasos de leche o agua a la víctima. Nunca administre algo por vía oral a una persona inconciente. SOLICITAR INMEDIATA ATENCIÓN MÉDICA. |

4.2 Síntomas y efectos más importantes, agudos o crónicos:

| | |
|-------------------------------|---|
| Contacto con los ojos: | Nocivo para los ojos. El contacto directo con este material causa irritación ocular. Los síntomas pueden incluir picazón, lagrimeo, enrojecimiento e hinchazón. |
| Inhalación: | Nocivo si se inhala. Los efectos de la exposición pueden incluir dolores de cabeza, fatiga, náuseas, depresión del sistema nervioso central y edema pulmonar. |
| Contacto con la piel: | Nocivo si se absorbe a través de la piel. El contacto directo con este material causa irritación cutánea. El contacto repetido o prolongado con la piel puede ocasionar el desengrase y resecaamiento de la piel. |
| Ingestión: | Nocivo si se ingiere. La toxicidad de la dosis oral única es baja. |

4.3 Signos/síntomas de sobreexposición:

Por exposición crónica: Se ha sugerido que una sobreexposición a concentraciones de este material (o a sus componentes) puede agravar desórdenes preexistentes en el sistema nervioso central, efectos sobre la audición y daño a las vías respiratorias. El estireno es irritante al aparato tracto-respiratorio y a los ojos. Puede ser fatal a concentraciones de 10,000 ppm.

Sección 5. Medidas contra Incendios

5.1 Medios de extinción apropiados:

Medios apropiados de extinción:

Utilice dióxido de carbono, espuma, químicos secos o nebulizador de agua para extinguir.

Medios no apropiados de extinción

No usar chorro de agua potente con el fin de evitar la dispersión y propagación del fuego.

5.2 Peligros específicos de la sustancia química peligrosa o mezcla:

Puede producir monóxido de Carbono, bioxido de Carbono, vapores tóxicos ó irritantes, gases y partículas.

5.3 Medidas especiales que deben seguir los grupos de combate contra incendio:

Los bomberos deben llevar equipo de protección apropiado y un equipo de respiración autónomo con una máscara facial completa que opere en modo de presión positiva.

Sección 6. Medidas que deben Tomarse en caso de derrame o fuga Accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimiento de emergencia:

Para el personal de respuesta a emergencias:

- 1.- Usar ropa de protección para evitar el contacto repetido con el producto.
- 2.- Usar mascarilla de protección con filtro para vapores orgánicos ó equipo autónomo en caso de que no exista una buena ventilación en el área de trabajo.
- 3.- Usar Goggles ó la mascarilla del equipo autónomo.
- 4.- Usar guantes resistentes a sustancias químicas.
- 5.- En caso de incendio Utilizar Equipo completo de Bombero.

6.2 Precauciones ambientales:

Obedezca las referentes leyes y reglamentos locales, estatales, provinciales y federales. No contamine ningún lago, corriente, estanque, capa freática o suelo. No debe llegar a agua residual.

6.3 Métodos y materiales para la contención y limpieza de derrames o fugas

1. Evitar todas las fuentes de ignición.
2. Ventilar el área.
3. Colocar diques de retención al derrame.
4. Colectar el material y bombearlo a recipientes adecuados
5. Absorber con materiales inertes y disponer a confinamiento los residuos.
6. Toda persona que no lleve equipo de protección debe de salir del área del derrame.

Sección 7. Manejo y Almacenamiento

7.1 Precauciones que se deben tomar para garantizar un manejo seguro:

Utilizar con una ventilación adecuada

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas cualesquiera incompatibilidades:

Cerrar los recipientes herméticamente y mantenerlos en lugar fresco y seco.

Sección 8. Controles de Exposición / Protección Personal

8.1 Parámetros de control:

Límites permisibles para estireno monómero:

LPP= 16 ppm (68 mg/m³)

LPT= 40 ppm (170 mg/m³)

8.2 Controles Técnicos apropiados:

Use sólo con ventilación adecuada y EPP adecuado.

8.3 Medidas de Protección individual:

Medidas higiénicas:

Lave las manos, antebrazos y cara completamente después de manejar productos químicos, antes de comer, fumar y usar el lavabo y al final del período de trabajo. Usar las técnicas apropiadas para remover ropa contaminada.

Verifique que las estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad se encuentren cerca de las estaciones de trabajo.

Protección ojos/cara:

Use gafas de seguridad con protectores laterales. En caso que se formen polvos use gafas protectoras muy ajustadas.

Protección de la piel y del cuerpo

Debe haber a la mano una ducha de seguridad y una fuente para lavado de ojos. Antes de utilizar este producto se debe seleccionar equipo protector personal para el cuerpo basándose en la tarea a ejecutar y los riesgos involucrados y debe ser aprobado por un especialista

Medidas de Protección

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. En caso de que exista la posibilidad de contacto con la piel o con los ojos, utilizar el equipo protector indicado para manos, ojos y para el cuerpo en general. Cuando se exceden los valores límites referidos al puesto de trabajo y/o en caso de liberación del producto debe emplearse el equipo respiratorio indicado.

Protección respiratoria

Use un respirador purificador de aire o con suministro de aire, que esté ajustado apropiadamente y que cumpla con las normas aprobadas si una evaluación de riesgo indica que es necesario. La selección del respirador se debe basar en el conocimiento previo de los niveles, los riesgos de producto y los límites de trabajo de seguridad del respirador seleccionado

Ropa de protección:



Sección 9. Propiedades Físicas y Químicas

Apariencia:

| | |
|---|--------------------------------------|
| Estado físico. | Líquido Viscoso |
| Color. | 100 Apha Máximo |
| Olor. | Aromático |
| Umbral del olor | No Disponible |
| pH | No Disponible |
| Temperatura de fusión | -30 °C (Estireno) |
| Temperatura de ebullición (760 mmHg) | 145.2 °C (Estireno) |
| Punto de Inflamación | 31.0 °C (Estireno) |
| Velocidad de evaporación. | No Disponible |
| Inflamabilidad (sólido, gas) | No Disponible |
| Límites máximo y mínimo de explosión (inflamabilidad) | Superior (6.8 %) Inferior (0.9%) |
| Presión de vapor | 4.5 mmHg |
| Densidad de vapor (aire=1) | 3.6 (Estireno) |
| Densidad relativa | 1.22 ± 0.02 |
| Solubilidad. | Ligeramente soluble |
| Temperatura de auto ignición | 490°C (Estireno) |
| Coefficiente de partición n-octano/agua | No Disponible |
| Temperatura de descomposición | No Disponible |
| Viscosidad @ 25° C (cps) | 2200 ± 100 |
| Peso molecular | 1,000-25,000 |
| Otros datos Relevantes | |

Sección 10. Estabilidad y Reactividad

10.1 Reactividad:

Estable a condiciones normales de operación (25° C)

10.2 Estabilidad química:

Estable : 20-30 °C HR < 50% **Inestable :** (>65°C + Ac. Fuerte ó Peróxido ó Agente Oxidante)

10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas.

Polimerización espontánea: Evitar exponer el producto a temperaturas elevadas (arriba de 40°C) e impedir la mezcla con peroxidos y agentes oxidantes.

10.4 Condiciones que deben evitarse:

Evitar altas temperaturas, fuentes de ignición como flama abierta, usar herramientas a prueba de chispas y equipos a pruebas de explosiones, no utilize recipientes o tuberías de cobre o que esten fabricadas con aleación del mismo.

10.5 Materiales incompatibles:

Ácidos fuertes, peróxido y agentes oxidantes

10.6 Productos de descomposición peligrosos:

Puede producir vapores toxicos ó irritantes, gases y particulas.

Sección 11. Información Toxicológica

11.1 Información sobre las posibles vías de ingreso.

Contacto con los ojos Causa irritación ocular, los síntomas pueden incluir picazón, lagrimeo, enrojecimiento e hinchazón.

Inhalación Los efectos de la exposición pueden incluir dolores de cabeza, fatiga, náuseas, depresión del sistema nervioso central y edema pulmonar.

Contacto con la piel: Nocivo si se absorbe a través de la piel, el contacto directo con este material causa irritación cutánea.

Ingestión: La toxicidad de la dosis oral única es baja.

11.2 Síntomas relacionados con las características físicas, químicas y toxicológicas

| | |
|-------------------------|---|
| Contacto con los ojos.- | Lagrimeo, enrojecimiento. |
| Inhalación | .- Irritación del tracto respiratorio, tos. |
| Contacto con la piel | .- Irritación, resequedad. |
| Ingestión | .- Irritante para la boca, la garganta y el estómago. |

11.3 Efectos inmediatos y retardados, así como efectos crónicos producidos por una exposición a corto y largo plazo

Se ha sugerido que una sobreexposición a concentraciones de este material (o a sus componentes) puede agravar desórdenes preexistentes en el sistema nerviosocentral, efectos sobre la audición y daño a las vías respiratorias. El estireno es irritante al aparato tracto-respiratorio y a los ojos. Puede ser fatal a concentraciones de 10,000 ppm.

11.4 Medidas numéricas de toxicidad (tales como estimaciones de toxicidad aguda)

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Corto plazo Inhalación | 289 mg/m ³ |
| Corto plazo Inhalación | 306 mg/m ³ |

11.5 Efectos interactivos

No disponibles

11.6 Cuando no se disponga de datos químicos específicos

Ninguna observación adicional.

11.7 Mezclas

No hay datos disponibles

11.8 Información sobre la mezcla o sobre sus componentes

El estireno puede producir efectos agudos y crónicos.

11.9 Otra información

De acuerdo a la agencia internacional para la investigación de cáncer (IARC) incluye al Estireno como agente carcinógeno grupo 2B (posible carcinógeno para seres humanos).

Sección 12. Información Ecotoxicológica

12.1.- Toxicidad

La mezcla fue evaluada conforme al Reglamento (CE) n° 1272/2008 y resulta ser no peligrosa para el medio ambiente, aunque contiene sustancias peligrosas para el medio ambiente.

12.2.- Persistencia y degradabilidad

Datos no disponibles

12.3.- Potencial de bioacumulación

Datos no disponibles

12.4.- Movilidad en el suelo

Coefficiente de partición tierra/agua Log Kow (No disponible.)

Sección 13. Información Relativa a la Eliminación de los Productos

Métodos de eliminación

Los desperdicios se deben eliminar de acuerdo con los reglamentos federales, estatales, provinciales y locales.

Se debe reciclar o desechar el material de empaque de acuerdo con las disposiciones de las leyes federales, estatales y locales.

Sección 14. Información Relativa al Transporte

1.- Número ONU

| | |
|---------------------------------|------|
| Transporte terrestre (ADR/RID): | 1263 |
| Transporte marítimo (IMDG): | 1263 |
| Transporte aéreo (IATA/ICAO): | 1263 |

2.- Designación oficial del transporte

| | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Transporte terrestre (ADR/RID): | PRODUCTOS PARA LA PINTURA |
| Transporte marítimo (IMDG): | PAINT RELATED MATERIAL |
| Transporte aéreo (IATA/ICAO): | PAINT RELATED MATERIAL |

3.- Clases relativas al transporte

| | |
|---------------------------------|---|
| Transporte terrestre (ADR/RID): | 3 |
| Transporte marítimo (IMDG): | 3 |
| Transporte aéreo (IATA/ICAO): | 3 |

4.- Grupo de embalaje/emvasado:

| | |
|---------------------------------|-----|
| Transporte terrestre (ADR/RID): | III |
| Transporte marítimo (IMDG): | III |
| Transporte aéreo (IATA/ICAO): | III |

5.- Riesgos Ambientales

Ninguno

6.- Precauciones especiales para el usuario

- Almacenar en lugares frescos y secos (T<25°C y % Hr =50 +/- 10%).
- Evitar el contacto con luz solar.
- El manejo del producto debe ser con equipo de protección adecuado.
- No dañar los contenedores aún estando vacíos, ya que pueden contener residuos de producto (líquido y/o vapor)
- no presurizar, cortar, soldar, perforar.
- Los recipientes vacíos se deben drenar completamente y cerrar con el tapón original.

Sección 15. Información Reglamentaria

15.1.- Disposiciones específicas sobre seguridad, salud y medio ambiente para las sustancias químicas peligrosas o mezclas de que se trate.

NOM-018-STPS-2015, NOM-010-STPS-1999, NOM-004-SCT/200, NOM-005-SCT/200

Sección 16. Otra información incluida

GUIA DE RESPUESTA EN CASO DE EMERGENCIA 2004, POKED GUIDE TO CHEMICAL HAZARDS, HOJAS DE SEGURIDAD DE PROVEEDORES.

Explicación de Abreviaturas

ETA = Estimación de Toxicidad Aguda
FBC = Factor de Bioconcentración
SGA = Sistema Globalmente Armonizado
IATA = Asociación de Transporte Aéreo Internacional
IBC = Contenedor Intermedio para Productos a Granel
IMDG = Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas
Log Kow = logaritmo del coeficiente de reparto octanol/agua
MARPOL = Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación Por los buques, 1973 con el Protocolo de 1978. ("Marpol" = contaminación marina)
ONU = Organización de las Naciones Unidas

Referencias

- 1) Transportation of Dangerous Goods Act- "Reglamento concerniente a las mercancías peligrosas así como a la manipulación, la solicitud de transporte y al transporte mismo de mercancías peligrosas". Extracto de la Gazette de Canadá parte II.
- 2) Gazette de Canadá parte II, Ley sobre productos peligrosos, "Lista de divulgación de los ingredientes".
- 3) Ficha descriptiva del fabricante.
- 4) 29 CFR 1910.1000 Z. Tablas.
- 5) ACGIH 2000 Valores límite umbral (TLV) para productos químicos y agentes físicos.
- 6) Registro de efectos tóxicos de sustancias químicas (RTECS).
- 7) Código de reglamentación de California Propuesta 65.

La información incluida en el presente documento es proporcionada de buena fe y sin garantía, representación, aliciente o permiso de ningún tipo, excepto que es verídica al mejor conocimiento de Especialidades Químicas Para el Poliéster S.A. de C.V. fue obtenida de fuentes fidedignas. La exactitud, adecuación y suficiencia de las precauciones de salud y seguridad aquí expuestas no pueden ser garantizadas, y el comprador es el único responsable de asegurar que el producto sea utilizado, manejado, almacenado y desechado en forma segura y de conformidad con las leyes federales, estatales, municipales y locales aplicables. Especialidades Químicas Para el Poliéster S.A. de C.V. no es responsable de ninguna pérdida, perjuicio o daño personal que sufra el comprador o terceras personas derivado o relacionado en forma alguna con el uso de la información incluida en esta hoja informativa.

Anexo 2. Ficha técnica del Petatillo TRD-600



COLCHONETA MAT

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

COLCHONETA MAT

| DENSIDAD g/m (oz/ft ²) | Alto del rollo cm (in) | Peso aprox. del rollo Kg (lb) |
|---------------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 225 (0.75) | 91.4 (36) | 29 (64) |
| | 95 (37) | 30 (66) |
| | 127 (50) | 40 (88) |
| 260 (0.86) | 129.5 (51) | 78 (172) |
| | 200.6 (79) | 121 (267) |
| 300 (1.00) | 91.4 (36) | 29 (64) |
| | 95 (37) | 30 (66) |
| | 127 (50) | 40 (88) |
| 375 (1.25) | 140 (55) | 44 (97) |
| 450 (1.50) | 95 (37) | 30 (66) |
| | 127 (50) | 40 (88) |
| | 132 (52) | 42 (92) |
| 600 (2.00) | 95 (37) | 30 (66) |
| | 132 (52) | 42 (92) |
| | 152 (60) | 48 (106) |
| 900 (3.00) | 95 (37) | 30 (66) |
| | 127 (50) | 40 (88) |
| | 152.4 (60) | 48 (106) |

La colchoneta MAT es un fieltro de hilos cortados distribuidos multidireccionalmente en un solo plano. Disponible en pesos estándar de 225, 260, 300, 450, 600 y 900 g/m²

La fibra de vidrio "MAT" está diseñada para usarse en sistemas de resinas poliéster ortoftálicas, isoftálicas, viniléster o epóxicas.

Es ideal para aplicaciones de moldeo abierto a baja presión, como soporte de Gel Coat y como un refuerzo para laminado estándar. Se usa en sistemas de resina termofijas, en moldeo manual y como refuerzo para laminados. Algunos usos concretos son: producción de lanchas, gabinetes, cavas, tanques resistentes a la corrosión, piscinas, componentes para camiones, paneles para la construcción, ductos, tuberías y muchas otras partes.

Reducción de tiempos muertos al evitar los cambios de sistemas
Atractivos acabados superficiales por bajo fotografiado.

Alto desempeño en la fabricación de laminados.

BENEFICIOS.

- Buena conformabilidad
- Facilidad de impregnación
- Excelente transparencia de laminado
- Ideal para aplicaciones en combate a la corrosión.

APLICACIONES

Producción de lanchas, gabinetes, cavas, tanques resistentes a la corrosión, piscinas, componentes para camiones.

COLCHONETA MAT

| Tipo de Empaque | Rollo con Centro de cartón Envuelto con Stretch Wrap y Bolsa de Polietileno | | |
|-----------------------------|---|--|--|
| Diam. Del rollo Cm In | Diam. Alto 28 x 91.4 (11 x 36) | Diam. Alto 28 x 127 (11.3 x 50) | Diam. Alto 28 x 132 (11.3 x 52) |
| Peso Aprox Kg (lb) | 29 (64) | 40 (88) | 42 (92) |
| Piezas por tarima | 16 | 16 | 16 |
| Peso tarima Kg (lb) | 480 (1080) | 640 (1411) | 650 (1433) |

ALMACENAMIENTO

Deben ser almacenados en su embalaje original en un área seca. La temperatura no debe exceder los 35° C (95° F) y una humedad relativa por debajo de 75%. Los productos de fibra de vidrio pueden permanecer por largos periodos de tiempo bajo las condiciones especificadas de almacenamiento.

SEGURIDAD

La fibra de vidrio puede causar irritación temporal en la piel, para evitarlo, después de manejarla lávese perfectamente con agua y jabón. Use siempre ropa de manga larga, guantes y anteojos protectores para los ojos. Lave por separado la ropa de trabajo para evitar que la fibra de vidrio que se desprenda se impregne en otras prendas.

Siempre que se maneja o aplica el material se suspenden en el aire partículas, utilice una mascarilla especial desechable para prevenir que estas causen irritación en la nariz y garganta.

Ver hojas de seguridad de materiales y hoja de emergencias de trasportación para fibra de vidrio de Poliformas Plásticas S.A. de C.V.

Dentro de la información que poseemos los datos aquí obtenidos son confiables. Esta información se suministra al margen de cualquier otra garantía expresa o implícita, incluida toda garantía de comercialización o uso para un fin particular es independiente de cualquier otra responsabilidad contraída con el fabricante en vista de que el uso de este material esta fuera de nuestro control. Esta compañía no se hace responsable de cualquier daño o perjuicio resultado del mismo. La decisión final respecto a la utilización de este producto para el uso contemplado, el modo de empleo y el caso que su uso infrinja alguna patente, es responsabilidad únicamente del comprador.

Cielito Linda lote No. 25 y 27 Manzana 2. Parque Industrial Izcalli
Col. Esperanza, Cd. Nezahualcoyotl Edo. de México C.P. 57810
www.poliformasplasticas.com.mx

Anexo 3. Ficha técnica de la Cera desmoldante



ESPECIALIDADES QUÍMICAS PARA EL
POLIÉSTER S.A. DE C.V.

CERA DESMOLDANTE D'OPORTO

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

CERA D'OPORTO(DESMOLDANTE DE 4200)

PROPIEDADES DE LA CERA

| ESPECIFICACIÓN | VALOR | MÉTODO DE PRUEBA |
|-------------------------|--------|------------------|
| Solubilidad en agua (%) | 0 | EQPP-CC-061 |
| % de sólidos (%) | 26 ± 1 | EQPP-CC-001 |
| Punto de flama (° C) | 41 | EQPP-CC-056 |

INGREDIENTES

| | | |
|--------------------------------|------|------|
| Ceras minerales | ---- | ---- |
| Ceras vegetales | ---- | ---- |
| Parafinas | ---- | ---- |
| Solvente derivado del petróleo | ---- | ---- |

DESCRIPCIÓN

Pasta cerosa formulada con ceras vegetales y minerales para lograr un fácil y uniforme desprendimiento de moldes de caucho de silicón.

CARACTERÍSTICAS

- Práctica presentación en pasta
- Secado rápido y fácil de pulir.

BENEFICIOS

- Mas de 10 moldeos por preparación.
- Elimina el uso de un agente separador
- Fácil aplicación manual.
- Excelente desmoldante.
- Desmolda sin dificultad.

APLICACIONES

- Como desmoldante en moldes de caucho de silicón.
- Como desmoldante en la industria de la fibra de vidrio.

CERA D'OPORTO (DESMOLDANTE DE 4200)

RECOMENDACIONES DE EMPLEO

- La superficie debe estar tersa (sin rayas ni grietas).
- Aplique una capa uniforme de desmoldante.
- Deje reposar un mínimo de 12 horas.
- Aplique la segunda mano de cera por secciones, removiendo la primera y brillante.
- Aplique la tercera mano de cera por secciones y repita esta operación hasta aplicar siete manos de cera.

ESTABILIDAD DE ALMACENAMIENTO

La cera tiene una estabilidad de 6 ± 1 años en envase bien cerrado, a partir de su fecha de producción. Debe ser almacenado en envases cerrados bajo techo a una temperatura no mayor de 25° C (77° F) alejado de los rayos del sol.

SEGURIDAD

Ver hojas de seguridad de materiales y hoja de emergencias de trasportación de Especialidades Químicas para el Poliéster S.A. de C.V.

NOTAS

La información y recomendaciones en esta publicación son a nuestro entender enteramente confiables. Las sugerencias ofrecidas para sus usos o aplicaciones son solamente opiniones de EQPP S.A. DE C.V. Los consumidores deberán hacer sus propias pruebas para determinar el comportamiento de este producto en sus objetivos específicos.

Dentro de la información que poseemos los datos aquí obtenidos son confiables. Esta información se suministra al margen de cualquier otra garantía expresa o implícita, incluida toda garantía de comercialización o uso para un fin particular es independiente de cualquier otra responsabilidad contraída con el fabricante en vista de que el uso de este material esta fuera de nuestro control. Esta compañía no se hace responsable de cualquier daño o perjuicio resultado del mismo. La decisión final respecto a la utilización de este producto para el uso contemplado, el modo de empleo y el caso que su uso infrinja alguna patente, es responsabilidad únicamente del comprador.

Anexo 4. Ficha técnica de la Película separadora



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Fecha de emisión: 31/Mar/2017

Fecha próxima revisión: 31/Mar/2020

| Sección 1. Identificación de la Sustancia Química y del Fabricante | |
|---|---|
| 1.1 Nombre del producto: | PELICULA SEPARADORA |
| 1.2 Familia Química: | Alcoholes. |
| 1.3 Uso recomendado: | Desmoldante en aplicaciones de resina Poliéster con refuerzo. |
| 1.4 Fabricado por: | Especialidades Químicas para el Poliéster S.A de C.V. Cielito Lindo No.25 Col. Parque Industrial Izcalli, Nezahualcóyotl Estado de México C.P. 57819 Tel. (55) 47497070 Horario: 08:00 – 18:00 de Lunes a Viernes |
| Distribuido por: | Poliformas Plásticas S. A. de C. V. Calzada Ignacio Zaragoza No. 448 Col. Federal, Del. Venustiano Carranza Ciudad de México. CP.15700 Tel. (55) 5785 0430 Horario: 08:00 – 18:00 de Lunes a Viernes |
| 1.5 En caso de emergencia: | Poliformas: (55) 5785 0430 horario 08:00 – 18:00 de Lunes a Viernes SETIQ: 01 800 002 1400 (República Mexicana las 24 horas) 5559 1588 (Ciudad de México y área metropolitana) 011 52 5559 1588 (para llamadas originadas en otra parte) |
| Sección 2. Identificación de los Peligros | |
| 2.1 Clasificación de la sustancia química peligrosa o mezcla: | |
| Declaraciones de Peligro: | |
| H225 – Líquido y vapores muy inflamables. | |
| H319 – Provoca irritación ocular grave. | |
| H336 – Puede provocar somnolencia o vértigo. | |
| 2.2 Elementos de señalización Sistema Globalmente Armonizado (SGA): | |
| Pictogramas de peligro | |
| | |
| Palabra de advertencia: PELIGRO | |
| Indicación (es) de peligro: | |
| P210: Mantener alejado del calor, chispas, llamas abiertas y superficies calientes. – No fumar. | |
| P261: Evitar respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol. | |
| P305 + P351 + P338: EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS, enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos, de usar lentes de contacto quitarlos cuando pueda hacerse con facilidad. Proseguir lavando | |
| P337+P313: Si la irritación ocular persiste, consultar a un médico. | |
| General | |
| P101: Si se necesita consultar a un médico, tener a mano el recipiente o la etiqueta del producto. | |
| P102: Mantener fuera del alcance de los niños. | |

Prevención

P233: Manténgase el recipiente bien cerrado.
P242: No utilizar herramientas que produzcan chispas.
P243: Tomar medidas de precaución contra las descargas electrostáticas.
P264: Lavarse cuidadosamente las manos después de la manipulación.
P270: No comer, beber o fumar mientras se manipula este producto.
P271: Utilizar sólo al aire libre o en un lugar bien ventilado.
P280: Usar guantes/ropa de protección/equipo de protección para los ojos/la cara.
P260: No respire los vapores o nieblas.

Intervención

P309+P311: EN CASO DE exposición o si la persona se encuentra mal: Llamar a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA o a un médico.
P304+P340: EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar la víctima al aire libre y mantenerla en reposo en una posición que le facilite la respiración.
P303+P361+P353: EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente toda la ropa contaminada. Lavar la piel con agua o tomar una ducha.
P332+P313: En caso de irritación cutánea: consultar a un médico.
P391: Recoger los vertidos.

Almacenamiento

P403 + P235: Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener fresco.
P233: Mantener el recipiente herméticamente cerrado.
P405: Guardar bajo llave.

Eliminación

P501: Eliminar el contenido y recipiente conforme a todas las reglamentaciones locales, regionales, nacionales e internacionales.

Sección 3. Composición / Información sobre los Componentes

Sustancia / Preparado: **MEZCLA**

| Nombre de Ingrediente | # CAS | % en peso |
|-----------------------|------------|-----------|
| Agua | 7732-18-15 | 50 - 55 |
| Alcohol Isopropilico | 67-63-0 | 35 - 40 |
| Alcohol Polivinilico | 25213-24-5 | 5 - 7 |

Cualquier concentración que se muestre como un rango es para proteger la confidencialidad o es debido a la variación del lote. Cualquier concentración mostrada como exacta se basa en la fórmula.

Sección 4. Primeros Auxilios

4.1 Descripción de los Primeros Auxilios:

Contacto con los ojos: Lave abundantemente con agua por lo menos 15 minutos, levantando los párpados superior e inferior en forma alternada. El uso de champú para niños facilitará su eliminación. Si la irritación persiste, consulte a un médico.

Inhalación: Trasladar a la víctima a un lugar seguro lo más pronto posible. Dejar la víctima que repose en un lugar bien ventilado. Si le cuesta respirar, suministrar oxígeno. Si la víctima no respira, practicar la respiración artificial boca a boca. Suministrar inmediatamente ayuda médica.

Contacto con la piel: En caso de contacto, lavar la piel inmediatamente con agua abundante. Qúitese la ropa y calzado contaminados. Si la irritación persiste, consulte a un médico. Lavar la ropa contaminada antes de volverla a usar. Limpiar el calzado completamente antes de volver a usarlo.

Ingestión: Lave la boca con agua. Retirar las prótesis dentales si es posible. Deténgase si la persona expuesta se siente descompuesta porque vomitar sería peligroso. No inducir al vómito a menos que lo indique expresamente el personal médico. En caso de vómito, se debe mantener la cabeza baja de manera que el vómito no entre en los pulmones. Suministrar inmediatamente ayuda médica.

4.2 Síntomas y efectos más importantes, agudos o crónicos:

Contacto con los ojos: Provoca irritación ocular.

Inhalación: Nocivo si se inhala. Puede irritar las vías respiratorias.

Contacto con la piel: Provoca irritación cutánea.

Ingestión: Irritante para la boca, la garganta y el estómago.

4.3 Signos/síntomas de sobreexposición:

Contacto con los ojos:

Los síntomas adversos pueden incluir los siguientes: dolor o irritación, lagrimeo, enrojecimiento.

Inhalación:

Los síntomas adversos pueden incluir los siguientes: irritación del tracto respiratorio, tos.

Contacto con la piel:

Los síntomas adversos pueden incluir los siguientes: irritación, enrojecimiento.

Ingestión:

Los síntomas adversos pueden incluir los siguientes: Irritante para la boca, la garganta y el estómago.

Indicación de la necesidad de recibir atención médica inmediata y, en su caso, de tratamiento especial

Notas para el médico

Tratar sintomáticamente. Contactar un especialista en tratamientos de envenenamientos inmediatamente si se ha ingerido o inhalado una gran cantidad.

Sección 5. Medidas contra Incendios

5.1 Medios de extinción apropiados:

Medios apropiados de extinción

Utilizar polvo químico seco, CO₂, agua pulverizada o espuma (neblina).

Medios no apropiados de extinción

No usar chorro de agua.

5.2 Peligros específicos de la sustancia química peligrosa o mezcla:

Líquido y vapor inflamables. En caso de incendio o calentamiento, ocurrirá un aumento de presión y el recipiente estallará, con el riesgo de que ocurra una explosión. El vapor o gas es más pesado que el aire y se extenderá por el suelo. Los vapores pueden acumularse en áreas bajas o cerradas o desplazarse una distancia considerable hacia la fuente de encendido y producir un retroceso de llama. Los residuos líquidos que se filtran en el alcantarillado pueden causar un riesgo de incendio o de explosión. Este material es nocivo para la vida acuática con efectos de larga duración. Se debe impedir que el agua de extinción de incendios contaminada con este material entre en vías de agua, drenajes o alcantarillados.

Productos de descomposición térmica peligrosos

Los productos de descomposición pueden incluir los siguientes materiales: dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de azufre, compuestos halógenos., óxido/óxidos metálico/metálicos

5.3 Medidas especiales que deben seguir los grupos de combate contra incendio:

Se debe impedir que el agua de extinción de incendios contaminada con este material entre en vías de agua, drenajes o alcantarillados.

Equipo de protección especial para los bomberos

Los bomberos deben llevar equipo de protección apropiado y un equipo de respiración autónomo con una máscara facial completa que opere en modo de presión positiva.

Sección 6. Medidas que deben Tomarse en caso de Derrame o Fuga Accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimiento de emergencia:

Para personal de no emergencia:

No se tomará ninguna medida que implique algún riesgo personal o que no contemple el entrenamiento adecuado. Evacuar los alrededores. No toque o camine sobre el material derramado. Apagar todas las fuentes de ignición. No permitir el uso de bengalas, fumar, o el encendido de llamas en el área de peligro. Evite respirar vapor o neblina. Proporcione ventilación adecuada.

Para el personal de respuesta a emergencias:

Si fuera necesario usar ropa especial para hacer frente al derrame, se tomará en cuenta la información de la Sección 8 sobre los materiales adecuados y no adecuados. Llevar un aparato de respiración apropiado cuando el sistema de ventilación sea inadecuado. Llevar puestos equipos de protección individual adecuados. Consultar también la información bajo "Para personal de no emergencia".

6.2 Precauciones ambientales:

Evite la dispersión del material derramado, su contacto con el suelo, el medio acuático, los desagües y las alcantarillas. Informe a las autoridades pertinentes si el producto ha causado polución medioambiental (alcantarillas, canales, tierra o aire). Material contaminante del agua. Puede ser dañino para el medio ambiente si es liberado en cantidades grandes.

6.3 Métodos y materiales para la contención y limpieza de derrames o fugas:

Derrame pequeño:

Detener la fuga si esto no presenta ningún riesgo. Retire los envases del área del derrame. Diluir con agua y fregar si es soluble en agua. Alternativamente, o si es insoluble en agua, absorber con un material seco inerte y colocar en un contenedor de residuos adecuado. Use herramientas a prueba de chispas y equipo a prueba de explosión. Disponga por medio de un contratista autorizado para la disposición.

Gran derrame:

Detener la fuga si esto no presenta ningún riesgo. Retire los envases del área del derrame. Aproximarse al vertido en el sentido del viento. Evite la entrada en alcantarillas, canales de agua, sótanos o áreas reducidas. Trate los derrames en una planta de tratamiento de aguas residuales o proceda tal como se indica a continuación. Detener y recoger los derrames con materiales absorbentes no combustibles, como arena, tierra, vermiculita o tierra de diatomeas, y colocar el material en un envase para desecharlo de acuerdo con las normativas locales (ver la Sección 13). Use herramientas a prueba de chispas y equipo a prueba de explosión. Disponga por medio de un contratista autorizado para la disposición.

El material absorbente contaminado puede presentar el mismo riesgo que el producto derramado. Nota: Véase la Sección 1 para información de contacto de emergencia y la Sección 13 para eliminación de desechos.

Sección 7. Manejo y Almacenamiento

7.1 Precauciones que se deben tomar para garantizar un manejo seguro:

Medidas de protección

Use el equipo de protección personal adecuado (vea la Sección 8). Está prohibido comer, beber o fumar en los lugares donde se manipula, almacena o trata este producto. Las personas que trabajan con este producto deberán lavarse las manos y la cara antes de comer, beber o fumar. Quitar la ropa contaminada y el equipo de protección antes de entrar a las áreas de comedor. No respire los vapores o nieblas. No ingerir. Evite el contacto con los ojos, la piel y la ropa. Evite la liberación hacia el medioambiente. Use sólo con ventilación adecuada. Llevar un aparato de respiración apropiado cuando el sistema de ventilación sea inadecuado. No entre en áreas de almacenamiento y espacios cerrados a menos que estén ventilados adecuadamente. Mantener en el recipiente original o en uno alternativo autorizado hecho de material compatible, conservar herméticamente cerrado cuando no esté en uso. Mantener alejado del calor, chispas, llamas al descubierto, o de cualquier otra fuente de ignición. Use equipo eléctrico (de ventilación, iluminación y manipulación de materiales) a prueba de explosiones. No utilizar herramientas que produzcan chispas. Evitar la acumulación de cargas electrostáticas. Los envases vacíos retienen residuos del producto y pueden ser peligrosos. No vuelva a usar el envase.

Orientaciones sobre higiene ocupacional general

Está prohibido comer, beber o fumar en los lugares donde se manipula, almacena o trata este producto. Las personas que trabajan con este producto deberán lavarse las manos y la cara antes de comer, beber o fumar. Quitar la ropa contaminada y el equipo de protección antes de entrar a las áreas de comedor. Véase también la Sección 8 acerca de la información adicional sobre las medidas higiénicas.

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas cualesquiera incompatibilidades:

Conservar de acuerdo con las normas locales. Almacenar en un área separada y homologada. Almacenar en el contenedor original protegido de la luz directa del sol en un área seca, fresca y bien ventilada, separado de materiales incompatibles (ver Sección 10) y comida y bebida. Eliminar todas las fuentes de ignición. Separe de los materiales oxidantes. Mantener el contenedor bien cerrado y sellado hasta el momento de usarlo. Los envases que han sido abiertos deben cerrarse cuidadosamente y mantenerse en posición vertical para evitar derrames. No almacenar en contenedores sin etiquetar. Utilícese un envase de seguridad adecuado para evitar la contaminación del medio ambiente. Consúltese la etiqueta del producto y/o hoja de datos técnicos para más información.

Sección 8. Controles de Exposición / Protección Personal

8.1 Parámetros de control:

| | |
|--|--|
| Alcohol Isopropílico (#CAS 67-63-0) | ACGIH TLV (Estados Unidos, 3/2015). Absorbido a través de la piel. TWA: 400 ppm 8 horas. TWA: 980 mg/m ³ 8 horas. STEL: 500 ppm 15 minutos. STEL: 1225 mg/m ³ 15 minutos. |
|--|--|

8.2 Controles Técnicos apropiados:

Use sólo con ventilación adecuada. Utilizar recintos de proceso, sistemas de ventilación locales, u otros procedimientos de ingeniería para mantener la exposición del obrero a los contaminantes aerotransportados por debajo de todos los límites recomendados o estatutarios. Los controles de ingeniería también deben mantener el gas, vapor o polvo por debajo del menor límite de explosión. Utilizar equipo de ventilación anti-exposición.

8.3 Medidas de Protección individual:

Medidas higiénicas

Lave las manos, antebrazos y cara completamente después de manejar productos químicos, antes de comer, fumar y usar el lavabo y al final del período de trabajo. Usar las técnicas apropiadas para remover ropa contaminada. Verifique que las estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad se encuentren cerca de las estaciones de trabajo.

Protección ojos/cara

Se debe usar equipo protector ocular que cumpla con las normas aprobadas cuando una evaluación del riesgo indique que es necesario evitar toda exposición a salpicaduras del líquido, neblinas o polvos.

Protección de las manos

Guantes químico-resistentes e impenetrables que cumplen con las normas aprobadas deben ser usados siempre que se manejen productos químicos si una evaluación del riesgo indica que es necesario.

Protección del cuerpo

Antes de utilizar este producto se debe seleccionar equipo protector personal para el cuerpo basándose en la tarea a ejecutar y los riesgos involucrados y debe ser aprobado por un especialista.

Otro tipo de protección para la piel

Antes de manipular este producto se debe elegir el calzado apropiado y cualquier otra medida adicional de protección de la piel basadas en la tarea que se realice y los riesgos asociados, para lo cual se contará con la aprobación de un especialista.

Protección respiratoria

Use un respirador purificador de aire o con suministro de aire, que esté ajustado apropiadamente y que cumpla con las normas aprobadas si una evaluación de riesgo indica que es necesario. La selección del respirador se debe basar en el conocimiento previo de los niveles, los riesgos de producto y los límites de trabajo de seguridad del respirador seleccionado.

Ropa de protección:



SECCIÓN 9. Propiedades Físicas y Químicas

Apariencia:

| | |
|---|----------------|
| Estado físico | Líquido. |
| Color | Azul. |
| Olor | Alcohol. |
| Umbral del olor | No disponible. |
| pH | No disponible. |
| Punto de fusión | No disponible. |
| Temperatura de ebullición a presión atmosférica | 83°C |
| Punto de Inflamación | 20°C |
| Velocidad de evaporación | No disponible. |
| Inflamabilidad (sólido, gas) | No disponible. |
| Límites máximo y mínimo de explosión (inflamabilidad) | No disponible. |
| Presión de vapor | No disponible. |
| Densidad de vapor (25°C) | No disponible. |
| Densidad (25°C) | 0.90 gr/ml |
| Solubilidad | Poco soluble. |
| Temperatura de autoignición | No disponible. |
| Coefficiente de partición n-octanol/agua | No disponible. |
| Temperatura de descomposición | No disponible. |
| Viscosidad dinámica (25°C) | No disponible. |
| Peso molecular | No disponible. |

Sección 10. Estabilidad y Reactividad

Reactividad:

No existen resultados específicos de ensayos respecto a la reactividad del este producto o sus ingredientes.

Estabilidad química:

El producto es estable. Estable en las condiciones de conservación y manipulación recomendadas (ver Sección 7).

Posibilidad de reacciones peligrosas:

En condiciones normales de almacenamiento y uso, no ocurre reacción peligrosa.

Condiciones que deben evitarse:

Evitar todas las fuentes posibles de ignición (chispa o llama). No someta a presión, corte, suelde, suelde con latón, taladre, esmerile o exponga los envases al calor o fuentes térmicas.

Materiales incompatibles:

Reactivo o incompatible con los siguientes materiales: materiales oxidantes

Productos de descomposición peligrosos:

Bajo condiciones normales de almacenamiento y uso, no se deben producir productos de descomposición peligrosos.

Sección 11. Información Toxicológica

Información sobre efectos toxicológicos

11.1 Toxicidad aguda:

| Nombre de producto o ingrediente | Resultado | Especies | Dosis | Exposición |
|----------------------------------|--|------------------------|--|-------------------------|
| Alcohol Isopropílico | CL50 Inhalación DL50 Cutáneo DL50 Oral | Rata Conejo Rata | 16000 ppm 12800 mg/m ³ 5045 mg/kg | 8 horas 4 horas - |

Mutagenicidad

Ningún efecto mutágeno.

Toxicidad reproductiva

No está considerado tóxico para el sistema reproductor.

Teratogenicidad

Ningún efecto conocido según nuestra base de datos.

Toxicidad sistémica específica de órganos diana (exposición única)

Ningún efecto conocido según nuestra base de datos.

Toxicidad específica de órganos diana (exposiciones repetidas)

Un estudio de efectos de largo plazo de trabajadores expuestos a niveles de estireno en el rango de 25-35 ppm, TWA de 8 horas, indicó una posible pérdida auditiva leve.

Peligro de aspiración

Ningún efecto conocido según nuestra base de datos.

Efectos agudos potenciales en la salud**Contacto con los ojos**

Provoca irritación ocular grave.

Inhalación

Nocivo si se inhala. Puede irritar las vías respiratorias.

Contacto con la piel

Provoca irritación cutánea.

Ingestión

Irritante para la boca, la garganta y el estómago.

Síntomas relacionados con las características físicas, químicas y toxicológicas**Contacto con los ojos**

Los síntomas adversos pueden incluir los siguientes: dolor o irritación, lagrimeo, enrojecimiento.

Inhalación

Los síntomas adversos pueden incluir los siguientes: irritación del tracto respiratorio, tos.

Contacto con la piel

Los síntomas adversos pueden incluir los siguientes: irritación, enrojecimiento.

Ingestión

Los síntomas adversos pueden incluir los siguientes: Irritante para la boca, la garganta y el estómago.

Sección 12. Información Ecotoxicológica**Toxicidad**

| Nombre de producto o ingrediente | Resultado | Especies | Exposición |
|----------------------------------|---|---|---------------------------|
| Alcohol Isopropílico | Agudo EC50 4.7 mg/l Agua fresca Agudo CL50 4.02 mg/l Agua fresca | Dafnia - Daphnia magna Pez - Pimephales promelas | 48 horas 96 horas |
| Alcohol Polivinílico | Agudo CE50 4.9 mg/l Agua fresca No disponible | Algas Verdes No disponible | 72 horas No disponible |

Persistencia y degradabilidad

Biodegradabilidad: Fácilmente biodegradable en condiciones aerobias.

Potencial de bioacumulación

Bioacumulación: No se espera que este material se acumule.

| Nombre de producto o ingrediente | Log Pow | FBC | Potencial |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Alcohol Isopropilico | No disponible | No disponible | No disponible |
| Alcohol Polivinilico | No disponible | No disponible | No disponible |

Movilidad en el suelo

Coefficiente de partición tierra/agua **Log Kow** (No disponible.)

Otros efectos nocivos

Ningún efecto conocido según nuestra base de datos.

Sección 13. Información Relativa a la Eliminación de los Productos

La información de esta sección contiene consejos y orientaciones genéricas. Se debe consultar la lista de usos identificados en la Sección 1 para ver la información sobre otros usos específicos recogida bajo Escenario(s) de exposición.

Métodos de eliminación

Se debe evitar o minimizar la generación de desechos cuando sea posible. Los envases vacíos o los revestimientos pueden retener residuos del producto. Disponga del sobrante y productos no reciclables por medio de un contratista autorizado para la disposición. La eliminación de este producto, sus soluciones y cualquier derivado deben cumplir siempre con los requisitos de la legislación de protección del medio ambiente y eliminación de desechos y todos los requisitos de las autoridades locales. Evitar el desecho. Intentar usar el producto completamente de acuerdo con el uso pretendido. Los envases desechados se deben reciclar. Sólo se deben contemplar la incineración o el enterramiento cuando el reciclaje no sea factible.

Precauciones especiales

Eliminense los residuos del producto y sus recipientes con todas las precauciones posibles. Se tendrá cuidado cuando se manipulen recipientes vacíos que no se hayan limpiado o enjuagado. Los envases vacíos o los revestimientos pueden retener residuos del producto. No recortar, soldar o triturar los recipientes usados a menos que se hayan limpiado a fondo en su interior. Evite la dispersión del material derramado, su contacto con el suelo, el medio acuático, los desagües y las alcantarillas.

Sección 14. Información Relativa al Transporte

DOT / TDG / IMDG/IMO / ICAO/IATA y Regulaciones nacionales:

Número ONU

UN 1219

Nombre de envío adecuado

Bis(2-etilhexanoato) de cobalto

Clase(s) de peligro para el transporte

3



Grupo de embalaje

II

Información adicional

Las normas de los EE.UU. requieren la denuncia de los derrames cuando la cantidad supera la Cantidad denunciante (RQ) para los componentes específicos de este material. Véase CERCLA en la Sección 15. Información regulatoria, para las Cantidades denunciadas.

IMDG Planes de emergencia ("EmS") 3-05

IATA Ninguna información adicional.

Peligros ambientales

Contaminante marino: No

Precauciones especiales para el usuario

Transporte dentro de las instalaciones de usuarios: siempre transporte en recipientes cerrados que estén verticales y seguros. Asegurar que las personas que transportan el producto conocen qué hacer en caso de un accidente o derrame.

Sección 15. Información Reglamentaria

Inventario (Nacional e Internacional)

| | |
|---------------------------|--|
| Estados Unidos (TSCA 8b) | : Todos los componentes están listados o son exentos. |
| Australia (AICS) | : No determinado. |
| Canadá (DSL) | : Al menos un componente no está listado. |
| China (IECSC) | : No determinado. |
| Europa (EINECS) | : No determinado. |
| Nueva Zelanda (NZIoC) | : No determinado. |
| Filipinas (PICCS) | : No determinado. |
| Japón (ENCS) | : Inventario de Sustancias de Japón (ENCS): No determinado. Inventario de Sustancias de Japón (ISHL): No determinado. |
| Malasia (Registro EHS) | : No determinado |
| República de Corea (KECI) | : No determinado. |
| Taiwán (CSNN) | : No determinado. |

Sección 16. Otra Información

| | | | |
|---|---|--|--|
| WHMIS (Canadá)  | NFPA (USA)  | HMIS (USA)  | |
|---|---|--|--|

Explicación de Abreviaturas

ETA = Estimación de Toxicidad Aguda
 FBC = Factor de Bioconcentración
 SGA = Sistema Globalmente Armonizado
 IATA = Asociación de Transporte Aéreo Internacional
 IBC = Contenedor Intermedio para Productos a Granel
 IMDG = Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas
 Log Kow = logaritmo del coeficiente de reparto octanol/agua
 MARPOL = Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques, 1973 con el Protocolo de 1978. ("Marpol" = polución marina)
 ONU = Organización de las Naciones Unidas

Referencias

- Transportation of Dangerous Goods Act- "Reglamento concerniente a las mercancías peligrosas así como a la manipulación, la solicitud de transporte y al transporte mismo de mercancías peligrosas". Extracto de la Gazette de Canadá parte II.
- Gazette de Canadá parte II, Ley sobre productos peligrosos, "Lista de divulgación de los ingredientes".
- Ficha descriptiva del fabricante.
- 29 CFR 1910.1000 Z. Tablas.
- ACGIH 2000 Valores límite umbral (TLV) para productos químicos y agentes físicos.
- Registro de efectos tóxicos de sustancias químicas (RTECS).
- Código de reglamentación de California Propuesta 65.

La información incluida en el presente documento es proporcionada de buena fe y sin garantía, representación, aliciente o permiso de ningún tipo, excepto que es verídica al mejor conocimiento de Poliformas Plásticas S.A. de C.V., o fue obtenida de fuentes fidedignas. La exactitud, adecuación y suficiencia de las precauciones de salud y seguridad aquí expuestas no pueden ser garantizadas, y el comprador es el único responsable de asegurar que el producto sea utilizado, manejado, almacenado y desechado en forma segura y de conformidad con las leyes federales, estatales, municipales y locales aplicables. Poliformas Plásticas S.A. de C.V. no es responsable de ninguna pérdida, perjuicio o daño personal que sufra el comprador o terceras personas derivado o relacionado en forma alguna con el uso de la información incluida en esta hoja informativa.

Anexo 5. Ficha técnica del Gel Coat



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Fecha de emisión: 21/05/2018

Fecha próxima revisión: 21/05/2019

Versión que Sustituye:

Revisión.-

| Sección 1. Identificación de la Sustancia Química peligrosa o mezcla y del proveedor o fabricante | | |
|--|---|------------------|
| 1.1 Nombre del producto: | GEL-COAT | |
| 1.2 Otros medios de identificación: | Poliéster Insaturado | |
| 1.3 Uso recomendado de la sustancia química peligrosa o mezcla, y restricciones de uso: | Es un recubrimiento para plásticos reforzados. | |
| 1.4 Distribuidor: | Poliformas Plásticas S. A. de C. V. Calzada Ignacio Zaragoza No. 448 Col. Federal, Del. Venustiano Carranza. Ciudad de México. CP.15700 Tel. (55) 5785 0430 Horario: 08:00 – 18:00 de Lunes a Viernes | |
| 1.5 En caso de emergencia: | Poliformas: (55) 5785 0430 horario 08:00 – 18:00 de Lunes a Viernes SETIQ: 01 800 002 1400 (República Mexicana las 24 horas) 5559 1588 (Ciudad de México y área metropolitana) 011 52 5559 1588 (para llamadas originadas en otra parte) | |
| Sección 2. Identificación de los Peligros | | |
| 2.1 Clasificación de la sustancia química peligrosa o mezcla: | POLIESTER. | |
| 2.2 Elementos de señalización Sistema Globalmente Armonizado (SGA): | Pictograma de peligro. | |
| | | |
| | Palabra de advertencia: PELIGRO | |
| 2.3 Otros Peligros: | Información complementaria: (DL50 CL50, etc): de acuerdo a la agencia internacional para la investigación de cáncer (IARC) incluye al Estireno como agente carcinógeno grupo 2B (posible carcinógeno para seres humanos) | |
| Sección 3. Composición / Información sobre los Componentes | | |
| 3.1 Sustancias: | | |
| Nombre del Ingrediente: | # CAS | % en peso |
| Resina poliéster insaturada | Mezcla | 80-100 |
| Monómero de Estireno | 100-42-5 | 10-20 |
| Silica Amorfa Pirógena | 112945-52-5 | 1-5 |
| 3.2 Mezclas: | | |

Producto.- GEL-COAT

Página: 1/7

Sección 4. Primeros Auxilios

4.1 Descripción de los Primeros Auxilios:

| | |
|------------------------------|--|
| Contacto con los ojos | Enjuague, con un chorro de agua corriente por aproximadamente 15 minutos, levantando ocasionalmente los párpados superior e inferior. Pida ayuda médica. |
| Inhalación | Evacuar a la víctima a un área segura lo mas pronto posible. Si respira con dificultad, dar oxígeno. Si la víctima no respira, dar respiración de boca a boca. Suministrar ayuda medica inmediatamente |
| Contacto con la piel: | Lavar completa y cuidadosamente la piel contaminada con agua corriente, con un jabón suave y no abrasivo. Si la irritación persiste, pida atención médica. |
| Ingestión: | NO INDUCIR VÓMITO, este material puede entrar a los pulmones durante el vómito, administrar uno o dos vasos de leche o agua a la víctima. Nunca administre algo por vía oral a una persona inconciente. SOLICITAR INMEDIATA ATENCIÓN MÉDICA. |

4.2 Síntomas y efectos más importantes, agudos o crónicos:

Efectos cancerígenos:

Resina Poliéster Insaturada: Clasificación A4 (No clasificable para humanos o animales) por ACGIH.
Clasificación 2B (Posible para humanos) por IARC

Silica Amorfa Pirógena: Efectos no negativos

Efectos mutágenos: No Disponible

Efectos en la piel: Una prolongada exposición al producto puede causar dermatitis. Una repetida o prolongada sobre exposición, que se acerque concentraciones peligrosas puede causar daños al hígado y riñón.

4.3 Signos/síntomas de sobreexposición:

Por exposición crónica: Se ha sugerido que una sobreexposición a concentraciones de este material (o a sus componentes) puede agravar desórdenes preexistentes en el sistema nerviosocentral, efectos sobre la audición y daño a las vías respiratorias. El estireno es irritante al aparato tracto-respiratorio y a los ojos. Puede ser fatal a concentraciones de 10,000 ppm.

Sección 5. Medidas contra Incendios

5.1 Medios de extinción apropiados:

Medios apropiados de extinción

Utilice dióxido de carbono, espuma, químicos secos o nebulizador de agua para extinguir.

Medios no apropiados de extinción

No usar chorro de agua potente con el fin de evitar la dispersión y propagación del fuego.

5.2 Peligros específicos de la sustancia química peligrosa o mezcla:

La combustión puede producir Bióxido de carbono que en altas concentraciones puede resultar asfixiante y Monóxido de carbono el cual es ALTAMENTE TÓXICO

5.3 Medidas especiales que deben seguir los grupos de combate contra incendio:

Los bomberos deben llevar equipo de protección apropiado y un equipo de respiración autónomo con una máscara facial completa que opere en modo de presión positiva.

Sección 6. Medidas que deben Tomarse en caso de derrame o fuga Accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimiento de emergencia:

Para el personal de respuesta a emergencias:

- 1.- Usar ropa de protección para evitar el contacto repetido con el producto.
- 2.- Usar mascarilla de protección con filtro para vapores orgánicos ó equipo autónomo en caso de que no exista una buena ventilación en el área de trabajo.
- 3.- Usar Goggles ó la mascarilla del equipo autónomo.
- 4.- Usar guantes resistentes a sustancias químicas.
- 5.- En caso de incendio Utilizar Equipo completo de Bombero.

6.2 Precauciones ambientales:

Obedezca las referentes leyes y reglamentos locales, estatales, provinciales y federales. No contamine ningún lago, corriente, estanque, capa freática o suelo. No debe llegar a agua residual.

6.3 Métodos y materiales para la contención y limpieza de derrames o fugas

Detener la fuga si esto no presenta ningún riesgo. Eliminar todas las fuentes de ignición. Contenga con un material inerte, recupera lo más posible y coloque el sobrante en un recipiente para desechos adecuado. Advierta al personal autorizado que se mantenga alejado. Evite la entrada al alcantarillado o a zonas cerradas.

Sección 7. Manejo y Almacenamiento

7.1 Precauciones que se deben tomar para garantizar un manejo seguro:

Utilizar solamente en zonas bien ventiladas: Evite inhalación y el contacto con los ojos, la piel y la ropa.

Utilice el equipo de protección personal adecuado a su trabajo. Los recipientes vacíos pueden contener producto y vapores del producto. No exponga al calor, fuego, chispas u otras fuentes de ignición tales como cortar, soldar, perforar, triturar, o electricidad estática. Instale duchas y equipo par lavar los ojos en las áreas de utilización.

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas cualesquiera incompatibilidades:

Conservar a distancia considerable del calor y de toda fuente de ignición. Conservar el recipiente bien cerrado y en lugar fresco y bien ventilado. Poner los contenedores o recipientes de este producto en el suelo

Sección 8. Controles de Exposición / Protección Personal

8.1 Parámetros de control:

Silica Amorfa Pirógena

OSHA PEL (Estados Unidos)

TWA: 0.8 mg/m³

ACGIH TLV (Estados Unidos) Nota:10 mg/m³

TWA: 3 mg/m³

8.2 Controles Técnicos apropiados:

Una ventilación local o de otros controles de ingeniería son recomendados para mantener las concentraciones de vapores inferiores a los límites. Instale duchas y equipo para lavar los ojos en las áreas de utilización.

8.3 Medidas de Protección individual:

Medidas higiénicas:

Lave las manos, antebrazos y cara completamente después de manejar productos químicos, antes de comer, fumar y usar el lavabo y al final del período de trabajo. Usar las técnicas apropiadas para remover ropa contaminada.

Verifique que las estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad se encuentren cerca de las estaciones de trabajo.

Protección ojos/cara:

Use gafas de seguridad con protectores laterales. En caso que se formen polvos use gafas protectoras muy ajustadas.

Protección de la piel y del cuerpo

Debe haber a la mano una ducha de seguridad y una fuente para lavado de ojos. Antes de utilizar este producto se debe seleccionar equipo protector personal para el cuerpo basándose en la tarea a ejecutar y los riesgos involucrados y debe ser aprobado por un especialista

Medidas de Protección

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. En caso de que exista la posibilidad de contacto con la piel o con los ojos, utilizar el equipo protector indicado para manos, ojos y para el cuerpo en general. Cuando se exceden los valores límites referidos al puesto de trabajo y/o en caso de liberación del producto debe emplearse el equipo respiratorio indicado.

Protección respiratoria

Use un respirador purificador de aire o con suministro de aire, que esté ajustado apropiadamente y que cumpla con las normas aprobadas si una evaluación de riesgo indica que es necesario. La selección del respirador se debe basar en el conocimiento previo de los niveles, los riesgos de producto y los límites de trabajo de seguridad del respirador seleccionado

Ropa de protección:



Sección 9. Propiedades Físicas y Químicas

Apariencia:

| | |
|---|-----------------------------------|
| Estado físico. | Líquido Viscoso |
| Color. | Diferentes colores |
| Olor. | Aromático |
| Umbral del olor | No Determinado |
| pH | No Determinado |
| Temperatura de fusión | -31 °C (Estireno) |
| Temperatura de ebullición | 145.2 °C (Estireno) |
| Punto de Inflamación | 31.0 °C (Estireno) |
| Velocidad de evaporación. | No Determinado |
| Inflamabilidad (sólido, gas) | No Determinado |
| Límites máximo y mínimo de explosión (inflamabilidad) | Nivel Bajo: 1.2% Nivel Alto: 6.1% |
| Presión de vapor | No Determinado |
| Densidad de vapor (aire=1) | 3.6 (Estireno) |
| Densidad relativa | 1.09 a 1.13 |
| Solubilidad. | Insoluble |
| Temperatura de auto ignición | 490°C (Estireno) |
| Coefficiente de partición n-octano/agua | No Determinado |
| Temperatura de descomposición | No Determinado |
| Viscosidad @ 25° C (cps) | 2200 ± 100 |
| Peso molecular | No Aplica |
| Otros datos Relevantes | |

Sección 10. Estabilidad y Reactividad

10.1 Reactividad:

Estable a condiciones normales de operación (25° C)

10.2 Estabilidad química:

Estable : 20-30 °C HR < 50% Inestable : (>65°C + Ac. Fuerte ó Peróxido ó Agente Oxidante)

10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas:

Polimeriza en la presencia de peróxidos orgánicos, materiales oxidantes o calor

10.4 Condiciones que deben evitarse:

Evitar altas temperaturas, fuentes de ignición como flama abierta, usar herramientas a prueba de chispas y equipos a pruebas de explosiones, no utilice recipientes o tuberías de cobre o que esten fabricadas con aleación del mismo.

10.5 Materiales incompatibles:

Ácidos fuertes, peróxido y agentes oxidantes

10.6 Productos de descomposición peligrosos:

Puede producir vapores toxicos ó irritantes, gases y partículas.

Sección 11. Información Toxicológica

11.1 Información sobre las posibles vías de ingreso.

Contacto con los ojos Causa irritación ocular, los síntomas pueden incluir picazón, lagrimeo, enrojecimiento e hinchazón.

Inhalación Los efectos de la exposición pueden incluir dolores de cabeza, fatiga, náuseas, depresión del sistema nervioso central y edema pulmonar.

Contacto con la piel: Nocivo si se absorbe a través de la piel, el contacto directo con este material causa irritación cutánea.

Ingestión: La toxicidad de la dosis oral única es baja.

11.2 Síntomas relacionados con las características físicas, químicas y toxicológicas

La inhalación puede causar una fuerte irritación tracto respiratoria y efectos en el sistema nervioso central, incluso dolor de cabeza, náusea, vomito y pérdida de coordinación. El contacto directo puede producir irritación en los ojos y en la piel. La exposición prolongada del ojo puede causar irritación en los párpados. La exposición prolongada puede producir náusea, pérdida del apetito, debilidad general, cambios en la química de la sangre, y efectos de los sistemas nerviosos periféricos y centrales. La exposición prolongada de la piel puede producir dermatitis.

11.3 Efectos inmediatos y retardados, así como efectos crónicos producidos por una exposición a corto y largo plazo

Se ha sugerido que una sobreexposición a concentraciones de este material (o a sus componentes) puede agravar desórdenes preexistentes en el sistema nerviosocentral, efectos sobre la audición y daño a las vías respiratorias. El estireno es irritante al aparato tracto-respiratorio y a los ojos. Puede ser fatal a concentraciones de 10,000 ppm.

11.4 Medidas numéricas de toxicidad (tales como estimaciones de toxicidad aguda)

| | | |
|----------------------|-------------------------|--------------------|
| Monómero de Estireno | LC50 (inhalativo, rata) | 12 mg/l/4h (RTECS) |
| | LD50 (Oral, rata) | 2650 mg/kg (RTECS) |

11.5 Efectos interactivos

Se han registrado algunos efectos con ratones después de aplicar exposiciones repetidas.

11.6 Cuando no se disponga de datos químicos específicos

Ninguna observación adicional.

11.7 Mezclas

No hay datos disponibles

11.8 Información sobre la mezcla o sobre sus componentes

El estireno puede producir efectos agudos y crónicos.

11.9 Otra información

De acuerdo a la agencia internacional para la investigación de cáncer (IARC) incluye al Estireno como agente carcinógeno grupo 2B (posible carcinógeno para seres humanos).

Sección 12. Información Ecotoxicológica

12.1.- Toxicidad

Tóxico para los organismos acuáticos. No debe arrojarse al sistema de alcantarillado u otras fuentes de agua en concentraciones superiores a los límites establecidos en reglamentos o permisos

12.2.- Persistencia y degradabilidad

Datos no disponibles

12.3.- Potencial de bioacumulación

Datos no disponibles

12.4.- Movilidad en el suelo

Coefficiente de partición tierra/agua Log Kow (No disponible.)

Sección 13. Información Relativa a la Eliminación de los Productos

Métodos de eliminación

Los desperdicios se deben eliminar de acuerdo con los reglamentos federales, estatales, provinciales y locales.

Se debe reciclar o desechar el material de empaque de acuerdo con las disposiciones de las leyes federales, estatales y locales.

Sección 14. Información relativa al transporte

1.- Número ONU

Transporte terrestre (ADR/RID): 1263
Transporte marítimo (IMDG): 1263
Transporte aéreo (IATA/ICAO): 1263

2.- Designación oficial del transporte

Transporte terrestre (ADR/RID): PRODUCTOS PARA LA PINTURA
Transporte marítimo (IMDG): PAINT RELATED MATERIAL
Transporte aéreo (IATA/ICAO): PAINT RELATED MATERIAL

3.- Clases relativas al transporte

Transporte terrestre (ADR/RID): 3
Transporte marítimo (IMDG): 3
Transporte aéreo (IATA/ICAO): 3

4.- Grupo de embalaje/emvasado:

Número ONU: 1866 Clase del Peligro : 3
Grupo de Embalaje: III Disposiciones especiales (IMDG): 223, 944, 955
Contaminante Marino : No aplica Tipo FEm : F-E, S-E Categoría E

5.- Riesgos Ambientales

Ninguno

6.- Precauciones especiales para el usuario

- Almacenar en lugares frescos y secos (T<25°C y % Hr =50 +/- 10%).
- Evitar el contacto con luz solar.
- El manejo del producto debe ser con equipo de protección adecuado.
- No dañar los contenedores aún estando vacíos, ya que pueden contener residuos de producto (líquido y/o vapor)
- no presurizar, cortar, soldar, perforar.
- Los recipientes vacíos se deben drenar completamente y cerrar con el tapón original.

Sección 15. Información Reglamentaria

15.1.- Disposiciones específicas sobre seguridad, salud y medio ambiente para las sustancias químicas peligrosas o mezclas de que se trate.

IMDG Classification: Resin solution 3 UN 1866, PG III, Marine Pollutant, Flash Point 31°C, EmS No. 3-05, MFAG Table 310.

IATA Classification: Resin solution, 3, Un 1866, PG III Pkg Inst passenger 309; cargo 310

Sección 16. Otra Información incluida

Esta sección no hace referencia a todas las listas de conformidad reglamentarias aplicables.

OSHA: Peligrosos por definición en el "Hazard Communication Standard" (29 CFR 1910.1200)

Atención proposición 65: Este producto contiene químicos conocidos en el estado de California como causantes de cáncer, defectos al nacer y/o daño reproductivo.

SARA 302 Componentes: Ninguno.

SARA 313 Componentes: Resina en solución

Explicación de Abreviaturas

ETA = Estimación de Toxicidad Aguda
FBC = Factor de Bioconcentración
SGA = Sistema Globalmente Armonizado
IATA = Asociación de Transporte Aéreo Internacional
IBC = Contenedor Intermedio para Productos a Granel
IMDG = Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas
Log Kow = logaritmo del coeficiente de reparto octanol/agua
MARPOL = Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación Por los buques, 1973 con el Protocolo de 1978. ("Marpol" = polución marina)
ONU = Organización de las Naciones Unidas

Referencias

- 1) IMDG. Código Internacional de Mercancías Peligrosas 2010
- 2) Ficha descriptiva del fabricante.
- 3) ACGIH 2000 Valores límite umbral (TLV) para productos químicos y agentes físicos.
- 4) Registro de efectos tóxicos de sustancias químicas (RTECS).
- 5) NOM-010-SCT2-2003 Disposiciones de compatibilidad y segregación, para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- 6) NOM-002-SCT /2003 Listado de sal sustancias y materiales peligrosos mas usualmente transportados
- 7) NOM-003-SCT-2000 Características de las etiquetas de envases y embalajes destinadas al transporte de sustancias y residuos peligrosos
- 8) NOM-007-SCT2-2002 Envase y embalajes destinados al transporte de sustancias y residuos peligrosos.
- 9) NOM-052-SEMARNAT-2005 Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

La información incluida en el presente documento es proporcionada de buena fe y sin garantía, representación, aliciente o permiso de ningún tipo, excepto que es verídica al mejor conocimiento de Especialidades Químicas Para el Poliéster S.A. de C.V. fue obtenida de fuentes fidedignas. La exactitud, adecuación y suficiencia de las precauciones de salud y seguridad aquí expuestas no pueden ser garantizadas, y el comprador es el único responsable de asegurar que el producto sea utilizado, manejado, almacenado y desechado en forma segura y de conformidad con las leyes federales, estatales, municipales y locales aplicables. Especialidades Químicas Para el Poliéster S.A. de C.V. no es responsable de ninguna pérdida, perjuicio o daño personal que sufra el comprador o terceras personas derivado o relacionado en forma alguna con el uso de la información incluida en esta hoja informativa.

Anexo 6. Ficha técnica del Catalizador



BUTANOX M-50

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

BUTANOX M-50

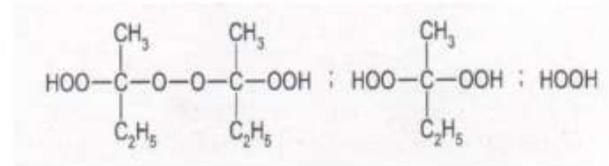
PROPIEDADES DEL CATALIZADOR

| ESPECIFICACIÓN | VALOR |
|------------------------------------|-------------------|
| Apariencia (S.U.) | Líquido claro |
| Densidad 20°C (g/cm ³) | 1.18 ± 0.03 |
| Viscosidad 20°C (mPa*s) | 24 ± 2 |
| Solubilidad | Insoluble en agua |
| Contenido de oxígeno activo (%) | 8.9 ± 0.1 |
| Contenido de agua (%) | 3.5 ± 0.5 |
| Contenido de peróxido (%) | 33 ± 05 |

PROPIEDADES DEL CATALIZADOR

DESCRIPCIÓN

El BUTANOX es un peróxido de metil etil cetona (MEKP) diluido en Metil ftalato, cuya fórmula es:



El BUTANOX es utilizado para el curado a temperatura ambiente de resinas poliéster insaturadas y gel coats, los cuales deben llevar integrado un sistema de aceleración a base de sales de cobalto.

CARACTERÍSTICAS

- Alto contenido de oxígeno activo (8.9 ± 0.1)
- Fácil integración a las resinas y gel coat's.
- Bajo contenido de agua.
- Líquido incoloro transparente libre de materia en suspensión.

BENEFICIOS

- Proporciona excelente tiempo de curado, alta productividad por molde.
- Control de vida útil del producto basado en apariencia.
- Fabricación de piezas resistentes a la luz cosa que no es posible con el sistema de curado peróxido de benzoilo (acelerante de amina)

APLICACIONES

- Este catalizador es utilizado a temperatura ambiente como agente de curado en resinas poliéster insaturada del tipo:
 - a) Poliéster uso general
 - b) Poliéster para laminación
 - c) Gel Coat
 - d) Lacas
 - e) Recubrimientos

| | |
|----------------------|------------|
| Fecha de Elaboración | 05/06/2014 |
| Revisión | ----- |
| # de Revisión | 0 |

BUTANOX M50

RECOMENDACIONES DE EMPLEO

- Este producto es usado ampliamente para la catalizar las resinas poliéster y gel coats.
- El porcentaje de BUTANOX que se recomienda utilizar es del 1 al 2 % en peso de catalizador.
- Siempre se recomienda hacer una prueba con una pequeña muestra y después escalar las cantidades al peso de la resina o gel coat que se desee catalizar.
- No se recomienda dejar el envase del catalizador abierto a la intemperie.

ESTABILIDAD DE ALMACENAMIENTO

El BUTANOX tiene una estabilidad óptima de 3 meses a partir de su fecha de producción. Debe ser almacenado en envases cerrados bajo techo a una temperatura no mayor de 25° C (77 ° F) alejado de fuentes directas de calor, rayos del sol, chispas y agentes oxidantes.

SEGURIDAD

Ver Hojas de Seguridad de Materiales y Hoja de Emergencia de Transportación de Poliformas Plásticas SA de CV

Para el manejo del producto el personal debe utilizar el equipo de seguridad abajo descrito.

- Uso de Gafas, máscaras y guantes
- Buena ventilación
- Evitar contacto con las piezas oxidadas
- No poner nunca en contacto directo con acelerantes



PRESENTACIÓN

Garrafa de 3.5 y 20 Kg.

FABRICADO POR:

AKZO NOBEL CHEMICALS, SA DE CV

PARA:

POLIFORMAS PLASTICAS, SA DE CV

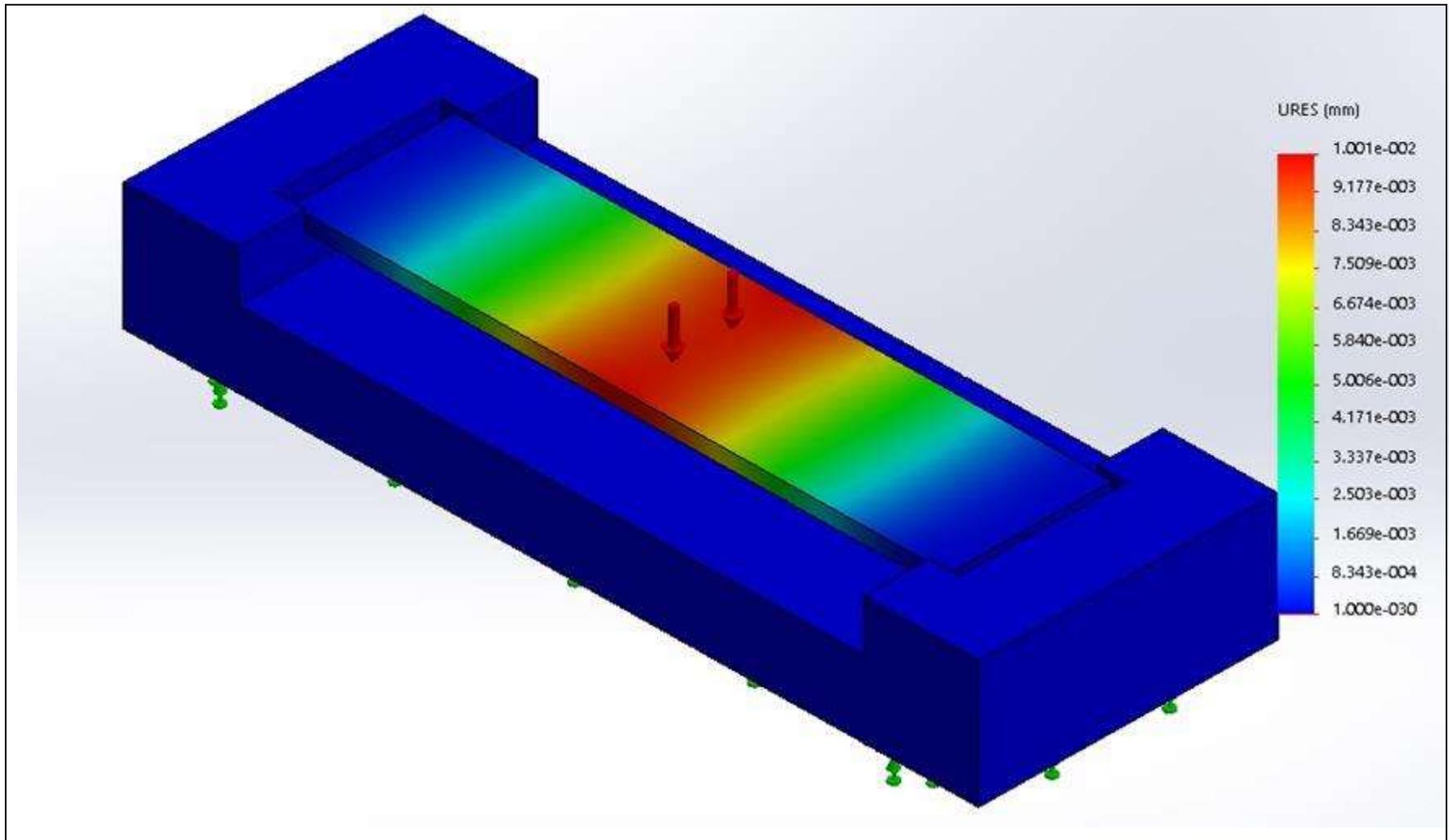
ADVERTENCIA

La información y las recomendaciones se basan en nuestra experiencia y conocimientos actuales. Esta información se da de buena fe y no constituye una garantía, expresa o implícita. Los usuarios deben de realizar sus propias evaluaciones para determinar la idoneidad de la información para sus propósitos particulares. En ningún caso la empresa será responsable de cualquier reclamación, pérdida o daño que pueda ocurrir debido al mal uso del producto. Esta información puede ser modificada sin previo aviso.

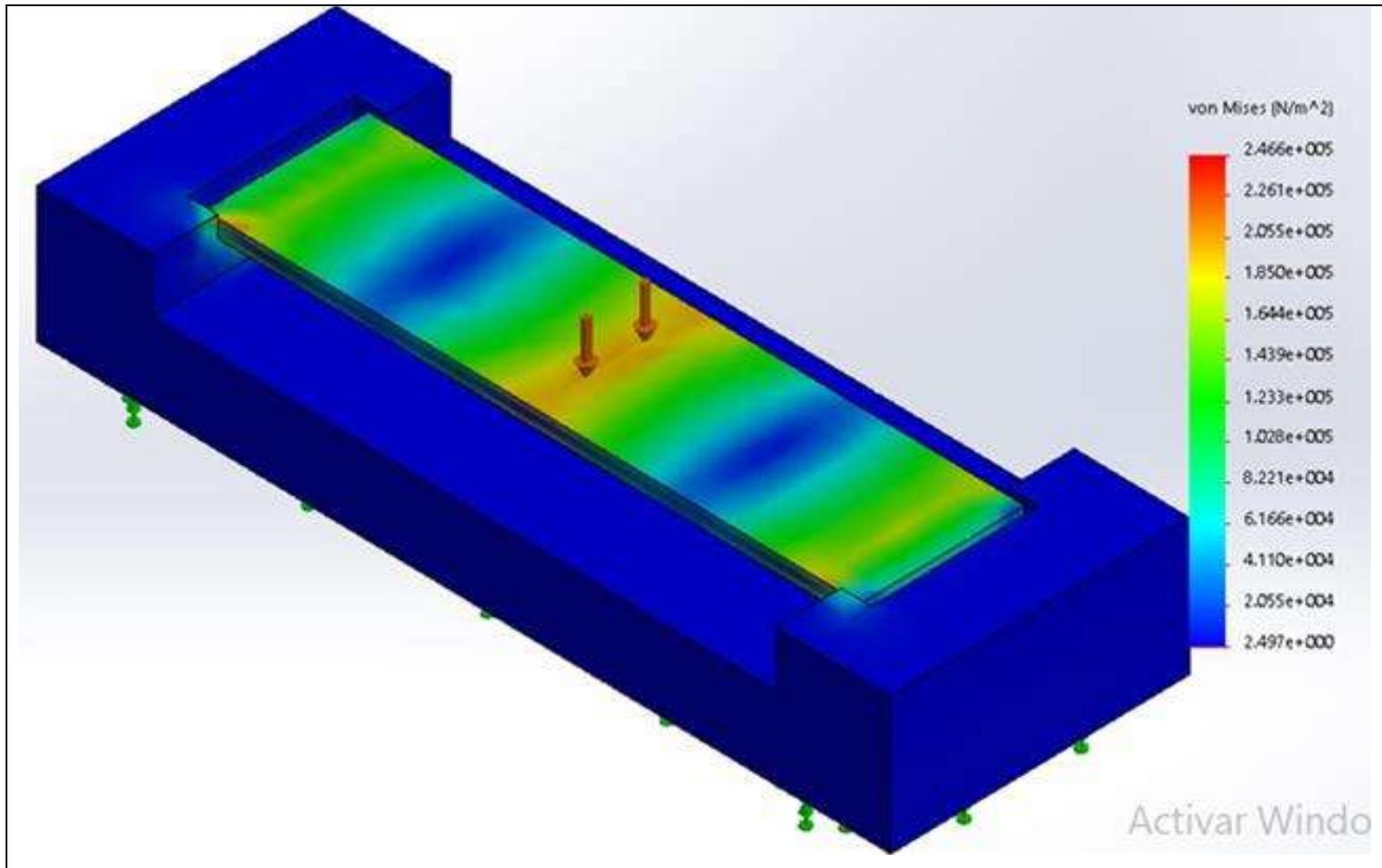
Cielito Lindo lote No. 25 y 27 Manzana 2. Parque Industrial Izcalli Col. Esperanza, Cd. Nezahualcóyotl Edo. de México C.P. 57810 Tel. 47 49 70 70, Lada sin costo 01 800 56 19 101, www.poliformasplasticas.com.mx

| | |
|----------------------|------------|
| Fecha de Elaboración | 05/06/2014 |
| Revisión | ----- |
| # de Revisión | 0 |

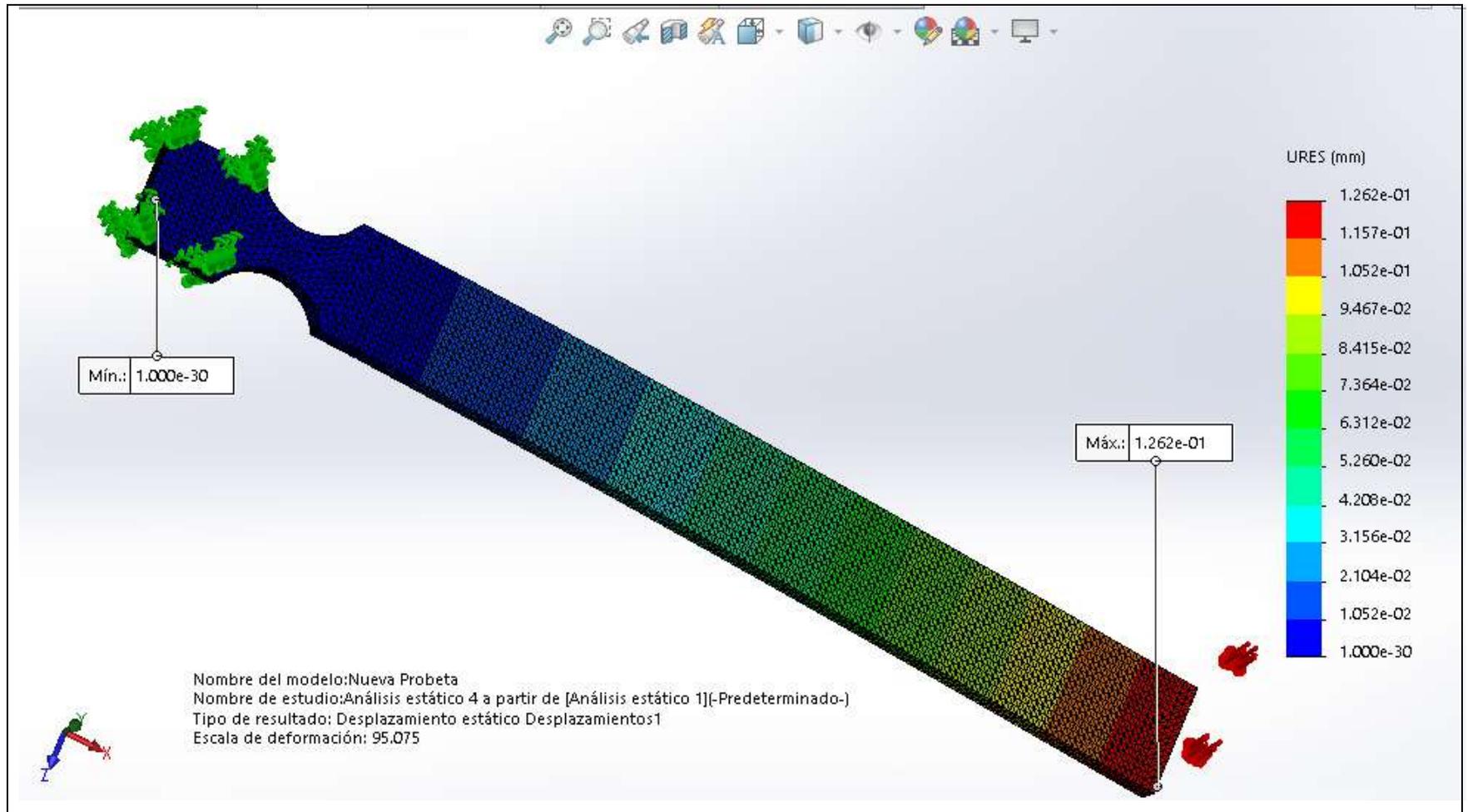
Anexo 7. Desplazamiento máximo de la probeta para diferentes condiciones de carga. Fuente Propia



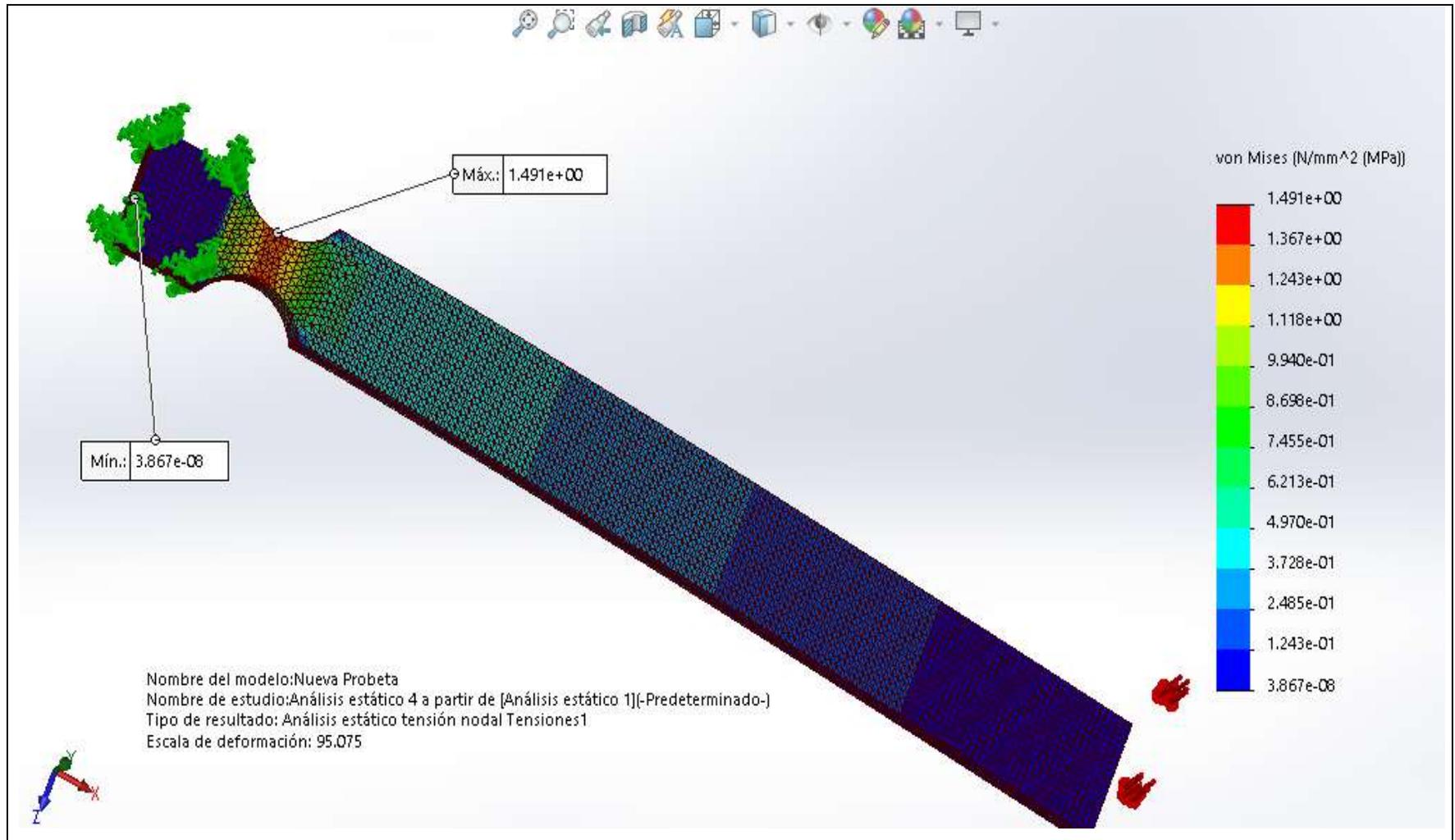
Anexo 8. Máxima tensión de von mises de la probeta para diferentes condiciones de carga. Fuente Propia



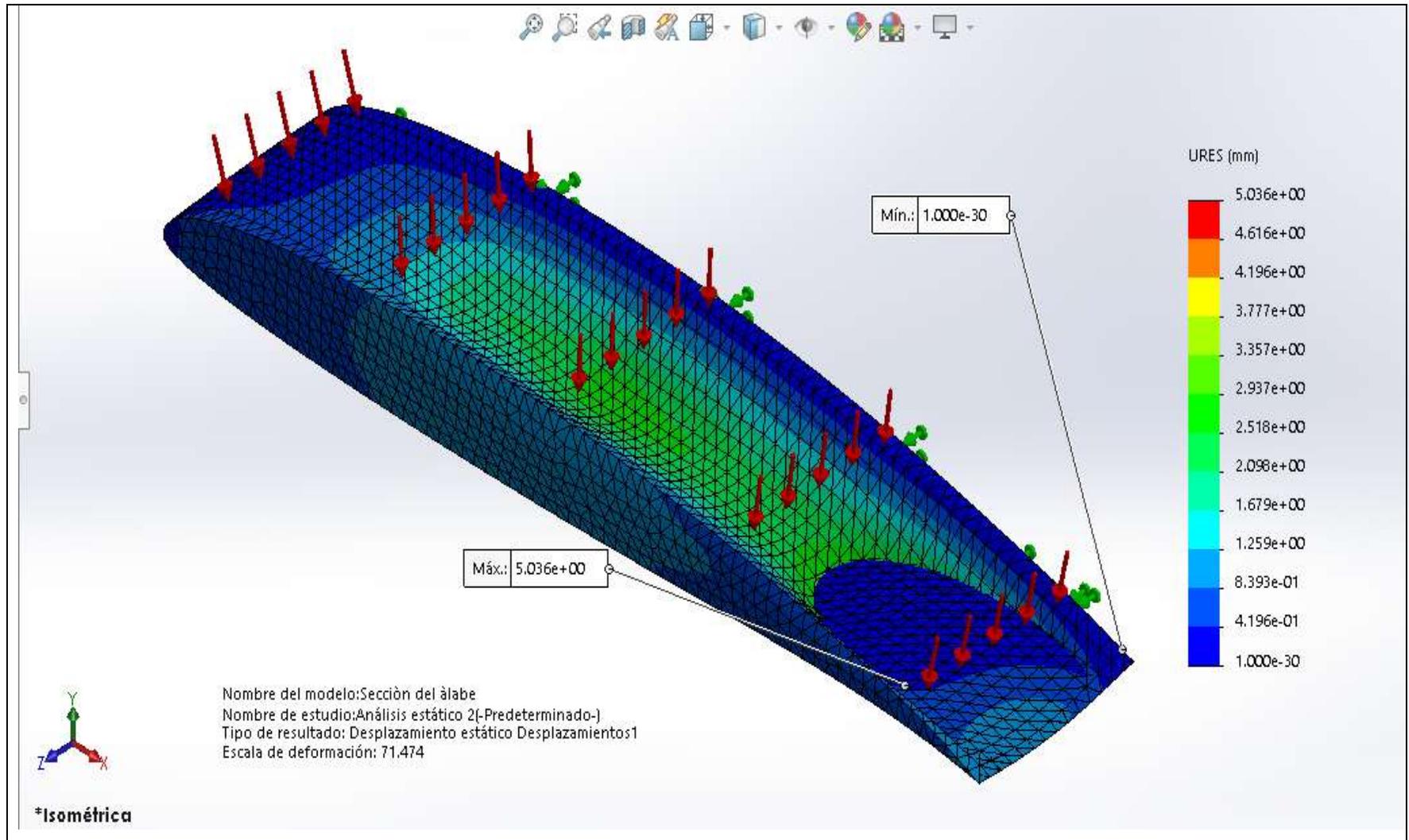
Anexo 9. Resultado del desplazamiento máximo de la geometría final de la probeta. Fuente Propia



Anexo 10. Resultado de la tensión máxima de von mises sobre la geometría final de la probeta, Fuente Propia



Anexo 11. Resultado del desplazamiento máximo de la sección del álabe. Fuente Propia



Anexo 12. Resultado de la tensión máxima de von mises de la sección del álabe. Fuente Propia

