



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VERIFICACION EXPERIMENTAL DE CONSTANTES ELÁSTICAS DE PLACAS DE LAMINADO COMPUESTO PRFV, A TRAVÉS DE SUS FRECUENCIAS NATURALES Y MODOS DE VIBRACION

MEMORIA PARA OPTAR A TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

LUIS DAVID MORONI REY

PROFESOR GUÍA:
VIVANA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO PALMA HILLERNS
WILLIAM CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico

POR: Luis David Moroni Rey

FECHA: 28-08-2017

PROFESOR GUÍA: Viviana Meruane Naranjo

VERIFICACION EXPERIMENTAL DE CONSTANTES ELÁSTICAS DE PLACAS DE LAMINADO COMPUESTO PRFV, A TRAVÉS DE SUS FRECUENCIAS NATURALES Y MODOS DE VIBRACION

El plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) es un material compuesto de una matriz de plástico y un refuerzo de fibras de vidrio. Un plástico particular es la resina epoxica-viniléster, que reforzada con fibras de vidrio posee altas propiedades mecánicas, excelente resistencia a la corrosión y baja densidad. Su proceso de fabricación puede ser de tipo manual (Hand Lay Up), donde se aplican secuencialmente refuerzos de fibras humectadas en Resina. Estos refuerzos pueden ser fibras cortas aleatorias y fibras largas bidireccionales. Alternativamente la fabricación puede ser de tipo automática (Filament Winding), donde fibras unidireccionales humectadas con resina son enrolladas en torno a una matriz cilíndrica.

Las propiedades mecánicas de este material compuesto dependen del tipo de proceso, tipos de refuerzos, porcentaje en volumen de resina y orientación de cada laminado. El objetivo de esta memoria es determinar las constantes elásticas reales de placas de PRFV mediante un modelo analítico ajustado a los datos experimentales. Es importante entender que al ser un material compuesto por fibras alineadas, cada placa tendrá tantas constantes elásticas como lo tiene un material ortotrópico. En esta memoria se determinan 6 constantes elásticas (E_x , E_y , G_{xy} , G_{xz} , G_{yz} y ν_{xy}).

Para lograr este objetivo, se fabrican 11 placas de PRFV de 300 x 200 [mm], con distintos tipos de secuencias de laminación. Cada placa, posicionada de tal manera de no tener ningún tipo de restricción es excitada por medio de un martillo modal. Posteriormente, un acelerómetro registra las funciones de respuesta en frecuencia de éstas. Con el programa Femtools se determinarán las frecuencias naturales y modos de vibración representativos de cada placa. Por otro lado el modelo analítico estará basado en las ecuaciones de teoría de mezclas y de Halpin-Tsai. De estas se obtienen las constantes elásticas a utilizar en el análisis modal por elementos finitos con el programa Ansys. Las frecuencias naturales y modos de vibración obtenidas se correlacionan con las obtenidas en el método experimental. Se optimizan los modos de vibración del método computacional, para obtener las constantes elásticas del método experimental, que corresponden a las reales de cada placa.

DEDICATORIA

Esta memoria de título se la dedico a mi amada familia, mi compañera de siempre Natalia, que me acompañó en esos momentos difíciles de estrés y cansancio entregándome amor y fuerza para continuar y por supuesto a mis hijos Amaru y Nahuel que con su dulzura y sonrisas motivaron siempre mi trabajo. Gracias familia, sin ustedes hubiese sido todo más difícil de lograrlo. Los amo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Natalia e hijos, y por supuesto a la familia que me educó desde niño con valores y amor.

A mi madre Gloria, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyó. Mamá gracias porque eso me permitió tener una carrera para mi futuro, mucho de esto te lo debo a ti.

A mi padre Jorge, por ser un importante pilar en la persona que soy ahora, el me maravilló con la ingeniería desde niño, me enseñó la importancia del orden en el trabajo y el pensamiento crítico.

También le doy las gracias por supuesto, a mi amada abuela Aida, quien siempre me ha entregado amor y apoyo incondicional, me ha enseñado a ser perseverante y a valorar la importancia de finalizar mi carrera con esta memoria, se lo feliz que estará cuando por fin vea a su nieto titulado. Te quiero mucho Aida.

Agradezco a mis suegros Marta y José y a mis cuñados que con todo su apoyo y cariño he podido tener momentos de serenidad para poder continuar con mi trabajo de título.

Le doy las gracias a mi querido amigo Andrés, porque en esas largas conversaciones me ha mostrado diferentes perspectivas de ver y entender la vida, gracias por eso y sobre todo por tu amistad.

Le doy las gracias a mi profesora guía Viviana Meruane por orientarme siempre con buena disposición y asertividad en mi trabajo

Agradezco a todos y a todas aquellas personas que no nombré y que me apoyaron directa o indirectamente, entregándome datos, consejos o simplemente su tiempo para conversar.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
2.3. ALCANCE.....	2
3. ANTECEDENTES	3
3.1. PLASTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (PRFV).....	3
3.2. RESINA	4
3.3. FIBRA DE VIDRIO.....	4
3.3.1. FIBRAS UNIDIRECCIONALES.....	5
3.3.2. FIBRAS BIDIRECCIONALES.....	7
3.3.3. FIBRAS MULTIDIRECCIONALES	8
3.4. PROCESOS DE FABRICACION	9
3.4.1. PROCESO MOLDEO MANUAL (HLU)	9
3.4.2. PROCESO MOLDEO AUTOMÁTICO (FW).....	11
3.4.3. LAMINADO TIPICO	13
3.5. MÉTODO ANALÍTICO	14
3.5.1. PROPIEDADES FÍSICAS	14
3.5.2. CONSTANTES ELÁSTICAS DE FIBRAS UNIDIRECCIONALES.....	15
3.5.3. CONSTANTES ELÁSTICAS DE FIBRAS BIDIRECCIONALES.....	23
3.5.4. CONSTANTES ELÁSTICAS DE FIBRAS MULTIDIRECCIONALES	23
3.5.5. ENSAMBLAJE DE LAMINADOS	23
4. METODOLOGIA.....	25
4.1. PLACAS DE PRFV.....	25
4.1.1. MÉTODO MANUAL (HLU).....	25
4.1.2. MÉTODO AUTOMÁTICO (FW).....	26
4.2. MÉTODO EXPERIMENTAL	26
4.2.1. FUNCIÓN DE RESPUESTAS EN FRECUENCIA (FRF)	27

4.2.2.	FRECUENCIAS NATURALES	30
4.2.3.	MODOS DE VIBRACION	32
4.3.	MÉTODO ANALÍTICO Y COMPUTACIONAL.....	33
4.3.1.	MEDICION DE PLACAS	33
4.3.2.	OBTENCION DE CONSTANTES ELASTICAS	34
4.3.3.	MATERIAL EN ANSYS	35
4.4.	OPTIMIZACION DE CONSTANTES ELASTICAS.....	36
5.	RESULTADOS	37
5.1.	PROPIEDADES FISICAS DE PLACAS DE PRFV	37
5.1.1.	PLACA VMM	38
5.1.2.	PLACA MMM	39
5.1.3.	PLACA TTT	40
5.1.4.	PLACA MTM	41
5.1.5.	PLACA MTMTM	42
5.1.6.	PLACA U0.....	43
5.1.7.	PLACA U45.....	44
5.1.8.	PLACA U55.....	45
5.1.9.	PLACA U65.....	46
5.1.10.	PLACA U75	47
5.1.11.	PLACA U80	48
5.2.	CONSTANTES ELASTICAS DE PLACAS DE PRFV	49
5.2.1.	PLACA VMM	49
5.2.2.	PLACA MMM	51
5.2.3.	PLACA TTT	52
5.2.4.	PLACA MTM	54
5.2.5.	PLACA MTMTM	56
5.2.6.	PLACA U0.....	58
5.2.7.	PLACA U45.....	59
5.2.8.	PLACA U55.....	60
5.2.9.	PLACA U65.....	62
5.2.10.	PLACA U75	63
5.2.11.	PLACA U80	64

5.3.	FRECUENCIAS NATURALES Y MODOS DE VIBRACIÓN	66
5.3.1.	PLACA VMM	66
5.3.2.	PLACA MMM	67
5.3.3.	PLACA TTT	67
5.3.4.	PLACA MTM	68
5.3.5.	PLACA MTMTM	68
5.3.6.	U0	69
5.3.7.	U45	69
5.3.8.	U55	70
5.3.9.	U65	70
5.3.10.	U75	71
5.3.11.	U80	71
5.4.	FRECUENCIAS NATURALES Y MODOS DE VIBRACION OPTIMIZADOS	72
5.4.1.	PLACA VMM	72
5.4.2.	PLACA MMM	73
5.4.3.	PLACA TTT	73
5.4.4.	PLACA MTM	74
5.4.5.	PLACA MTMTM	74
5.4.6.	PLACA U0.....	75
5.4.7.	PLACA U45.....	75
5.4.8.	PLACA U55.....	76
5.4.9.	PLACA U65.....	76
5.4.10.	PLACA U75	77
5.4.11.	PLACA U80	77
5.5.	CONSTANTES ELÁSTICAS	78
5.5.1.	PLACA VMM	78
5.5.2.	PLACA MMM	79
5.5.3.	PLACA TTT	79
5.5.4.	PLACA MTM	80
5.5.5.	PLACA MTMTM	80
5.5.6.	PLACA U0.....	81
5.5.7.	PLACA U45.....	81

5.5.8.	PLACA U55.....	82
5.5.9.	PLACA U65.....	82
5.5.10.	PLACA U75	83
5.5.11.	PLACA U80	83
6.	DISCUCIONES Y COMENTARIOS	84
6.1.	PLACA VMM.....	84
6.2.	PLACA MMM.....	84
6.3.	PLACA TTT	85
6.4.	PLACA MTM.....	85
6.5.	PLACA MTMTM.....	86
6.6.	PLACA U0	87
6.7.	PLACA U45	87
6.8.	PLACA U55	88
6.9.	PLACA U65	88
6.10.	PLACA U75	89
6.11.	PLACA U80	89
6.12.	GENERAL	90
7.	CONCLUSIONES.....	91
8.	BIBLIOGRAFIA	92

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 3.1: Propiedades y constantes elásticas de la resina palatal A430.....	3
Tabla N° 3.2: Tipos de Fibras de Vidrio a lo largo de la historia.....	3
Tabla N° 3.3: Propiedades y constantes elásticas de la fibra de vidrio tipo E.....	4
Tabla N° 3.4: Propiedades y constantes elásticas de la fibra de vidrio tipo C.....	4
Tabla N° 4.1: Propiedades físicas y constantes elásticas para definir un material.....	34
Tabla N° 5.1: Dimensiones y pesos de placas en estudio.....	37
Tabla N° 5.2: Propiedades físicas de placa VMM.....	38
Tabla N° 5.3: Propiedades físicas de placa VMM.....	38
Tabla N° 5.4: Propiedades físicas de placa MMM.....	39
Tabla N° 5.5: Propiedades físicas de placa MMM.....	39
Tabla N° 5.6: Propiedades físicas de placa TTT.....	40
Tabla N° 5.7: Propiedades físicas de placa TTT.....	40
Tabla N° 5.8: Propiedades físicas de placa MTM.....	41
Tabla N° 5.9: Propiedades físicas de placa MTM.....	41
Tabla N° 5.10: Propiedades físicas de placa MTMTM.....	42
Tabla N° 5.11: Propiedades físicas de placa MTMTM.....	42
Tabla N° 5.12: Propiedades físicas de placa U0.....	43
Tabla N° 5.13: Propiedades físicas de placa U0.....	43
Tabla N° 5.14: Propiedades físicas de placa U45.....	44
Tabla N° 5.15: Propiedades físicas de placa U45.....	44
Tabla N° 5.16: Propiedades físicas de placa U55.....	45
Tabla N° 5.17: Propiedades físicas de placa U55.....	45
Tabla N° 5.18: Propiedades físicas de placa U65.....	46
Tabla N° 5.19: Propiedades físicas de placa U65.....	46
Tabla N° 5.20: Propiedades físicas de placa U75.....	47
Tabla N° 5.21: Propiedades físicas de placa U75.....	47
Tabla N° 5.22: Propiedades físicas de placa U80.....	48
Tabla N° 5.23: Propiedades físicas de placa U80.....	48
Tabla N° 5.24: Módulos de elasticidad y módulos de corte de velo c.....	49
Tabla N° 5.25: Módulos de poisson de velo c.....	49
Tabla N° 5.26: Módulos de elasticidad y módulos de corte de MAT 450.....	50

Tabla N° 5.27: Módulos de poisson de MAT 450.....	50
Tabla N° 5.28: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa VMM.....	50
Tabla N° 5.29: Módulos de poisson de placa VMM.....	51
Tabla N° 5.30: Módulos de elasticidad y módulos de corte de MAT 450.....	51
Tabla N° 5.31: Módulos de poisson de MAT 450.....	51
Tabla N° 5.32: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa MMM.....	52
Tabla N° 5.33: Módulos de poisson de placa MMM.....	52
Tabla N° 5.34: Módulos de elasticidad y módulos de corte de TELA 800.....	53
Tabla N° 5.35: Módulos de poisson de TELA 800.....	53
Tabla N° 5.36: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa TTT.....	53
Tabla N° 5.37: Módulos de poisson de placa TTT.....	53
Tabla N° 5.38: Módulos de elasticidad y módulos de corte de MAT 450.....	54
Tabla N° 5.39: Módulos de poisson de MAT 450.....	54
Tabla N° 5.40: Módulos de elasticidad y módulos de corte de TELA 800.....	55
Tabla N° 5.41: Módulos de poisson de TELA 800.....	55
Tabla N° 5.42: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa MTM.....	55
Tabla N° 5.43: Módulos de poisson de placa MTM.....	55
Tabla N° 5.44: Módulos de elasticidad y módulos de corte de MAT 450.....	56
Tabla N° 5.45: Módulos de poisson de MAT 450.....	56
Tabla N° 5.46: Módulos de elasticidad y módulos de corte de TELA 800.....	57
Tabla N° 5.47: Módulos de poisson de TELA 800.....	57
Tabla N° 5.48: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa MTMTM.....	57
Tabla N° 5.49: Módulos de poisson de placa MTMTM.....	57
Tabla N° 5.50: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500.....	58
Tabla N° 5.51: Módulos de poisson de UNI 500.....	58
Tabla N° 5.52: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U0.....	59
Tabla N° 5.53: Módulos de poisson de placa U0.....	59
Tabla N° 5.54: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500.....	59
Tabla N° 5.55: Módulos de poisson de UNI 500.....	59
Tabla N° 5.56: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U45.....	60
Tabla N° 5.57: Módulos de poisson de placa U45.....	60
Tabla N° 5.58: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500.....	61
Tabla N° 5.59: Módulos de poisson de UNI 500.....	61
Tabla N° 5.60: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U55.....	61

Tabla N° 5.61: Módulos de poisson de placa U55.....	61
Tabla N° 5.62: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500.....	62
Tabla N° 5.63: Módulos de poisson de UNI 500.....	62
Tabla N° 5.64: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U65.....	63
Tabla N° 5.65: Módulos de poisson de placa U65.....	63
Tabla N° 5.66: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500.....	63
Tabla N° 5.67: Módulos de poisson de UNI 500.....	63
Tabla N° 5.68: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U75.....	64
Tabla N° 5.69: Módulos de poisson de placa U75.....	64
Tabla N° 5.70: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500.....	65
Tabla N° 5.71: Módulos de poisson de UNI 500.....	65
Tabla N° 5.72: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U80.....	65
Tabla N° 5.73: Módulos de poisson de placa U80.....	65
Tabla N° 5.74: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa VMM.....	66
Tabla N° 5.75: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa MMM.....	67
Tabla N° 5.76: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa TTT.....	67
Tabla N° 5.77: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa MTM.....	68
Tabla N° 5.78: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa MTMTM.....	68
Tabla N° 5.79: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa U0.....	69
Tabla N° 5.80: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa U45.....	69
Tabla N° 5.81: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa U55.....	70
Tabla N° 5.82: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa U65.....	70
Tabla N° 5.83: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa U75.....	71
Tabla N° 5.84: Correlación modos de vibración y frecuencias naturales de placa U80.....	71
Tabla N° 5.85: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa VMM.....	72
Tabla N° 5.86: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa MMM.....	73
Tabla N° 5.87: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa TTT.....	73
Tabla N° 5.88: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa MTM.....	74
Tabla N° 5.89: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa MTMTM.....	74
Tabla N° 5.90: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa U0.....	75
Tabla N° 5.91: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa U45.....	75
Tabla N° 5.92: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa U55.....	76
Tabla N° 5.93: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa U65.....	76
Tabla N° 5.94: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa U75.....	77

Tabla N° 5.95: Optimización modos de vibración y frecuencias naturales de placa U80.....	77
Tabla N° 5.96: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa VMM.....	78
Tabla N° 5.97: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa MMM.....	79
Tabla N° 5.98: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa TTT.....	79
Tabla N° 5.99: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa MTM.....	80
Tabla N° 5.100: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa MTMTM.....	80
Tabla N° 5.101: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U0.....	81
Tabla N° 5.102: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U45.....	81
Tabla N° 5.103: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U55.....	82
Tabla N° 5.104: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U65.....	82
Tabla N° 5.105: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U75.....	83
Tabla N° 5.106: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U80.....	83

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 3.1: Estanques de PRFV.....	3
Figura N° 3.2: Formato refuerzo Roving Tex 2200.....	6
Figura N° 3.3: Formato refuerzo UNI 500.....	7
Figura N° 3.4: Formato refuerzo de TELA 800.....	8
Figura N° 3.5: Formato refuerzo MAT 450.....	8
Figura N° 3.6: Formato refuerzo VELO C.....	9
Figura N° 3.7: Ejemplo de “Fittings” de PRFV con el método HLU.....	10
Figura N° 3.8: Ejemplo de “Fittings” de PRFV con el método HLU.....	10
Figura N° 3.9: Ejemplo de Tapa Bombeada con el método HLU.....	11
Figura N° 3.10: Matriz de Filament Winding.....	12
Figura N° 3.11: Máquina de Filament Winding.....	12
Figura N° 3.12: Ductos creados por el proceso Filament Winding.....	12
Figura N° 3.13: Laminado típico de PRFV.....	13
Figura N° 3.14: Ley de Mezclas, caso paralelo a las fibras.....	16
Figura N° 3.15: Ley de Mezclas, caso perpendicular a las fibras.....	17
Figura N° 3.16: Coordenadas en y fuera de ejes principales.....	20
Figura N° 4.1: Esquema general de experimento modal.....	27
Figura N° 4.2: Placa TTT reticulada con 15 nodos.....	27
Figura N° 4.3: Placa TTT en atril de estudio.....	28
Figura N° 4.4: Placa con elásticos y acelerómetro instalado en nodo 4.....	28
Figura N° 4.5: Martillo modal golpeando a placa experimental.....	29
Figura N° 4.6: Detección de un golpe aceptable del martillo modal.....	29
Figura N° 4.7: Detección de un golpe inaceptable del martillo modal.....	30
Figura N° 4.8: FRF entregadas por “Modal Data Acquisition”.....	30
Figura N° 4.9: Esquema de placa en “Femtools”.....	31
Figura N° 4.10: Función de respuesta en frecuencia en “Femtools”.....	31
Figura N° 4.11: Diagrama de estabilidad.....	32
Figura N° 4.12: Ejemplos de modos de vibración de una placa.....	33
Figura N° 4.13: Modo de vibración.....	35
Figura N° 4.14: Modo de vibración experimental y computacional.....	36

1. INTRODUCCION

Los materiales compuestos son materiales de ingeniería en donde la elección de sus materias primas permite combinar diferentes propiedades mecánicas, químicas, eléctricas, etc. El plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), posee una matriz de resina epoxi-viniléster que tiene excelentes propiedades contra la corrosión y un refuerzo de fibras de vidrio con altas propiedades mecánicas sin conducción eléctrica. Ambos materiales son de baja densidad, lo que hace del PRFV un material liviano con excelentes propiedades.

El PRFV se fabrica colocando capas de refuerzos de fibras de vidrio humectas en resina de manera sucesiva. El proceso puede ser manual o automático y cada refuerzo puede ser de fibras unidireccionales, bidireccionales o aleatorias. Cada laminado Resina/Refuerzo tendrá constantes elásticas distintas y la combinación de estas deja un complejo material. Este tipo de material se conoce como ortotrópico y tiene distintas propiedades mecánicas en cada sentido del material.

La motivación de esta experiencia es encontrar las constantes elásticas reales del PRFV con sus distintos tipos de refuerzos. Para ello, se estudian 11 placas con distintas secuencias de laminados. Estas, posicionadas libres de restricciones, son golpeadas con un martillo modal y luego un acelerómetro registra sus funciones de respuesta en frecuencia. Posteriormente, con el programa femtools se determinan las frecuencias naturales y modos de vibración de manera experimental.

Las constantes elásticas de cada placa son determinadas con un modelo analítico basado en las ecuaciones de ley de mezclas y las ecuaciones de Halpin-Tsai. Estas relacionan los porcentajes en volumen del vidrio y resina; orientación de las fibras, módulos de elasticidad, módulos de poisson y tipo de refuerzo utilizado.

Con estas constantes en el programa de elementos finitos Ansys y se realiza un análisis modal. Así se obtienen las frecuencias naturales y modos de vibración computacionales. Se correlacionan los modos de vibración computacionales con los experimentales. Se optimizan los modos de vibración del método computacional, para obtener las constantes elásticas del método experimental, que corresponden a las reales de cada placa.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de esta memoria es validar y ajustar las constantes elásticas encontradas por un modelo analítico de placas de PRFV, a través de un experimento modal.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Obtener las constantes elásticas de placas de PRFV, a través de un modelo analítico.
- Utilizar estas constantes elásticas para un análisis modal de elementos finitos y determinar las frecuencias naturales y modos de vibración.
- Obtener las funciones de respuesta de frecuencias (FRF), a través de un método experimento modal.
- A partir de las FRF obtener las frecuencias naturales y modos de vibración experimentales.
- Ajustar el modelo analítico a los datos experimentales para así determinar las constantes elásticas reales del material.

2.3. ALCANCE

- Obtener las constantes elásticas de las placas con fibras multidireccionales.
- Obtener las constantes elásticas de las placas con fibras bidireccionales.
- Obtener las constantes elásticas de placas que combinan fibras multidireccionales y bidireccionales.
- Obtener las constantes elásticas de las placas con fibras unidireccionales con distintos ángulos de tejido.

3. ANTECEDENTES

En este capítulo se entregan las bases para entender el material compuesto PRFV, tanto en sus materias primas que lo componen, como en su proceso de fabricación. Entendiendo de manera general este material se procede a mencionar la teoría analítica de los laminados compuestos. Esta teoría contempla la obtención de las constantes elásticas de cada lámina de PRFV y además las del conjunto de láminas con distintas geometrías y composiciones.

3.1. PLASTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (PRFV)

Los materiales compuestos corresponden a materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. El plástico reforzado con fibra de vidrio o PRFV es la unión de un material plástico como matriz y un material cerámico como refuerzo. La matriz corresponde en este caso a resina epoxi-viniléster termoestable y el refuerzo a fibras de vidrio en distintos formatos.

El PRFV es un material muy solicitado en la industria minera, Química, Celulosa y Energía; debido fundamentalmente a que combina propiedades anticorrosivas de la resina, con la alta resistencia mecánica de las fibras de vidrio. En la figura N° 3.1 se muestra un ejemplo de un equipo fabricado de PRFV.



Figura N° 3.1: Estanques de PRFV [1]

3.2. RESINA

Una resina estándar de uso común en la industria es la resina palatal A430, que corresponde a una resina epoxi-viniléster en base a Bisfenol A, disuelto en estireno. Esta resina posee excelente resistencia química contra la corrosión, resistencia térmica permanente y alta resistencia a grandes cargas mecánicas dinámicas. En la tabla N° 3.1 se muestran las propiedades y constantes elásticas dadas por el fabricante BASF.

Tabla N° 3.1: Propiedades y constantes elásticas de la resina palatal A430 [2]

Densidad	ρ_r	1.200	[kg/m ³]
Módulo de Elasticidad en tracción	E_r	3.600	[Mpa]
Módulo de Poisson	ν_r	0,35	[-]
Módulo de Corte	G_r	1.333	[Mpa]

3.3. FIBRA DE VIDRIO

La fibra de vidrio es un material que consta de numerosos filamentos poliméricos extremadamente finos de dióxido de silicio (SiO₂). Posee alta resistencia a la tensión, es incombustible, biológicamente inerte, tiene una excelente estabilidad dimensional y baja conductividad térmica.

La empresa Owens Corning ha desarrollado fibras de vidrio desde 1938. Hoy en día existen diversos tipos de fibras para distintos requerimientos. En la tabla 3.2 se puede ver los distintos tipos de fibras de vidrio que se han inventado a lo largo de la historia.

Tabla N°3.2: Tipos de Fibras de Vidrio a lo largo de la historia [3]

Tipo de Vidrio	Año Inventado	Atributo Clave	Resistencia	Precio	Inventor
A-Glass	1938	Aislación	Baja	\$	Owens Corning
E-Glass	1939	Grado Eléctrico	Moderada	\$	Owens Corning
C-Glass	1643	Resistencia a la Corrosión	Baja	\$	Owens Corning
R-Glass	1965	Alta Resistencia	Alta	\$\$	Saint-Gobain
S-Glass	1965	Alta Resistencia	Muy Alta	\$\$\$	Owens Corning
AR-Glass	1974	Resistencia Alcalina	Baja	\$\$	Owens Corning
E-CR Glass	1980	Resistencia a la Corrosión	Moderada	\$	Owens Corning
Advantex Glass	1996	Resistencia a la Corrosión	Moderada	\$	Owens Corning
H-Glass	2004	Alta Rigidez	Moderada	\$\$	Saint-Gobain
HPG	2004	Alta rigidez	Alta	\$\$	Owens Corning
Direct Mel-S	2008	Alta Resistencia/Rigidez	Muy Alta	\$\$\$	Owens Corning

En la tabla N° 3.2 se observa que las fibras de vidrio tipo E y tipo C son de las más antiguas. Las fibras tipo E son las más comunes en la industria debido a su bajo costo, alta resistencia a la tensión y que tienen grado eléctrico, al no ser conductoras de electricidad. Las fibras tipo C en cambio tienen baja resistencia mecánica, pero muy buena resistencia contra la corrosión.

En la tabla N° 3.3 se muestran las propiedades y constantes elásticas de las fibras de vidrio tipo E. En la tabla N° 3.4 se muestran las propiedades y constantes elásticas de las fibras de vidrio tipo C.

Tabla N° 3.3: Propiedades y constantes elásticas de la fibra de vidrio tipo E [4]

Densidad	ρ_f	2.580	[kg/m ³]
Módulo de Elasticidad en tracción	E_f	72.400	[Mpa]
Módulo de Poisson	ν_f	0,20	[-]
Módulo de Corte	G_f	30.167	[Mpa]

Tabla N° 3.4: Propiedades y constantes elásticas de la fibra de vidrio tipo C [4]

Densidad	ρ_f	2.520	[kg/m ³]
Módulo de Elasticidad en tracción	E_f	68.900	[Mpa]
Módulo de Poisson	ν_f	0,28	[-]
Módulo de Corte	G_f	26.998	[Mpa]

Las fibras de vidrio se pueden encontrar en diferentes formatos. Las hebras pueden ser ordenadas de manera unidireccional, bidireccional y multidireccional. A continuación se hará una breve descripción de los distintos formatos.

3.3.1. FIBRAS UNIDIRECCIONALES

Las fibras unidireccionales se pueden encontrar en formato rollo o en formato manta. El formato rollo corresponde a una hebra de varios metros enrollada como un bollo de lana. El formato manta corresponde a hebras ordenadas en forma paralela, unidas entre sí por un hilo solo para mantener el orden correspondiente.

Este tipo de refuerzo logra laminados con mayor porcentaje de fibras de vidrio con respecto a resina, lo que se transforma en mejores propiedades mecánicas y menos propiedades químicas.

3.3.1.1. *ROVING TEX 2200*

Un formato de rollo estándar es el “roving tex 2200” que corresponde una hebra de 2.200 gramos por kilómetro de longitud. Esta hebra es de fibra de vidrio tipo E y su uso principal es en el proceso automático de laminación. El espesor teórico que se obtiene con este refuerzo es entre 0,6 a 0,7 [mm], lo que se traduce en laminados con un porcentaje entre 65 a 75% de fibra de vidrio en peso.

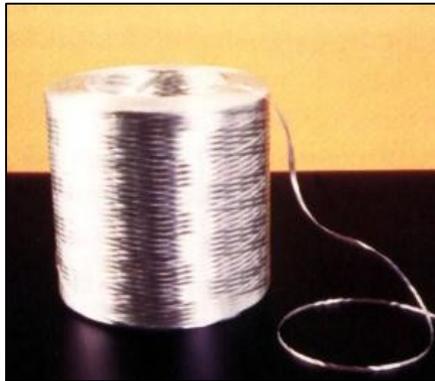


Figura N° 3.2: Formato refuerzo Roving Tex 2200 [3]

3.3.1.2. *UNI 500*

Un formato de manta estándar es el “UNI 500” que corresponde a hebras paralelas que tienen 500 gramos por metro cuadrado de superficie. Son hebras de fibra de vidrio tipo E y su uso principal es en el método automático. El espesor teórico que se obtiene con este refuerzo es entre 0,45 a 0,55 [mm], lo que se traduce en laminados con un porcentaje entre 55 a 65% de fibra de vidrio en peso.

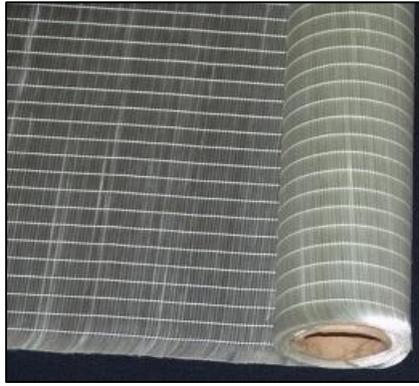


Figura N° 3.3: Formato refuerzo UNI 500 [3]

3.3.2. FIBRAS BIDIRECCIONALES

Las fibras bidireccionales se encuentran en formato de manta. Corresponde a un tejido en trama y urdimbre en 90°. Este tipo de refuerzo logra laminados con buen porcentaje de fibras de vidrio con respecto a resina, lo que se transforma en buenas propiedades mecánicas.

3.3.2.1. TELA 800

Un formato de manta estándar es la “TELA 800” que corresponde a hebras en trama y urdimbre en 90° que tiene 800 gramos por metro cuadrado de superficie. Son hebras de fibra de vidrio tipo E y su uso principal es en el método manual. El espesor teórico que se obtiene con este refuerzo es entre 0,8 a 0,9 [mm], lo que se traduce en laminados con un porcentaje entre 45 a 55% de fibra de vidrio en peso.

En particular la TELA 800 es un tejido cuasi-isotrópico. Posee 4 “roving tex 2200” por pulgada de trama y 5 “roving tex 2200” por pulgada de urdimbre. Lo anterior quiere decir que no posee las mismas propiedades mecánicas en trama y urdimbre.

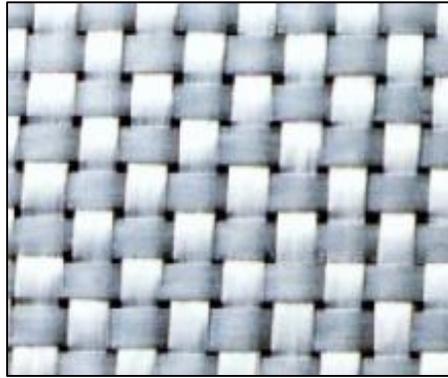


Figura N° 3.4: Formato refuerzo de TELA 800 [3]

3.3.3. FIBRAS MULTIDIRECCIONALES

Las fibras multidireccionales se encuentran en formato de manta. Corresponden a fibras cortas ordenadas aleatoriamente. Este tipo de refuerzo se utiliza para absorber mayor cantidad de resina y así aumentar las propiedades anti corrosivas del laminado. Sus propiedades mecánicas no son tan buenas como el tejido bidireccional.

3.3.3.1. MAT 450

Un formato de manta estándar es el “MAT 450” que corresponde a hebras cortas de 5 [cm] ordenadas de manera aleatoria que tienen 450 gramos por metro cuadrado. Son hebras de fibra de vidrio tipo E y su uso principal es en el método manual. El espesor teórico que se obtiene con este refuerzo es entre 0,80 a 1,00 [mm], lo que se traduce en laminados con un porcentaje entre 30 a 40% de fibra de vidrio en peso.



Figura N° 3.5: Formato refuerzo MAT 450 [3]

3.3.3.2. VELO C

Un formato de velo estándar es el “VELO C” que corresponde a hebras cortas de aproximadamente 1 [cm] ordenadas de manera aleatoria que tienen 30 gramos por metro cuadrado. Son hebras de fibra de vidrio tipo C y su uso principal es en el método manual. El espesor teórico que se obtiene con este refuerzo es entre 0,20 a 0,30 [mm], lo que se traduce en laminados con un porcentaje entre 5 a 15% de fibra de vidrio en peso. Este refuerzo debido a que tiene la mayor absorción de resina, se utiliza como barrera química directa al ambiente corrosivo.



Figura N° 3.6: Formato refuerzo VELO C [3]

3.4. PROCESOS DE FABRICACION

El proceso de fabricación de PRFV es a través de laminación. Se van colocando refuerzos de fibra de vidrio humectados con resina en forma secuencial sobre un molde o matriz. El proceso puede ser automático o manual dependiendo de la geometría.

3.4.1. PROCESO MOLDEO MANUAL (HLU)

El proceso HLU (Hand Lay Up), es un proceso manual o artesanal y él más antiguo de laminación. Se puede laminar cualquier tipo de geometría y utiliza refuerzos de fibra de vidrio como el MAT 450, TELA 800 y VELO. Para eliminar la resina y burbujas remanentes se utilizan rodillos a presión. El porcentaje de resina usado en este proceso es mayor que en el proceso automático. Esto implica que se necesitarán espesores mayores que en el proceso automático para obtener la misma resistencia.

Algunos laminados típicos con el proceso HLU son los siguientes:

- VMM: Barrera química típica, compuesta de un VELO C y dos MAT 450.
- MTM: Secuencia típica, compuesta por dos MAT 450 y un TELA 800.
- MTMTM: Secuencia típica, compuesta por tres MAT 450 y dos TELA 800.
- MTMTMTM: Secuencia típica, compuesta por cuatro MAT 450 y tres TELA 800.

Se muestra en las figuras N° 3.7, 3.8 y 3.9 algunos ejemplos de laminados HLU.



Figura N° 3.7: Ejemplo de “Fittings” de PRFV con el método HLU [1]



Figura N° 3.8: Ejemplo de “Fittings” de PRFV con el método HLU [1]



Figura N° 3.9: Ejemplo de Tapa Bombeada con el método HLU [1]

3.4.2. PROCESO MOLDEO AUTOMÁTICO (FW)

El proceso FW (Filament Winding) consiste en un proceso automático en donde 40 hebras de Roving 2200 ordenadas en 4 pulgadas se van enrollando en una matriz cilíndrica. El porcentaje en peso de refuerzo de fibra de vidrio son bastante mayores que en el proceso HLU. Esto implica mejores propiedades mecánicas en menor espesor. Este proceso admite varios ángulos de enrollado (55° , 65° , 75° , 80° y 90°); para producir un tejido uniforme se debe enrollar alternadamente $+\theta$ y $-\theta$, lo que se denomina “cover”.

Algunos laminados típicos con el proceso FW son los siguientes:

- 4FW 65° : Cuatro “covers” en ángulo 65° .
- 6FW $80^\circ/1U0^\circ$: Seis “covers” en ángulo 80° y un UNI 500 a 0° .
- 11FW $55^\circ/2U0^\circ$: Once “covers” en ángulo 55° y dos UNI 500 a 0° .
- 23FW $75^\circ/4U0^\circ$: Veinte y tres “covers” en ángulo 75° y cuatro UNI 500 a 0° .

El las figuras N° 3.10, 3.11 y 3.12 se muestran ejemplos del proceso FW.



Figura N° 3.10: Matriz de Filament Winding [1]



Figura N° 3.11: Máquina de Filament Winding [1]



Figura N° 3.12: Ductos creados por el proceso Filament Winding [1]

3.4.3. LAMINADO TIPICO

El laminado típico de PRFV posee una capa exterior, otra capa estructural y otra capa interior. Esto es válido tanto para un proceso manual, como para un proceso automático. La capa exterior protege el laminado de los rayos UV y/o de un ambiente corrosivo; la capa estructural posee altas propiedades mecánicas para lograr la integridad estructural del laminado; y finalmente la capa interior posee las propiedades químicas y actúa como barrera química contra un gas o líquido corrosivo.

En la figura N° 3.13 se puede observar de manera más clara este laminado típico de PRFV.

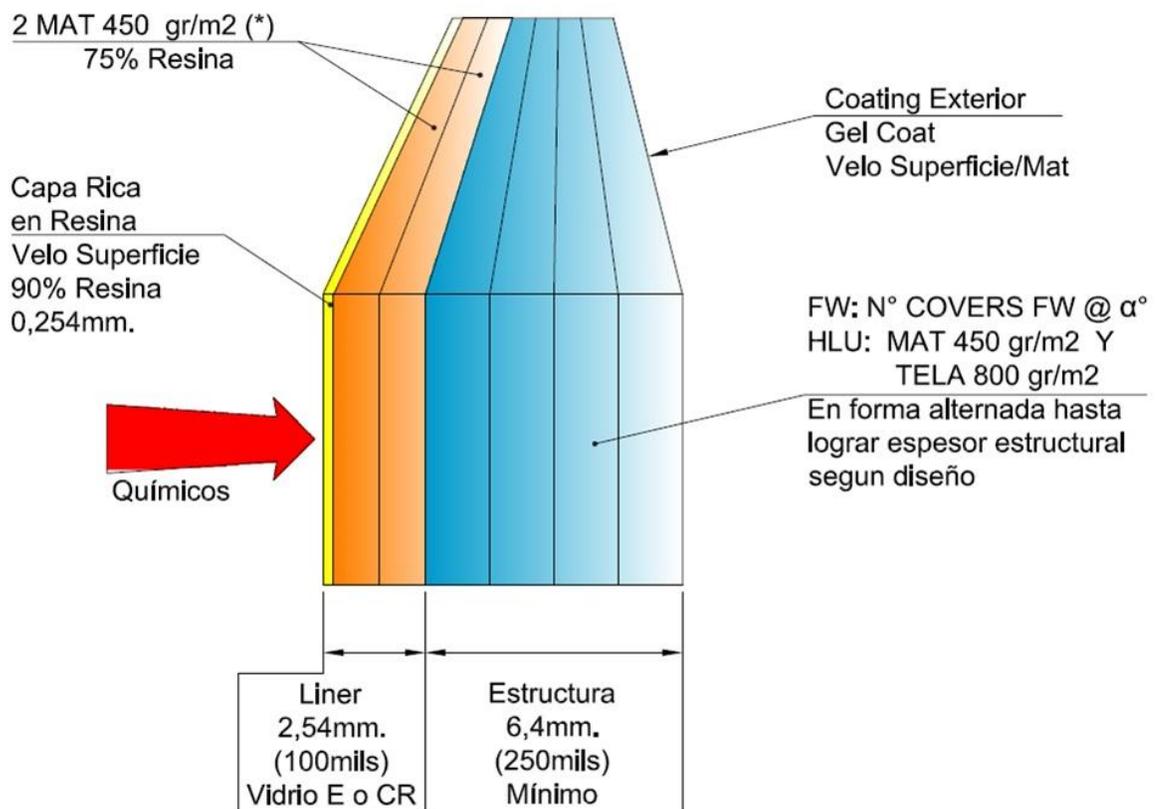


Figura N° 3.13: Laminado típico de PRFV

3.5. MÉTODO ANALÍTICO

El PRFV es un material complejo. Sus constantes elásticas dependen del tipo de refuerzo de fibra de vidrio; el porcentaje de resina en peso utilizado; el ángulo de este refuerzo; la secuencia de laminación; etc. Este material compuesto tiene 3 módulos de elasticidad (E_1, E_2, E_3), 3 módulos de corte (G_{12}, G_{23}, G_{13}) y 6 módulos de poisson ($\nu_{12}, \nu_{21}, \nu_{13}, \nu_{31}, \nu_{23}, \nu_{32}$), por lo tanto, es un material anisotrópico.

Existen muchos autores que predicen las constantes elásticas de manera analítica. Se mostrarán los métodos analíticos más aceptados y que constituyen la base para el cálculo analítico de esta memoria.

3.5.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas de cada laminado dependen del espesor de laminado, gramaje superficial del refuerzo y las densidades de sus materias primas.

3.5.1.1. PORCENTAJE DE VOLUMEN [5]

$$V_f = \frac{M_f}{V \cdot \rho_f} \quad 3-1$$

$$V = t \cdot 1 [m^2] \quad 3-2$$

$$V_f + V_r = 1 \quad 3-3$$

V_f = Porcentaje en volumen de la fibra de vidrio, [%]

V_r = Porcentaje en volumen de la resina, [%]

M_f = Gramaje fibra de vidrio, [kg/m²]

V = Volumen de 1 metro cuadrado de lámina, [m³]

t = Espesor teórico de lámina, [mm]

3.5.1.2. DENSIDAD DE LAMINADO [5]

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_r V_r \quad 3-4$$

ρ = Densidad del laminado, [kg/m³]

ρ_f = Densidad de la fibra de vidrio, [kg/m³]

ρ_r = Densidad de la resina, [kg/m³]

3.5.1.3. PORCENTAJE EN PESO [5]

$$W_f = \frac{\rho_f V_f}{\rho_f V_f + \rho_r - \rho_r V_f} \quad 3-5$$

$$W_f + W_r = 1 \quad 3-6$$

W_f = Porcentaje en peso de la fibra de vidrio, [%]

W_r = Porcentaje en peso de la resina, [%]

3.5.2. CONSTANTES ELÁSTICAS DE FIBRAS UNIDIRECCIONALES

Los modelos para predecir las constantes elásticas de las fibras unidireccionales han sido estudiados por muchos autores. Algunos modelos son muy complejos y están basados en experimentación empírica con láminas de PRFV, pero en cambio los más famosos y comúnmente utilizados son los más sencillos. Dentro de estos últimos se encuentra el modelo de “Ley de Mezcla” y el modelo propuesto por Halpin y Tsai. Estos dos modelos serán presentados a continuación.

3.5.2.1. LEY DE MEZCLAS

Este modelo predice las constantes elásticas en la dirección de las fibras y en dirección transversal a las fibras. Utiliza la analogía de los resortes en paralelo y en serie para los distintos casos.

Como se ve en la figura N° 3.14, se aplicará una fuerza en dirección paralela a las fibras y se toma la analogía de resortes en paralelo.

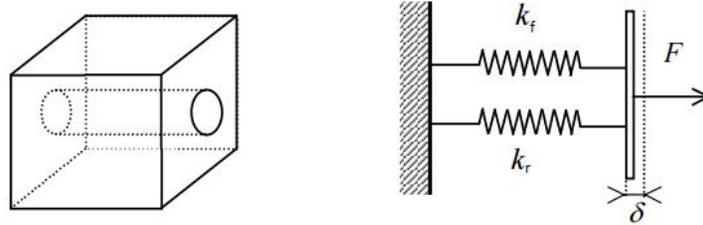


Figura N° 3.14: Ley de Mezclas, caso paralelo a las fibras [6]

De la figura N°3.14 se pueden entender las siguientes ecuaciones.

$$E_1 = E_f V_f + E_r V_r \quad 3-7$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_r V_r \quad 3-8$$

E_1 = Módulo de elasticidad longitudinal, [Mpa]

E_f = Módulo de elasticidad de la fibra de vidrio, [Mpa]

E_r = Módulo de elasticidad de la resina, [Mpa]

ν_{12} = Módulo de Poisson longitudinal-transversal o mayor, [-]

ν_f = Módulo de Poisson de la fibra de vidrio, [-]

ν_r = Módulo de Poisson de la resina, [-]

Como se ve en la figura N° 3.15, se aplicará una fuerza en dirección perpendicular a las fibras y se toma la analogía de resortes en serie.

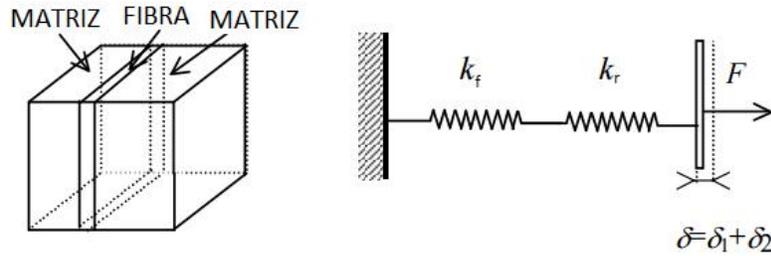


Figura N° 3.15: Ley de Mezclas, caso perpendicular a las fibras [6]

De la figura N°3.15 se pueden entender las siguientes ecuaciones.

$$E_2 = \frac{E_f E_r}{E_r V_f + E_f V_r} \quad 3-9$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_r}{G_r V_f + G_f V_r} \quad 3-10$$

$$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1} \quad 3-11$$

G_{12} = Módulo de corte longitudinal-transversal, [Mpa]

G_f = Módulo de corte de la fibra de vidrio, [Mpa]

G_r = Módulo de corte de la resina, [Mpa]

ν_{21} = Módulo de Poisson transversal-longitudinal o menor, [-]

3.5.2.2. ECUACIONES DE HALPIN-TSAI

Halpin y Tsai concuerdan con las ecuaciones en dirección de las fibras, pero no así con las ecuaciones en dirección transversal a las fibras. Ellos plantean que estas últimas dependen de la unión fibra/resina.

Se presentan a continuación las ecuaciones de Halpin-Tsai. [6]

$$E_2 = E_r \frac{1 + \xi_1 \eta_1 V_f}{1 - \eta_1 V_f} \quad 3-11$$

$$G_{12} = G_r \frac{1 + \xi_2 \eta_2 V_f}{1 - \eta_1 V_f} \quad 3-12$$

$$\eta_1 = \frac{\frac{E_f}{E_r} - 1}{\frac{E_f}{E_r} + \xi_1} \quad 3-13$$

$$\eta_2 = \frac{\frac{G_f}{G_r} - 1}{\frac{G_f}{G_r} + \xi_2} \quad 3-14$$

ξ_1 = Factor de eficiencia interfaz resina-fibra, [1,2]

ξ_2 = Factor de eficiencia interfaz resina-fibra, [0,1]

3.5.2.3. OTROS ECUACIONES

Con las ecuaciones anteriores se puede definir las constantes elásticas para una placa en 2 dimensiones. Se tienen 2 módulos de elasticidad (E_1 , E_2), 2 módulos de Poisson (ν_{12} , ν_{21}) y 1 módulo de corte (G_{12}). Para poder definir completamente esta placa se necesitan más constantes elásticas como se mencionó con anterioridad.

El módulo de elasticidad normal (E_3) es fácil de definir, ya que en la componente normal, las fibras también están en dirección transversal. Por lo que se usa la misma ecuación que el módulo de elasticidad transversal.

$$E_3 = E_r \frac{1 + \xi_1 \eta_1 V_f}{1 - \eta_1 V_f} \quad 3-15$$

De la misma manera se puede definir el módulo de Poisson longitudinal-normal (ν_{13}) igual al módulo de Poisson longitudinal-transversal (ν_{12}); el módulo de Poisson normal-longitudinal (ν_{31}) es igual al módulo de Poisson transversal-longitudinal (ν_{21}); y el módulo de corte longitudinal-normal (G_{13}) es igual al módulo de corte longitudinal-transversal (G_{12}).

$$v_{13} = v_f V_f + v_r V_r \quad 3-16$$

$$v_{31} = v_{13} \frac{E_3}{E_1} \quad 3-17$$

$$G_{13} = G_r \frac{1 + \xi_2 \eta_2 V_f}{1 - \eta_1 V_f} \quad 3-18$$

El módulo de Poisson transversal-normal (v_{23}) y el módulo de Poisson normal-transversal (v_{32}) se definen según la ecuación de módulo de elasticidad transversal de la “ley de mezclas”.

$$v_{23} = \frac{v_f v_r}{v_r V_f + v_f V_r} \quad 3-19$$

$$v_{32} = v_{23} \frac{E_3}{E_2} \quad 3-20$$

Finalmente dado que el módulo de elasticidad transversal (E_2) es igual al módulo de elasticidad normal (E_3), se puede entender como un material isotrópico en el plano Y-Z o plano transversal-normal. De esta manera se utiliza la ecuación del módulo de corte de un material isotrópico para definir el módulo de corte transversal-normal (G_{23}).

$$G_{23} = \frac{E_3}{2(1 + v_{23})} \quad 3-21$$

3.5.2.4. ROTACION DE LAS FIBRAS

Las ecuaciones anteriores corresponden a las fibras alineadas en 0° , pero si las fibras se disponen en otro ángulo sus constantes elásticas cambian con respecto a los ejes principales X-Y. En la figura N° 3.16 se muestra los ejes de coordenadas en ejes principales y fuera de estos mismos.

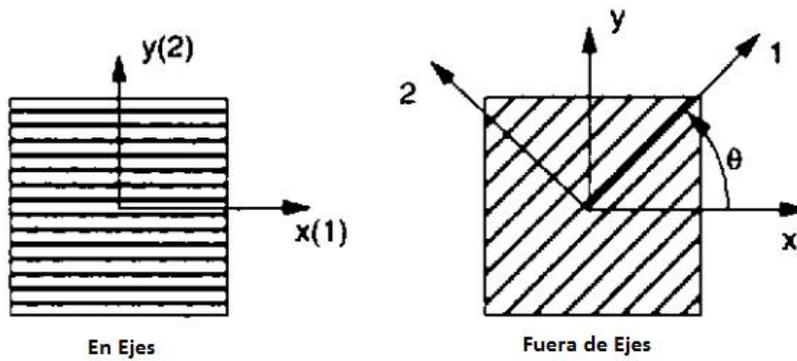


Figura N° 3.16: Coordenadas en y fuera de ejes principales [7]

Cuando se cambia el ángulo, cambia la relación entre deformación unitaria y esfuerzos con respecto a los ejes principales X-Y. La ecuación constitutiva para el caso de elasticidad general relaciona las deformaciones unitarias con los esfuerzos a través de la matriz de rigidez. En la ecuación 3-22 se muestra esta relación para un material ortotrópico.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad 3-22$$

La matriz de rigidez se construye con las constantes elásticas del material y estas relaciones se muestran a continuación. [7]

$$Q_{11} = \frac{E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})}{\Delta} \quad 3-23$$

$$Q_{22} = \frac{E_2(1 - \nu_{31}\nu_{13})}{\Delta} \quad 3-24$$

$$Q_{33} = \frac{E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})}{\Delta} \quad 3-25$$

$$Q_{12} = \frac{E_1(\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23})}{\Delta} = \frac{E_2(\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13})}{\Delta} \quad 3-26$$

$$Q_{13} = \frac{E_1(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32})}{\Delta} = \frac{E_3(\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23})}{\Delta} \quad 3-27$$

$$Q_{23} = \frac{E_2(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31})}{\Delta} = \frac{E_3(\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13})}{\Delta} \quad 3-28$$

$$Q_{44} = G_{23} \quad 3-29$$

$$Q_{55} = G_{13} \quad 3-30$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad 3-31$$

$$\Delta = 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{13}\nu_{21}\nu_{32} \quad 3-32$$

Ahora bien, cuando se cambia el ángulo de las fibras, se modifica las constantes de la matriz de rigidez en función del ángulo de inclinación (θ). La nueva ecuación constitutiva se muestra a continuación.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{13} & \bar{Q}_{23} & \bar{Q}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad 3-33$$

Las nuevas constantes de la matriz de rigidez con rotación en ángulo θ se muestran a continuación en función de las constantes en inclinación 0° . [7]

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}\cos^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\cos^2\theta \cdot \text{seno}^2\theta + Q_{22}\text{seno}^4\theta \quad 3-34$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}\text{seno}^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\cos^2\theta \cdot \text{seno}^2\theta + Q_{22}\cos^4\theta \quad 3-35$$

$$\bar{Q}_{33} = Q_{33} \quad 3-36$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})\cos^2\theta \cdot \text{seno}^2\theta + Q_{12}(\cos^4\theta + \text{seno}^4\theta) \quad 3-37$$

$$\bar{Q}_{13} = Q_{13}\cos^2\theta + Q_{23}\text{seno}^2\theta \quad 3-38$$

$$\bar{Q}_{23} = Q_{13}\text{seno}^2\theta + Q_{23}\cos^2\theta \quad 3-39$$

$$\bar{Q}_{44} = Q_{44}\cos^2\theta + Q_{55}\text{seno}^2\theta \quad 3-40$$

$$\bar{Q}_{55} = Q_{55} \cos^2 \theta + Q_{44} \operatorname{seno}^2 \theta \quad 3-41$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12}) \cos^2 \theta \cdot \operatorname{seno}^2 \theta + Q_{66} (\cos^2 \theta - \operatorname{seno}^2 \theta)^2 \quad 3-42$$

Al invertir la matriz de rigidez se obtiene la matriz de flexibilidad [S]. Esta al ser multiplicada por el vector de esfuerzos, se obtiene el vector de deformaciones unitarias. Se muestra a continuación la ecuación constitutiva inversa a la ecuación 3-33.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad 3-43$$

Al obtener la matriz de flexibilidad [S], de la matriz de rigidez [C] rotada, se pueden obtener las constantes elásticas según las coordenadas X-Y. Las constantes de la matriz de flexibilidad en términos de constantes elásticas se muestran a continuación. [7]

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad 3-44$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad 3-45$$

$$S_{33} = \frac{1}{E_3} \quad 3-46$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \quad 3-47$$

$$S_{13} = -\frac{\nu_{31}}{E_3} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} \quad 3-48$$

$$S_{23} = -\frac{\nu_{32}}{E_3} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} \quad 3-49$$

$$S_{44} = \frac{1}{G_{23}} \quad 3-50$$

$$S_{55} = \frac{1}{G_{13}} \quad 3-51$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad 3-52$$

3.5.3. CONSTANTES ELÁSTICAS DE FIBRAS BIDIRECCIONALES

Las constantes elásticas de las fibras bidireccionales o tejidas se modelan como 3 laminados de fibras unidireccionales. La primera lamina en 0° , la segunda en 90° , y la tercera en 0° . El espesor total de este laminado se divide en 3 partes. La primera lamina con un espesor de $\frac{1}{4}$ del total, la segunda con un espesor de $\frac{1}{2}$ del total, y la tercera con un espesor de $\frac{1}{4}$ de total. [8]

3.5.4. CONSTANTES ELÁSTICAS DE FIBRAS MULTIDIRECCIONALES

Las fibras multidireccionales son las más difíciles de modelar. Muchos autores han creado distintas ecuaciones para predecir las constantes elásticas. Entre los autores más citados se pueden mencionar a Christensen, Manera, Pan, Halpin-Tsai y Cox.

Alternativamente se usa los resultados entregados por el programa computacional TRILAM. Este predice las constantes elásticas de los laminados con fibras multidireccional o de orden aleatorio.

3.5.5. ENSAMBLAJE DE LAMINADOS

Una vez identificadas las constantes elásticas de las láminas unidireccionales, bidireccionales y multidireccionales se procede al ensamblaje para poder tener las constantes elásticas del laminado completo.

Para cada lámina se construye la matriz de rigidez [C]. Luego cada constante de la matriz de rigidez [C] se multiplica por el espesor de la lámina. Luego se suman las constantes de todas las láminas y se dividen por el espesor total [7]. La ecuación 3-53 explica la matriz de rigidez de ensamblaje.

$$[C] = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{11}]_i & \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{12}]_i & \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{13}]_i & 0 & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{12}]_i & \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{22}]_i & \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{23}]_i & 0 & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{13}]_i & \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{23}]_i & \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{33}]_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{44}]_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{55}]_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n t_i \cdot [Q_{66}]_i \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

3-53

t_i = Espesor de la lámina i .

i = Índice de lámina

Al obtener la matriz de rigidez de ensamblaje [C] se procede a obtener su matriz inversa [S]. De la matriz de flexibilidad [S] se obtienen las constantes elásticas de la placa completa.

4. METODOLOGIA

En este capítulo se menciona la metodología para la realización del experimento modal, el cual consiste primero en encontrar las funciones de respuesta en frecuencia de cada placa, para luego obtener de ella las frecuencias naturales y modos de vibración.

En forma paralela, utilizando un modelo analítica se obtendrán las constantes elásticas de cada placa, para luego realizar un análisis de elementos finitos modal y obtener las frecuencias naturales y modos de vibración.

Se comparan las frecuencias naturales de método experimental con el método analítico para poder establecer una correcta correlación entre los resultados. Si la correlación no está dentro de un margen de un 20% de error. Se debe optimizar las variables del método analítico para validar finalmente las constantes elásticas.

4.1. PLACAS DE PRFV

Como se mencionó en el capítulo de antecedentes. Existen 2 procesos de fabricación del laminado compuesto PRFV. Esta el método manual o “Hand Lay Up” y el método automático o “Filament Winding”.

4.1.1. MÉTODO MANUAL (HLU)

Este proceso utiliza refuerzos de fibras de vidrio aleatorias y bidireccionales. Se fabrican 5 placas combinando VELO C, MAT 450 y TELA 800 de manera de poder estudiar las secuencias más comunes. A continuación se mencionan las 5 placas en estudio.

- | | |
|---|---------|
| 1) VELO C / MAT450 / MAT450 | (VMM) |
| 2) MAT450 / MAT450 / MAT450 | (MMM) |
| 3) TELA800 / TELA800 / TELA800 | (TTT) |
| 4) MAT450 / TELA800 / MAT450 | (MTM) |
| 5) MAT450 / TELA800 / MAT450 / TELA800 / MAT450 | (MTMTM) |

4.1.2. MÉTODO AUTOMÁTICO (FW)

El método automático se utiliza en geometrías cilíndricas. Debido a lo anterior primero se debe hacer un laminado automático y luego extraer las placas para el estudio.

No fue posible romper un cilindro ya realizado, así que se utilizó el refuerzo UNI 500 para simular tejidos unidireccionales y a diferentes ángulos. Al igual que en el proceso “filament winding”, el tejido debe ser homogéneo y por cada ángulo que se teje, se debe tejer el siguiente laminado en el ángulo contrario. A continuación se mencionan las 6 placas en estudio.

- | | |
|---|-------------------------|
| 6) UNI 500 0° / UNI 500 0° / UNI 500 0° / UNI 500 0° | (U0°/U0°/U0°/U0°) |
| 7) UNI 500 45° / UNI 500 -45° / UNI 500 45° / UNI 500 -45° | (U45°/U-45°/U45°/U-45°) |
| 8) UNI 500 55° / UNI 500 -55° / UNI 500 55° / UNI 500 -55° | (U55°/U-55°/U55°/U-55°) |
| 9) UNI 500 65° / UNI 500 -65° / UNI 500 65° / UNI 500 -65° | (U65°/U-65°/U65°/U-65°) |
| 10) UNI 500 75° / UNI 500 -75° / UNI 500 75° / UNI 500 -75° | (U75°/U-75°/U75°/U-75°) |
| 11) UNI 500 80° / UNI 500 -80° / UNI 500 80° / UNI 500 -80° | (U80°/U-80°/U80°/U-80°) |

4.2. MÉTODO EXPERIMENTAL

Se realiza un experimento modal con las placas de PRFV mencionadas anteriormente. Lo primero es obtener la función de respuesta en frecuencia (FRF) de cada placa. Luego con las FRF se obtendrán las frecuencias naturales y modos de vibración.

El esquema general del experimento modal contempla un programa computacional que detecta el impacto del martillo modal e inicia la toma de datos con el acelerómetro. En la figura N° 4.1 se muestra el esquema general.

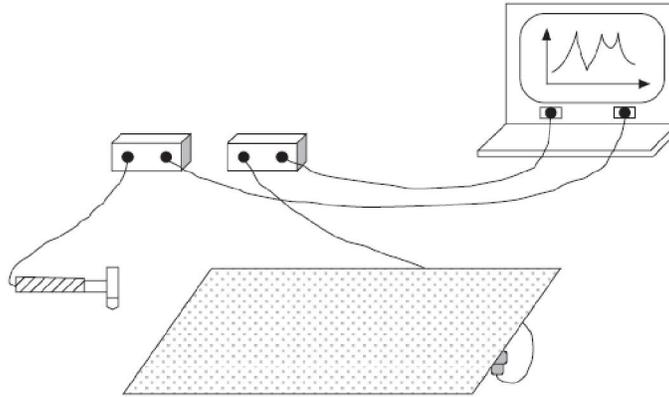


Figura N° 4.1: Esquema general de experimento modal [9]

4.2.1. FUNCIÓN DE RESPUESTAS EN FRECUENCIA (FRF)

Las placas en estudio tienen dimensiones de 300x200 [mm] y de 200x200 [mm]. Se realiza un mallado cuadrado en cada placa. Cada cuadrado será de 5x5 [cm] aproximadamente. Esto crea un mallado con 15 y 12 nodos. Se muestra de ejemplo una placa TTT reticulada en la figura N° 4.2.

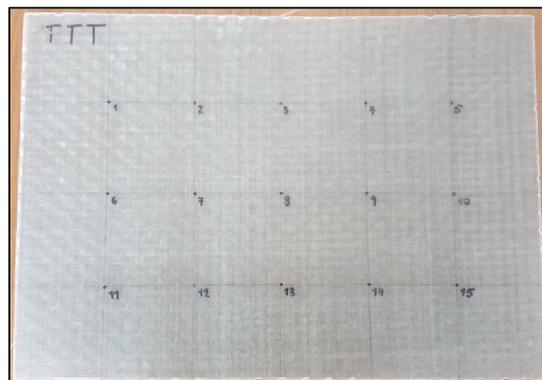


Figura N° 4.2: Placa TTT reticulada con 15 nodos

Las placas deben ser posicionadas de manera de no tener restricciones de movimiento. Para lograr esto se cuelga la placa en forma vertical con 2 elásticos con muy baja rigidez. En la figura N°4.3 se muestra la placa TTT montada en el atril de estudio.



Figura N° 4.3: Placa TTT en atril de estudio

Para terminar el montaje se debe posicionar un acelerómetro de menos de 1 gramo de peso de manera de no afectar el movimiento natural de cada placa. Este acelerómetro debe ser colocado en un nodo conocido para que posteriormente el programa computacional que obtiene los datos sepa exactamente la ubicación de esto. En la figura N° 4.4 se muestra el acelerómetro en el nodo 4 de la placa mostrada.



Figura N° 4.4: Placa con elásticos y acelerómetro instalado en nodo 4

Además del acelerómetro se necesita un martillo modal con punta de goma, para excitar la placa. La excitación se debe realizar en todos los nodos de la placa. Por cada nodo se realizaran varios golpes y se obtiene el promedio de 5 golpes aceptables. En la figura N° 4.5 se muestra la placa siendo golpeada por el martillo modal que tiene que pegar en cada nodo en dirección normal al plano.



Figura N° 4.5: Martillo modal golpeando a placa experimental

Un golpe aceptable es cuando se observa un solo pick limpio, de lo contrario será un golpe inaceptable. En la figura N° 4.6 se muestra un golpe aceptable y en la figura N° 4.7 se muestra un golpe inaceptable.

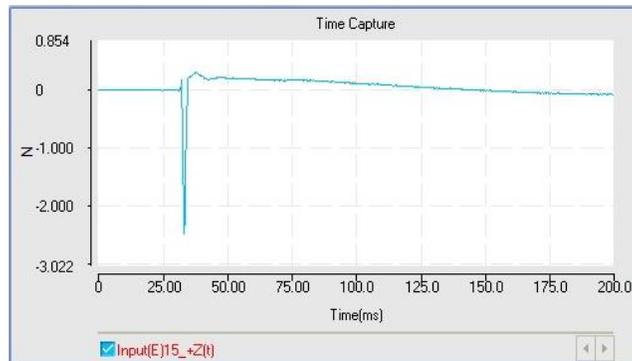


Figura N° 4.6: Detección de un golpe aceptable del martillo modal

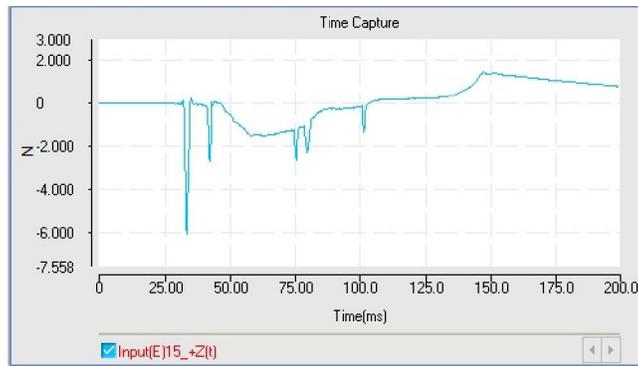


Figura N° 4.7: Detección de un golpe inaceptable del martillo modal

El programa computacional que detecta el martillo modal y los datos del acelerómetro es el “Modal Data Acquisition”. El resultado que entrega este programa computacional es la función de respuesta en frecuencia (FRF). En la figura N° 4.8 se muestra una FRF entregada por el software de adquisición de datos.

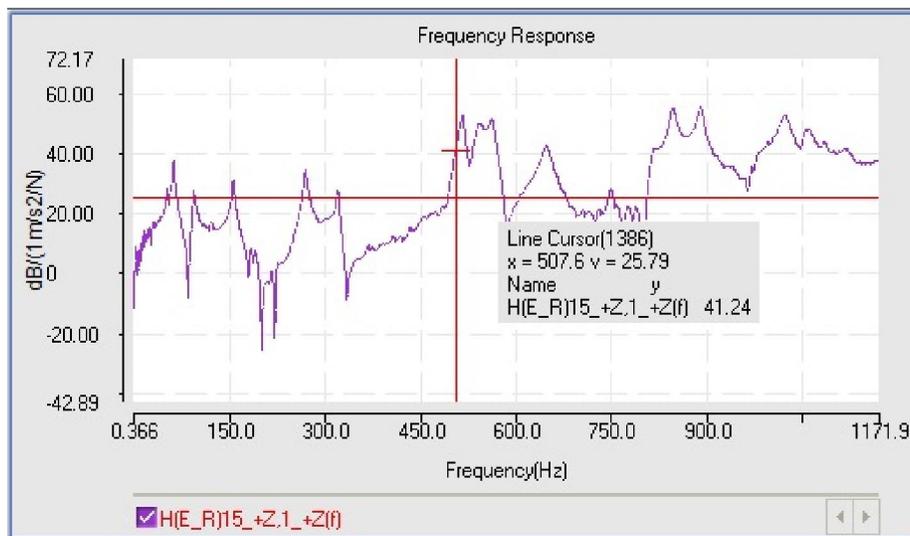


Figura N° 4.8: FRF entregadas por “Modal Data Acquisition”

4.2.2. FRECUENCIAS NATURALES

La FRF se ingresan a otro programa computacional llamado “Femtools”. En este último programa se deben definir la ubicación de los nodos de cada placa. Para lo anterior se definen las coordenadas de los nodos y las líneas que unen los nodos para representar cada

placa de manera geométrica. En la figura N° 4.9 se muestra el esquema de la placa en el programa “Femtools”.

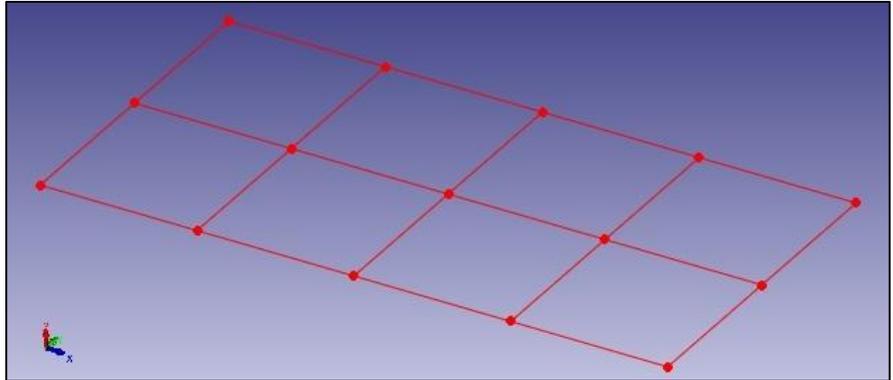


Figura N° 4.9: Esquema de placa en “Femtools”

Definida la geometría e ingresados los datos de función de respuesta de frecuencia, se procede a extraer los polos. El rango de frecuencias puede elegirse desde 0 [Hz] a 500 [Hz], teniendo en cuenta el tener por lo menos 6 “picks” para extraer los polos. De esta manera el programa “Femtools” extrae los polos más relevantes. En la figura N° 4.10 se puede ver el rango completo de frecuencias de la función de respuesta en frecuencia.

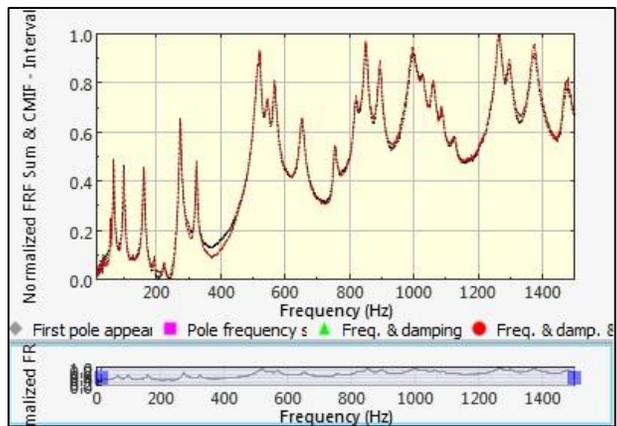


Figura N° 4.10: Función de respuesta en frecuencia en “Femtools”

Los polos entregados por el programa “Femtools” deben cumplir con 2 requerimientos para ser considerados estables. La dispersión de la frecuencia no debe variar más de un 1% en magnitud, además la razón de amortiguamiento no debe variar más de un 5% [9]. Se muestra en la figura N° 4.11 un ejemplo diagrama de estabilidad que utiliza el program “Femtools” para extraer los polos.

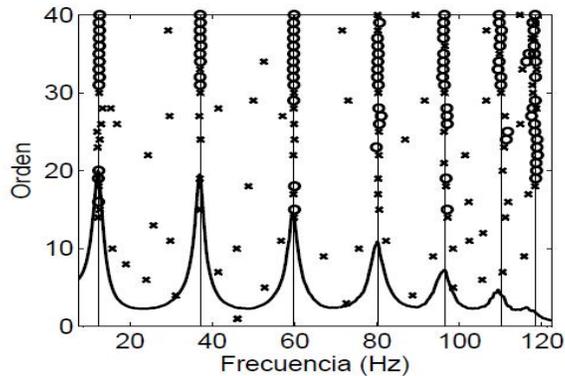


Figura N° 4.11: Diagrama de estabilidad [9]

Los polos encontrados que cumplen con la dispersión de frecuencias y razón de amortiguamiento, corresponden a las frecuencias naturales de las placas.

4.2.3. MODOS DE VIBRACION

Una vez encontradas las frecuencias naturales de las placas, se pueden extraer los modos de vibración. Cada modo de vibración está asociado a una frecuencia natural. En la figura N° 4.12 se muestra un ejemplo de los modos de vibración de una placa.

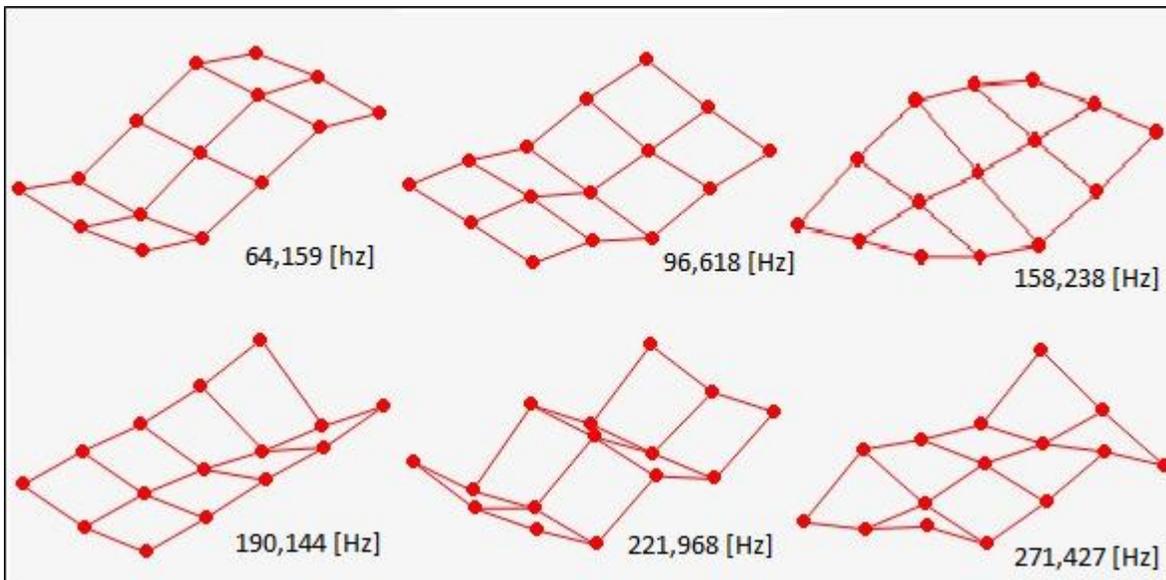


Figura N° 4.12: Ejemplos de modos de vibración de una placa.

4.3. MÉTODO ANALÍTICO Y COMPUTACIONAL

El método analítico consiste en encontrar las constantes elásticas de cada placa en estudio a través de las ecuaciones mencionadas en el capítulo de antecedentes. Esas constantes elásticas se ingresan en el programa computacional ANSYS, para definir el material de la placa en estudio. Finalmente con un análisis modal se obtienen las frecuencias naturales y modos de vibración.

4.3.1. MEDICION DE PLACAS

Cada placa tiene su secuencia de laminado y la orientación específica. El siguiente paso es medir cada placa en largo, ancho y espesor. Medir el espesor de una placa delgado es complicado, dado que el proceso de fabricación de estas es manual. Al ser un proceso manual el espesor no es parejo en toda la placa. Para resolver este dilema, se toma el peso de cada placa y se ajusta el espesor promedio a las ecuaciones de las propiedades físicas.

4.3.2. OBTENCION DE CONTANTES ELASTICAS

Se definen las constantes elásticas para cada placa en estudio. Estas representan las del laminado con todos los refuerzos considerados. Se utilizan las ecuaciones de teoría de mezclas; las ecuaciones de Halpin-Tsai; y para el caso de fibras multidireccionales, se utiliza el apoyo del software computacional TRILAM. En la tabla N° 4.13 se muestran las propiedades físicas y constantes elásticas para definir el material de una placa.

Tabla N° 4.1: Propiedades físicas y constantes elásticas para definir un material

Densidad Lamina	ρ	[kg/m ³]
Módulo de Elasticidad Longitudinal	E_1	[MPa]
Módulo de Elasticidad Transversal	E_2	[MPa]
Módulo de Elasticidad Normal	E_3	[MPa]
Módulo de Poisson Longitudinal-Transversal	ν_{12}	[-]
Módulo de Poisson Transversal-Longitudinal	ν_{21}	[-]
Módulo de Poisson Longitudinal-Normal	ν_{13}	[-]
Módulo de Poisson Normal-Longitudinal	ν_{31}	[-]
Módulo de Poisson Transversal-Normal	ν_{23}	[-]
Módulo de Poisson Normal-Transversal	ν_{32}	[-]
Módulo de Corte Longitudinal-Transversal	G_{12}	[MPa]
Módulo de Corte Longitudinal-Normal	G_{13}	[MPa]
Módulo de Corte Transversal-Normal	G_{23}	[MPa]

4.3.3. MATERIAL EN ANSYS

Se hace la modelación de las placas de PRFV con el programa Ansys Mechanical APDL. El procedimiento realizado en ansys se muestra a continuación.

- Definir la geometría de la placa y crear una superficie.
- Definir espesor de superficie
- Elegir elemento Shell de 4 nodos para mallar.
- Ingresar constantes elásticas para material lineal ortotrópico.
- Ingresar densidad de material.
- Iniciar análisis modal
- Definir 10 nodos a extraer en frecuencia entre 1 y 500 [Hz].
- .Obtener las 10 primeras frecuencias naturales y modos de vibración.

Cada placa se debe definir primero por 4 puntos, luego 4 líneas y finalmente un área. Los 6 primeros modos bajo frecuencias de 1 [Hz] se conocen como modos de cuerpo sólido y no serán consideradas en esta experiencia. En la figura N° 4.13 se muestra una placa en estudio en un modo de vibración.

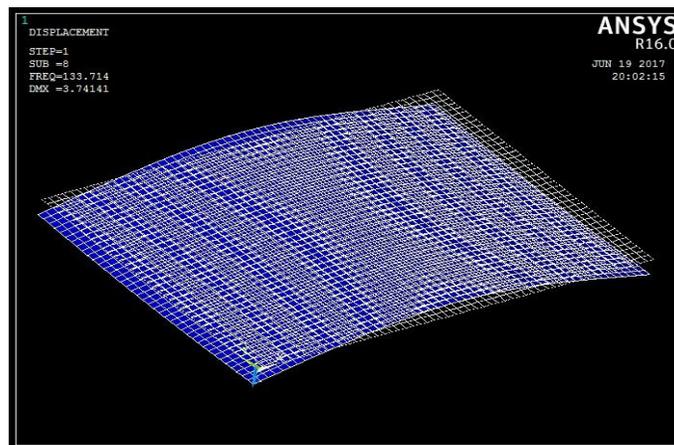


Figura N° 4.13: Modo de vibración

4.4. OPTIMIZACION DE CONSTANTES ELASTICAS

Una vez obtenidas las frecuencias naturales y modos de vibración con el método experimental modal y método analítico computacional, se procede a realizar la correlación de estas frecuencias. En la figura N° 4.14 se muestra en forma gráfica los modos de vibración experimental con el computacional.

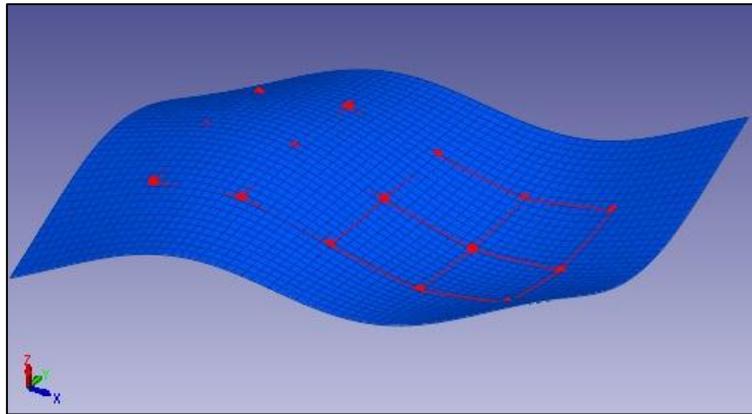


Figura N° 4.14: Modo de vibración experimental y computacional

El procedimiento de optimización es el que se muestra a continuación.

- Ingresar modos de vibración experimentales.
- Ingresar modos de vibración computacionales.
- Correlacionar los modos con un MAC no menor a 80%
- Correlacionar los modos con diferencia en frecuencia no mayor a 20%.
- Se definen las variables para el estudio (ρ , E_x , E_y , G_{xy} , G_{xz} , G_{yz} , ν_{xy}).
- No se permite más de un 40% de variación en cada constante.
- Optimizar modos computacionales a los modos experimentales
- Obtener las constantes elásticas experimentales de cada placa.

5. RESULTADOS

En esta memoria se estudian 11 placas de PRFV para obtener sus constantes elásticas. Estas constantes se obtienen primero con las ecuaciones entregadas en el capítulo de antecedentes. Luego con ellas se modelan las placas y se realizan unos análisis modales de elementos finitos. Los modos de vibración computacionales se optimizan a los experimentales y se obtiene las constantes elásticas reales de cada placa.

En este capítulo se entregan los resultados obtenidos en el desarrollo de esta memoria.

5.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE PLACAS DE PRFV

Las placas de PRFV fueron fabricadas para estudiar distintas secuencias de laminación. Cada placa tiene diferentes dimensiones y pesos. En la tabla N° 5.1 se muestran las dimensiones y pesos de cada placa en estudio.

Tabla N° 5.1: Dimensiones y pesos de placas en estudio

Placa	Secuencia [Código]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Peso [kg]
1	VMM	292	190	1,96	0,158
2	MMM	291	204	2,33	0,208
3	TTT	292	206	2,08	0,227
4	MTM	294	197	2,22	0,207
5	MTMTM	279	195	3,54	0,317
6	U0°/U0°/U0°/U0°	294	201	1,38	0,161
7	U45°/U-45°/U45°/U-45°	239	205	2,08	0,175
8	U55°/U-55°/U55°/U-55°	240	206	2,02	0,173
9	U65°/U-65°/U65°/U-65°	237	207	2,10	0,176
10	U75°/U-75°/U75°/U-75°	240	210	2,05	0,178
11	U80°/U-80°/U80°/U-80°	239	210	1,98	0,173

En la tabla N° 5.1 se muestra el espesor ajustado al peso de cada placa. Este espesor depende de los espesores de cada laminado que lo compone, el peso del refuerzo, el peso de la matriz, etc. A continuación se muestran las propiedades físicas de cada placa en estudio.

5.1.1. PLACA VMM

Esta placa está compuesta por un VELO C y dos MAT 450 remojados en resina epoxy-viniléster. El VELO C es muy delgado y puede tener espesores entre 0,2 a 0,3 [mm]. Los espesores de cada laminado están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.2 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.3 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.2: Propiedades físicas de placa VMM

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
VELO C	0,26	0,030	0,298	0,328
MAT 450	0,85	0,450	0,811	1,261
MAT 450	0,85	0,450	0,811	1,261
VMM	1,96	0,930	1,919	2,849
		[kg]	[kg]	[kg]
PLACA VMM	1,96	0,052	0,106	0,158

Tabla N° 5.3: Propiedades físicas de placa VMM

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
VELO C	1.260	4,58	95,42	9,15	90,85
MAT 450	1.483	20,52	79,48	35,69	64,31
MAT 450	1.483	20,52	79,48	35,69	64,31
VMM	1.454	18,41	81,59	32,17	67,83
PLACA VMM	1.454	18,41	81,59	32,17	67,83

5.1.2. PLACA MMM

Esta placa está compuesta por tres MAT 450 remojados en resina epoxy-viniléster. Los espesores de cada laminado están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.4 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.5 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.4: Propiedades físicas de placa MMM

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
MAT 450	0,78	0,45	0,721	1,171
MAT 450	0,78	0,45	0,721	1,171
MAT 450	0,78	0,45	0,721	1,171
MMM	2,33	1,350 [kg]	2,162 [kg]	3,512 [kg]
PLACA MMM	2,33	0,080	0,128	0,208

Tabla N° 5.5: Propiedades físicas de placa MMM

Tipo Laminado [Code]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
MAT 450	1.511	22,51	77,49	38,44	61,56
MAT 450	1.511	22,51	77,49	38,44	61,56
MAT 450	1.511	22,51	77,49	38,44	61,56
MMM	1.511	22,51	77,49	38,44	61,56
PLACA MMM	1.511	22,51	77,49	38,44	61,56

5.1.3. PLACA TTT

Esta placa está compuesta por tres TELA 800 remojados en resina epoxy-viniléster. Los espesores de cada laminado están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.6 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.7 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.6: Propiedades físicas de placa TTT

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
TELA 800	0,69	0,800	0,458	1,258
TELA 800	0,69	0,800	0,458	1,258
TELA 800	0,69	0,800	0,458	1,258
TTT	2,08	2,400 [kg]	1,375 [kg]	3,775 [kg]
PLACA TTT	2,08	0,144	0,083	0,227

Tabla N° 5.7: Propiedades físicas de placa TTT

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
TELA 800	1.818	44,81	55,19	63,40	36,60
TELA 800	1.818	44,81	55,19	63,40	36,60
TELA 800	1.818	44,81	55,19	63,40	36,60
TTT	1.818	44,81	55,19	63,40	36,60
PLACA TTT	1.818	44,81	55,19	63,40	36,60

5.1.4. PLACA MTM

Esta placa está compuesta por dos MAT 450 y una TELA 800 remojados en resina epoxy-viniléster. Se supone que cada laminado tiene el mismo espesor y que están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.8 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.9 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.8: Propiedades físicas de placa MTM

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
MAT 450	0,74	0,450	0,679	1,129
TELA 800	0,74	0,800	0,516	1,316
MAT 450	0,74	0,450	0,679	1,129
MTM	2,22	1,700	1,873	3,573
		[kg]	[kg]	[kg]
PLACA MTM	2,22	0,098	0,108	0,207

Tabla N° 5.9: Propiedades físicas de placa MTM

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
MAT 450	1.525	23,57	76,43	39,87	60,13
TELA 800	1.778	41,90	58,10	60,63	39,37
MAT 450	1.525	23,57	76,43	39,87	60,13
MTM	1.610	29,68	70,32	46,79	53,21
PLACA MTM	1.610	29,68	70,32	46,79	53,21

5.1.5. PLACA MTMTM

Esta placa está compuesta por tres MAT 450 y dos TELA 800 remojados en resina epoxy-viniléster. Se supone que cada laminado tiene el mismo espesor y que están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.10 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.11 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.10: Propiedades físicas de placa MTMTM

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
MAT 450	0,71	0,450	0,640	1,090
TELA 800	0,71	0,800	0,478	1,278
MAT 450	0,71	0,450	0,640	1,090
TELA 800	0,71	0,800	0,478	1,278
MAT 450	0,71	0,450	0,640	1,090
MTMTM	3,54	2,950	2,876	5,826
		[kg]	[kg]	[kg]
PLACA MTMTM	3,54	0,160	0,156	0,317

Tabla N° 5.11: Propiedades físicas de placa MTMTM

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
MAT 450	1.540	24,64	75,36	41,27	58,73
TELA 800	1.804	43,80	56,20	62,45	37,55
MAT 450	1.540	24,64	75,36	41,27	58,73
TELA 800	1.804	43,80	56,20	62,45	37,55
MAT 450	1.540	24,64	75,36	41,27	58,73
MTMTM	1.646	32,30	67,70	49,74	50,26
PLACA MTMTM	1.646	32,30	67,70	49,74	50,26

5.1.6. PLACA U0

Esta placa está compuesta por cuatro UNI 500 remojadas en resina epoxy-viniléster. Se supone que cada laminado tiene el mismo espesor y que están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.12 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.13 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.12: Propiedades físicas de placa U0

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
UNI 500	0,35	0,500	0,181	0,681
UNI 500	0,35	0,500	0,181	0,681
UNI 500	0,35	0,500	0,181	0,681
UNI 500	0,35	0,500	0,181	0,681
UUUU	1,38	2,000	0,726	2,726
		[kg]	[kg]	[kg]
PLACA U0	1,38	0,118	0,043	0,161

Tabla N° 5.13: Propiedades físicas de placa U0

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
UNI 500	1.975	56,17	43,83	73,37	26,63
UNI 500	1.975	56,17	43,83	73,37	26,63
UNI 500	1.975	56,17	43,83	73,37	26,63
UNI 500	1.975	56,17	43,83	73,37	26,63
UUUU	1.975	56,17	43,83	73,37	26,63
PLACA U0	1.975	56,17	43,83	73,37	26,63

5.1.7. PLACA U45

Esta placa está compuesta por cuatro UNI 500 remojadas en resina epoxy-viniléster. Se supone que cada laminado tiene el mismo espesor y que están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.14 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.15 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.14: Propiedades físicas de placa U45

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
UNI 500	0,52	0,500	0,393	0,893
UNI 500	0,52	0,500	0,393	0,893
UNI 500	0,52	0,500	0,393	0,893
UNI 500	0,52	0,500	0,393	0,893
UUUU	2,08	2,000	1,571	3,571
		[kg]	[kg]	[kg]
PLACA U45	2,08	0,098	0,077	0,175

Tabla N° 5.15: Propiedades físicas de placa U45

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
UNI 500	1.713	37,20	62,80	56,01	43,99
UNI 500	1.713	37,20	62,80	56,01	43,99
UNI 500	1.713	37,20	62,80	56,01	43,99
UNI 500	1.713	37,20	62,80	56,01	43,99
UUUU	1.713	37,20	62,80	56,01	43,99
PLACA U45	1.713	37,20	62,80	56,01	43,99

5.1.8. PLACA U55

Esta placa está compuesta por cuatro UNI 500 remojadas en resina epoxy-viniléster. Se supone que cada laminado tiene el mismo espesor y que están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.16 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.17 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.16: Propiedades físicas de placa U45

Tipo Laminado [Code]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
UNI 500	0,51	0,500	0,375	0,875
UNI 500	0,51	0,500	0,375	0,875
UNI 500	0,51	0,500	0,375	0,875
UNI 500	0,51	0,500	0,375	0,875
UUUU	2,02	2,000	1,499	3,499
		[kg]	[kg]	[kg]
PLACA U55	2,02	0,099	0,074	0,173

Tabla N° 5.17: Propiedades físicas de placa U45

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
UNI 500	1.729	38,30	61,70	57,17	42,83
UNI 500	1.729	38,30	61,70	57,17	42,83
UNI 500	1.729	38,30	61,70	57,17	42,83
UNI 500	1.729	38,30	61,70	57,17	42,83
UUUU	1.729	38,30	61,70	57,17	42,83
PLACA U55	1.729	38,30	61,70	57,17	42,83

5.1.9. PLACA U65

Esta placa está compuesta por cuatro UNI 500 remojadas en resina epoxy-viniléster. Se supone que cada laminado tiene el mismo espesor y que están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.18 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.19 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.18: Propiedades físicas de placa U65

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
UNI 500	0,53	0,50	0,397	0,897
UNI 500	0,53	0,500	0,397	0,897
UNI 500	0,53	0,500	0,397	0,897
UNI 500	0,53	0,500	0,397	0,897
UUUU	2,10	2,000	1,590	3,590
		[kg]	[kg]	[kg]
PLACA U65	2,10	0,098	0,078	0,176

Tabla N° 5.19: Propiedades físicas de placa U65

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
UNI 500	1.709	36,91	63,09	55,71	44,29
UNI 500	1.709	36,91	63,09	55,71	44,29
UNI 500	1.709	36,91	63,09	55,71	44,29
UNI 500	1.709	36,91	63,09	55,71	44,29
UUUU	1.709	36,91	63,09	55,71	44,29
PLACA U65	1.709	36,91	63,09	55,71	44,29

5.1.10. PLACA U75

Esta placa está compuesta por cuatro UNI 500 remojadas en resina epoxy-viniléster. Se supone que cada laminado tiene el mismo espesor y que están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.20 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.21 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.20: Propiedades físicas de placa U75

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
UNI 500	0,51	0,500	0,383	0,883
UNI 500	0,51	0,500	0,383	0,883
UNI 500	0,51	0,500	0,383	0,883
UNI 500	0,51	0,500	0,383	0,883
UUUU	2,05	2,000	1,532	3,532
		[kg]	[kg]	[kg]
PLACA U75	2,05	0,101	0,077	0,178

Tabla N° 5.21: Propiedades físicas de placa U75

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
UNI 500	1.721	37,78	62,22	56,62	43,38
UNI 500	1.721	37,78	62,22	56,62	43,38
UNI 500	1.721	37,78	62,22	56,62	43,38
UNI 500	1.721	37,78	62,22	56,62	43,38
UUUU	1.721	37,78	62,22	56,62	43,38
PLACA U75	1.721	37,78	62,22	56,62	43,38

5.1.11. PLACA U80

Esta placa está compuesta por cuatro UNI 500 remojadas en resina epoxy-viniléster. Se supone que cada laminado tiene el mismo espesor y que están ajustados al peso de la placa. En la tabla N° 5.22 se muestran los espesores y pesos de refuerzo, matriz y laminado. En la tabla N° 5.23 se muestran las densidades, los porcentajes en volumen y los porcentajes en peso.

Tabla N° 5.22: Propiedades físicas de placa U80

Tipo Laminado [Código]	Espesor Promedio [mm]	Gramaje Refuerzo [kg/m ²]	Gramaje Matriz [kg/m ²]	Gramaje Laminado [kg/m ²]
UNI 500	0,50	0,500	0,361	0,861
UNI 500	0,50	0,500	0,361	0,861
UNI 500	0,50	0,500	0,361	0,861
UNI 500	0,50	0,500	0,361	0,861
UUUU	1,98	2,000	1,446	3,446
		[kg]	[kg]	[kg]
PLACA U80	1,98	0,100	0,073	0,173

Tabla N° 5.23: Propiedades físicas de placa U80

Tipo Laminado [Código]	Densidad Laminar [kg/m ³]	V _f [%]	V _r [%]	W _f [%]	W _r [%]
UNI 500	1.740	39,15	60,85	58,04	41,96
UNI 500	1.740	39,15	60,85	58,04	41,96
UNI 500	1.740	39,15	60,85	58,04	41,96
UNI 500	1.740	39,15	60,85	58,04	41,96
UUUU	1.740	39,15	60,85	58,04	41,96
PLACA U80	1.740	39,15	60,85	58,04	41,96

5.2. CONSTANTES ELASTICAS DE PLACAS DE PRFV

Con las propiedades físicas y constantes elásticas de las materias primas, más los porcentajes en volumen de cada laminado se procede al cálculo de las constantes elásticas de cada placa.

5.2.1. PLACA VMM

5.2.1.1. VELO C

El velo c es una manta con fibras cortas multidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con el programa computacional TRILAM. En la tabla N° 5.24 se muestran los tres módulos de elasticidad y los tres módulos de corte. En la Tabla N° 5.25 se muestran los seis módulos de poisson.

Tabla N° 5.24: Módulos de elasticidad y módulos de corte de velo c

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Código]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
VELO C	4.780	4.780	4.080	1.780	1.480	1.480

Tabla N° 5.25: Módulos de poisson de velo c

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
VELO C	0,34	0,34	0,32	0,27	0,32	0,27

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados.

5.2.1.2. MAT 450

El MAT 450 es una manta con fibras cortas multidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con el programa computacional TRILAM. En la tabla N° 5.26 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.27 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.26: Módulos de elasticidad y módulos de corte de MAT 450

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Código]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
MAT 450	9.470	9.470	6.080	3.550	2.110	2.110

Tabla N° 5.27: Módulos de poisson de MAT 450

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Código]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
MAT 450	0,33	0,33	0,26	0,17	0,26	0,17

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados.

5.2.1.3. ENSAMBLAJE PLACA VMM

Se usa la matriz de ensamblaje para 1 velo C y 2 MAT 450 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa VMM. En la tabla N° 5.28 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.29 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.28: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa VMM

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Código]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
VMM	8.850	8.850	5.840	3.315	2.026	2.026

Tabla N° 5.29: Módulos de poisson de placa VMM

Tipo Laminado	ν_{12}	ν_{21}	ν_{13}	ν_{31}	ν_{23}	ν_{32}
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
VMM	0,33	0,33	0,27	0,18	0,27	0,18

5.2.2. PLACA MMM

5.2.2.1. MAT 450

El MAT 450 es una manta con fibras cortas multidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con el programa computacional TRILAM. En la tabla N° 5.30 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.31 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.30: Módulos de elasticidad y módulos de corte de MAT 450

Tipo Laminado	E_1	E_2	E_3	G_{12}	G_{13}	G_{23}
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
MAT 450	10.080	10.080	6.370	3.780	2.210	2.210

Tabla N° 5.31: Módulos de poisson de MAT 450

Tipo Laminado	ν_{12}	ν_{21}	ν_{13}	ν_{31}	ν_{23}	ν_{32}
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
MAT 450	0,33	0,33	0,26	0,16	0,26	0,16

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados.

5.2.2.2. ENSAMBLAJE PLACA MMM

Se usa la matriz de ensamblaje para 3 MAT 450 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa MMM. En la tabla N° 5.32 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.33 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.32: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa MMM

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
MMM	10.080	10.080	6.370	3.780	2.210	2.210

Tabla N° 5.33: Módulos de poisson de placa MMM

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
MMM	0,33	0,33	0,26	0,16	0,26	0,16

5.2.3. PLACA TTT

5.2.3.1. TELA 800

La TELA 800 es una manta con fibras bidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron suponiendo 3 capas de fibras unidireccionales. La primera capa tiene 1/4 del espesor de la lámina, 5/18 del gramaje del refuerzo y sus fibras están dispuestas en 0°. La segunda capa tiene 1/2 del espesor de la lámina, 4/9 del gramaje del refuerzo y sus fibras están dispuestas en 90°. La tercera capa tiene 1/4 del espesor de la lámina, 5/18 del gramaje del refuerzo y sus fibras están dispuestas en 0°. En la tabla N° 5.34 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.35 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.34: Módulos de elasticidad y módulos de corte de TELA 800

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
TELA 800	23.729	21.569	10.736	3.215	3.609	3.774

Tabla N° 5.35: Módulos de poisson de TELA 800

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
TELA 800	0,14	0,13	0,29	0,13	0,28	0,14

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados.

5.2.3.2. ENSAMBLAJE PLACA TTT

Se usa la matriz de ensamblaje para 3 TELA 800 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa TTT. En la tabla N° 5.36 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.37 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.36: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa TTT

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
TTT	23.729	21.569	10.736	3.215	3.609	3.774

Tabla N° 5.37: Módulos de poisson de placa TTT

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
TTT	0,14	0,13	0,29	0,13	0,28	0,14

5.2.4. PLACA MTM

5.2.4.1. MAT 450

El MAT 450 es una manta con fibras cortas multidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con el programa computacional TRILAM. En la tabla N° 5.38 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.39 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.38: Módulos de elasticidad y módulos de corte de MAT 450

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
MAT 450	10.410	10.410	6.530	3.900	2.260	2.260

Tabla N° 5.39: Módulos de poisson de MAT 450

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
MAT 450	0,33	0,33	0,25	0,16	0,25	0,16

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados

5.2.4.2. TELA 800

La TELA 800 es una manta con fibras bidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron suponiendo 3 capas de fibras unidireccionales. La primera capa tiene 1/4 del espesor de la lámina, 5/18 del gramaje del refuerzo y sus fibras están dispuestas en 0°. La segunda capa tiene 1/2 del espesor de la lámina, 4/9 del gramaje del refuerzo y sus fibras están dispuestas en 90°. La tercera capa tiene 1/4 del espesor de la lámina, 5/18 del gramaje del refuerzo y sus fibras están dispuestas en 0°. En la tabla N° 5.40 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.41 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.40: Módulos de elasticidad y módulos de corte de TELA 800

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
TELA 800	22.342	20.234	10.017	3.013	3.370	3.515

Tabla N° 5.41: Módulos de poisson de TELA 800

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
TELA 800	0,14	0,13	0,29	0,13	0,29	0,14

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados.

5.2.4.3. ENSAMBLAJE PLACA MTM

Se usa la matriz de ensamblaje para 2 MAT 450 y 1 TELA 800 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa MTM. En la tabla N° 5.42 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.43 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.42: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa MTM

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
MTM	14.522	13.847	7.697	3.604	2.630	2.678

Tabla N° 5.43: Módulos de poisson de placa MTM

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
MTM	0,24	0,23	0,27	0,14	0,27	0,15

5.2.5. PLACA MTMTM

5.2.5.1. MAT 450

El MAT 450 es una manta con fibras cortas multidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con el programa computacional TRILAM. En la tabla N° 5.44 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.45 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.44: Módulos de elasticidad y módulos de corte de MAT 450

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
MAT 450	10.740	10.740	6.690	4.030	2.310	2.310

Tabla N° 5.45: Módulos de poisson de MAT 450

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
MAT 450	0,33	0,33	0,25	0,16	0,25	0,16

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados.

5.2.5.2. TELA 800

La TELA 800 es una manta con fibras bidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron suponiendo 3 capas de fibras unidireccionales. La primera capa tiene 1/4 del espesor de la lámina, 5/18 del gramaje del refuerzo y sus fibras están dispuestas en 0°. La segunda capa tiene 1/2 del espesor de la lámina, 4/9 del gramaje del refuerzo y sus fibras están dispuestas en 90°. La tercera capa tiene 1/4 del espesor de la lámina, 5/18 del gramaje del refuerzo y sus fibras están dispuestas en 0°. En la tabla N° 5.46 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.47 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.46: Módulos de elasticidad y módulos de corte de TELA 800

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
TELA 800	23.244	21.099	10.479	3.142	3.523	3.681

Tabla N° 5.47: Módulos de poisson de TELA 800

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
TELA 800	0,14	0,13	0,29	0,13	0,29	0,14

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados.

5.2.5.3. ENSAMBLAJE PLACA MTM

Se usa la matriz de ensamblaje para 3 MAT 450 y 3 TELA 800 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa MTMTM. En la tabla N° 5.48 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.49 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.48: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa MTMTM

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
MTMTM	15.888	15.058	8.210	3.675	2.795	2.858

Tabla N° 5.49: Módulos de poisson de placa MTMTM

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
MTMTM	0,23	0,21	0,27	0,14	0,28	0,15

5.2.6. PLACA U0

5.2.6.1. UNI 500

El UNI 500 es una manta con fibras unidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con las ecuaciones de fibras unidireccionales. En la tabla N° 5.50 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.51 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.50: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500

Tipo Laminado	E_1	E_2	E_3	G_{12}	G_{13}	G_{23}
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
UNI 500	42.247	13.792	13.792	4.156	4.156	5.533

Tabla N° 5.51: Módulos de poisson de UNI 500

Tipo Laminado	ν_{12}	ν_{21}	ν_{13}	ν_{31}	ν_{23}	ν_{32}
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
UNI 500	0,27	0,09	0,27	0,09	0,25	0,25

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados.

5.2.6.2. ENSAMBLAJE PLACA U0

Se usa la matriz de ensamblaje para 4 UNI 500 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa U0. En la tabla N° 5.52 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.53 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.52: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U0

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
U0	42.247	13.792	13.792	4.156	4.156	5.533

Tabla N° 5.53: Módulos de poisson de placa U0

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
U0	0,27	0,09	0,27	0,09	0,25	0,25

5.2.7. PLACA U45

5.2.7.1. UNI 500

El UNI 500 es una manta con fibras unidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con las ecuaciones de fibras unidireccionales. En la tabla N° 5.54 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.55 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.54: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
UNI 500	29.192	8.718	8.718	2.710	2.710	3.422

Tabla N° 5.55: Módulos de poisson de UNI 500

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
UNI 500	0,29	0,09	0,29	0,09	0,27	0,27

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados. Las fibras unidireccionales están rotadas en 45°. Se utilizan las ecuaciones de rotación de matriz para obtener la nueva matriz de rigidez (C').

5.2.7.2. ENSAMBLAJE PLACA U45

Se usa la matriz de ensamblaje para 4 UNI 500 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa U0. En la tabla N° 5.56 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.57 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.56: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U45

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
U45	8.704	8.704	8.927	8.427	3.066	3.066

Tabla N° 5.57: Módulos de poisson de placa U45

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
U45	0,61	0,61	0,14	0,14	0,14	0,14

5.2.8. PLACA U55

5.2.8.1. UNI 500

El UNI 500 es una manta con fibras unidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con las ecuaciones de fibras unidireccionales. En la tabla N° 5.58 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.59 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.58: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
UNI 500	29.950	8.944	8.944	2.773	2.773	3.516

Tabla N° 5.59: Módulos de poisson de UNI 500

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
UNI 500	0,29	0,09	0,29	0,09	0,27	0,27

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados. Las fibras unidireccionales están rotadas en 55°. Se utilizan las ecuaciones de rotación de matriz para obtener la nueva matriz de rigidez (C').

5.2.8.2. ENSAMBLAJE PLACA U55

Se usa la matriz de ensamblaje para 4 UNI 500 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa U55. En la tabla N° 5.60 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.61 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.60: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U55

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
U55	7.746	12.894	9.108	7.963	3.272	3.017

Tabla N° 5.61: Módulos de poisson de placa U55

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
U55	0,43	0,71	0,18	0,21	0,12	0,09

5.2.9. PLACA U65

5.2.9.1. UNI 500

El UNI 500 es una manta con fibras unidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con las ecuaciones de fibras unidireccionales. En la tabla N° 5.62 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.63 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.62: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
UNI 500	28.997	8.660	8.660	2.694	2.694	3.399

Tabla N° 5.63: Módulos de poisson de UNI 500

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
UNI 500	0,29	0,09	0,29	0,09	0,27	0,27

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados. Las fibras unidireccionales están rotadas en 65°. Se utilizan las ecuaciones de rotación de matriz para obtener la nueva matriz de rigidez (C').

5.2.9.2. ENSAMBLAJE PLACA U65

Se usa la matriz de ensamblaje para 4 UNI 500 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa U65. En la tabla N° 5.64 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.65 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.64: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U65

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
U65	7.744	18.921	8.741	6.025	3.273	2.820

Tabla N° 5.65: Módulos de poisson de placa U65

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
U65	0,26	0,64	0,22	0,25	0,17	0,08

5.2.10. PLACA U75

5.2.10.1. UNI 500

El UNI 500 es una manta con fibras unidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con las ecuaciones de fibras unidireccionales. En la tabla N° 5.66 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.67 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.66: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
UNI 500	29.591	8.836	8.836	2.743	2.743	3.471

Tabla N° 5.67: Módulos de poisson de UNI 500

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
UNI 500	0,29	0,09	0,29	0,09	0,27	0,27

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados. Las fibras unidireccionales están rotadas en 75°. Se utilizan las ecuaciones de rotación de matriz para obtener la nueva matriz de rigidez (C').

5.2.10.2. ENSAMBLAJE PLACA U75

Se usa la matriz de ensamblaje para 4 UNI 500 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa U75. En la tabla N° 5.68 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.69 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.68: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U75

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
U75	8.436	25.634	8.863	4.193	3.423	2.792

Tabla N° 5.69: Módulos de poisson de placa U75

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
U75	0,15	0,45	0,25	0,27	0,24	0,08

5.2.11. PLACA U80

5.2.11.1. UNI 500

El UNI 500 es una manta con fibras unidireccionales. Sus constantes elásticas se obtuvieron con las ecuaciones de fibras unidireccionales. En la tabla N° 5.70 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la Tabla N° 5.71 se muestran los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.70: Módulos de elasticidad y módulos de corte de UNI 500

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
UNI 500	30.536	9.124	9.124	2.823	2.823	3.591

Tabla N° 5.71: Módulos de poisson de UNI 500

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
UNI 500	0,29	0,09	0,29	0,09	0,27	0,27

Se calculó la matriz de rigidez (C), para el ensamblaje de laminados. Las fibras unidireccionales están rotadas en 80°. Se utilizan las ecuaciones de rotación de matriz para obtener la nueva matriz de rigidez (C').

5.2.11.2. ENSAMBLAJE PLACA U80

Se usa la matriz de ensamblaje para 4 UNI 500 proporcionales a sus espesores. Se calcula la inversa de la matriz de rigidez (C), para obtener la matriz de flexibilidad (S). Con la matriz de flexibilidad del ensamble se procede a obtener las constantes elásticas de la placa U80. En la tabla N° 5.72 se muestran los 3 módulos de elasticidad y los 3 módulos de corte. En la tabla N° 5.73 se muestra los 6 módulos de poisson.

Tabla N° 5.72: Módulos de elasticidad y módulos de corte de placa U80

Tipo Laminado	E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
[Code]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
UNI 500	8.931	28.708	9.136	3.525	3.567	2.846

Tabla N° 5.73: Módulos de poisson de placa U80

Tipo Laminado	v ₁₂	v ₂₁	v ₁₃	v ₃₁	v ₂₃	v ₃₂
[Code]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
UNI 500	0,11	0,37	0,26	0,27	0,26	0,08

5.3. FRECUENCIAS NATURALES Y MODOS DE VIBRACIÓN

Las frecuencias naturales y modos de vibración obtenidos por el método computacional y por el método experimental se ordenan en pares. Entre cada par de modos se restringe a menos de 20% la diferencia en frecuencia y a más de 80% su correlación de modos. La correlación de modos se mide, a través de la variable MAC (modal assurance criterion); un MAC igual a 0 indica no correlación, en cambio un MAC igual a 1 indica completa correlación.

5.3.1. PLACA VMM

En la tabla N° 5.74 se muestran los pares de modos de vibración de la placa VMM. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	55,321	1	45,651	21,2%	93,1
2	58,489	2	58,350	0,2%	84,2
3	127,430	3	114,314	11,5%	95,6
4	143,840	4	155,192	-7,3%	93,4
5	158,150	5	162,590	-2,7%	9,5
6	189,240	6	209,646	-9,7%	94,3

Tabla N° 5.74: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa VMM

5.3.2. PLACA MMM

En la tabla N° 5.75 se muestran los pares de modos de vibración de la placa MMM. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM			MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]		Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	64,322	→	1	71,792	-10,4%	97,7
2	72,975	→	2	84,999	-14,1%	98,7
3	150,480	→	3	166,964	-9,9%	98,5
4	155,420	→	4	180,381	-13,8%	93,9
5	188,560	→	5	207,355	-9,1%	89,4
6	220,610	→	6	253,721	-13,1%	98,9

Tabla N° 5.7.5: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa MMM

5.3.3. PLACA TTT

En la tabla N° 5.76 se muestran los pares de modos de vibración de la placa TTT. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM			MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]		Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	48,811		1	64,159	-23,9%	96,9
2	90,294	→	2	96,618	-6,5%	98,5
3	134,240	→	3	158,238	-15,2%	99,4
4	174,170		4	190,144	-8,4%	48,4
5	198,410	→	5	221,968	-10,6%	84,0
6	251,110	→	6	271,427	-7,5%	99,3

Tabla N° 5.76: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa TTT

5.3.4. PLACA MTM

En la tabla N° 5.77 se muestran los pares de modos de vibración de la placa MTM. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	48,811	1	64,159	-23,9%	96,9
2	90,294	2	96,618	-6,5%	98,5
3	134,240	3	158,238	-15,2%	99,4
4	174,170	4	190,144	-8,4%	48,4
5	198,410	5	221,968	-10,6%	84,0
6	251,110	6	271,427	-7,5%	99,3

Tabla N° 5.77: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa MTM

5.3.5. PLACA MTMTM

En la tabla N° 5.78 se muestran los pares de modos de vibración de la placa MTMTM. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	101,800	1	127,614	-20,2%	96,7
2	145,040	2	151,542	-4,3%	96,7
3	253,130	3	290,348	-12,8%	97,9
4	294,860	4	328,281	-10,2%	96,6
5	349,590	5	380,333	-8,1%	79,0
6	412,920	6	439,421	-6,0%	97,7

Tabla N° 5.78: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa MTMTM

5.3.6. U0

En la tabla N° 5.79 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U0. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM			MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]		Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	36,009	→	1	38,101	-5,5%	84,5
2	75,180		2	84,977	11,0%	50,1
3	94,364		3	105,977	-29,1%	75,0
4	105,310	→	4	114,591	2,8%	77,4
5	117,830		5	123,196	-14,5%	91,4
6	191,430		6	190,878	0,3%	54,6

Tabla N° 5.79: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U0

5.3.7. U45

En la tabla N° 5.80 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U45. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM			MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]		Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	81,423	→	1	97,999	-16,9%	90,2
2	96,491	→	2	107,270	-10,0%	97,7
3	148,360	→	3	152,790	-2,9%	97,6
4	215,940	→	4	230,860	-6,5%	97,0
5	222,280	→	5	239,550	-7,2%	98,2
6	291,770	→	6	308,850	-5,5%	98,1

Tabla N° 5.80: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U45

5.3.8. U55

En la tabla N° 5.81 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U55. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	76,420	1	90,171	-15,2%	98,2
2	90,022	2	103,190	-12,8%	92,7
3	158,550	3	176,310	-10,1%	94,5
4	200,450	4	212,820	-5,8%	96,1
5	211,240	5	234,550	-9,9%	86,6
6	265,490	6	279,790	-5,1%	99,3

Tabla N° 5.81: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U55

5.3.9. U65

En la tabla N° 5.82 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U65. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	82,068	1	90,887	-9,7%	75,7
2	82,932	2	94,175	-11,9%	90,0
3	180,630	3	194,790	-7,3%	91,4
4	188,630	4	206,550	-8,7%	99,4
5	219,350	5	245,210	-10,5%	98,7
6	263,600	6	275,970	-4,5%	99,7

Tabla N° 5.82: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U65

5.3.10. U75

En la tabla N° 5.83 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U75. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM			MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]		Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	66,349	→	1	78,699	-15,7%	99,2
2	81,121	→	2	85,975	-5,6%	97,9
3	157,950	→	3	178,610	-11,6%	98,1
4	189,470	→	4	217,660	-13,0%	95,7
5	214,640	→	5	232,640	-7,7%	91,1
6	244,150	→	6	266,940	-8,5%	99,4

Tabla N° 5.83: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U75

5.3.11. U80

En la tabla N° 5.84 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U80. En verde se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias y correlación. En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM			MODAL		CORRELACION	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]		Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	58,975	→	1	69,804	-15,5%	96,0
2	80,686	→	2	82,995	-2,8%	97,0
3	144,840	→	3	160,540	-9,8%	97,0
4	189,990	→	4	228,710	2,8%	80,4
5	212,870		5	255,880	-25,8%	88,4
6	235,160	→	6	272,050	-21,8%	2,7

Tabla N° 5.84: Correlación de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U80

5.4. FRECUENCIAS NATURALES Y MODOS DE VIBRACION OPTIMIZADOS

Las constantes elásticas del modelo computacional están asociadas a las frecuencias naturales obtenidas por el método de elementos finitos. Para obtener las constantes elásticas reales o experimentales se optimizan las frecuencias naturales computacionales a las frecuencias naturales experimentales.

5.4.1. PLACA VMM

En la tabla N° 5.85 se muestran los pares de modos de vibración de la placa VMM optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		OPTIMIZADO	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	47,030	1	45,651	3,0%	92,9
2	58,251	2	58,350	-0,2%	86,7
3	113,430	3	114,314	-0,8%	95,6
4	145,760	4	155,192	-6,1%	95,7
5	150,560	5	162,590	-7,4%	8,0
6	191,120	6	209,646	-8,8%	97,3

Tabla N° 5.85: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa VMM

5.4.2. PLACA MMM

En la tabla N° 5.86 se muestran los pares de modos de vibración de la placa MMM optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		OPTIMIZADO	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	70,983	1	71,792	-1,1%	97,7
2	83,407	2	84,999	-1,9%	99,0
3	168,020	3	166,964	0,6%	98,6
4	178,690	4	180,381	-0,9%	93,5
5	211,400	5	207,355	2,0%	89,6
6	256,190	6	253,721	1,0%	99,3

Tabla N° 5.86: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa MMM

5.4.3. PLACA TTT

En la tabla N° 5.87 se muestran los pares de modos de vibración de la placa TTT optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		OPTIMIZADO	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	63,262	1	64,159	-1,4%	96,9
2	96,737	2	96,618	0,1%	98,5
3	160,750	3	158,238	1,6%	99,4
4	183,78	4	190,144	-3,3%	48,3
5	221,470	5	221,968	-0,2%	84,0
6	269,430	6	271,427	-0,7%	99,4

Tabla N° 5.87: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa TTT

5.4.4. PLACA MTM

En la tabla N° 5.88 se muestran los pares de modos de vibración de la placa MTM optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		OPTIMIZADO	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	67,788	1	67,491	0,4%	96,6
2	74,287	2	74,947	-0,9%	97,0
3	157,560	3	158,678	-0,7%	98,2
4	185,790	4	186,352	-0,3%	97,2
5	199,990	5	198,030	1,0%	91,9
6	240,950	6	239,146	0,8%	98,9

Tabla N° 5.88: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa MTM

5.4.5. PLACA MTMTM

En la tabla N° 5.89 se muestran los pares de modos de vibración de la placa MTMTM optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		OPTIMIZADO	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	125,130	1	127,614	-1,9%	98,3
2	149,150	2	151,542	-1,6%	99,2
3	295,490	3	290,348	1,8%	99,5
4	325,850	4	328,281	-0,7%	97,1
5	387,080	5	380,333	1,8%	98,1
6	442,330	6	439,421	0,7%	99,5

Tabla N° 5.89: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa MTMTM

5.4.6. PLACA U0

En la tabla N° 5.90 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U0 optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL OPTIMIZADO			
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	37,184	1	38,101	-2,4%	84,4
2	85,525	2	84,977	0,6%	56,5
3	90,698	3	105,977	-14,4%	75,5
5	115,720	4	114,591	1,0%	78,3
4	115,140	5	123,196	-6,5%	91,2
6	196,470	6	190,878	2,9%	54,4

Tabla N° 5.90: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U0

5.4.7. PLACA U45

En la tabla N° 5.91 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U45 optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL OPTIMIZADO			
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	97,004	1	97,999	-1,0%	90,1
2	104,050	2	107,270	-3,0%	97,7
3	152,040	3	152,790	-0,5%	97,7
4	234,950	4	230,860	1,8%	97,1
5	245,890	5	239,550	2,6%	95,5
6	310,100	6	308,850	0,4%	98,4

Tabla N° 5.91: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U45

5.4.8. PLACA U55

En la tabla N° 5.92 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U55 optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		OPTIMIZADO	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	88,893	1	90,171	-1,4%	98,5
2	98,718	2	103,190	-4,3%	92,7
3	174,310	3	176,310	-1,1%	95,9
4	220,260	4	212,820	3,5%	95,7
5	240,510	5	234,550	2,5%	82,3
6	283,370	6	279,790	1,3%	99,1

Tabla N° 5.92: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U55

5.4.9. PLACA U65

En la tabla N° 5.93 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U65 optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		OPTIMIZADO	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	89,521	1	90,887	-1,5%	75,2
2	92,592	2	94,175	-1,7%	90,0
3	193,660	3	194,790	-0,6%	92,2
4	208,190	4	206,550	0,8%	99,4
5	243,230	5	245,210	-0,8%	91,8
6	277,110	6	275,970	0,4%	99,5

Tabla N° 5.93: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U65

5.4.10. PLACA U75

En la tabla N° 5.94 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U75 optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		OPTIMIZADO	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	88,893	1	90,171	-1,4%	98,5
2	98,718	2	103,190	-4,3%	92,7
3	174,310	3	176,310	-1,1%	95,9
4	220,260	4	212,820	3,5%	95,7
5	240,510	5	234,550	2,5%	82,3
6	283,370	6	279,790	1,3%	99,1

Tabla N° 5.94: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U75

5.4.11. PLACA U80

En la tabla N° 5.95 se muestran los pares de modos de vibración de la placa U80 optimizados. En azul se muestran los pares que cumplen con las exigencias de frecuencias (20%) y correlación (80%). En Rojo se marca el valor que no cumple la exigencia.

FEM		MODAL		OPTIMIZADO	
Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Modo [-]	Frecuencia [Hz]	Dif. [%]	MAC [%]
1	89,521	1	90,887	-1,5%	75,2
2	92,592	2	94,175	-1,7%	90,0
3	193,660	3	194,790	-0,6%	92,2
4	208,190	4	206,550	0,8%	99,4
5	243,230	5	245,210	-0,8%	91,8
6	277,110	6	275,970	0,4%	99,5

Tabla N° 5.95: Optimización de modos de vibración y frecuencias naturales de placa U80

5.5. CONSTANTES ELÁSTICAS

Al optimizar las frecuencias naturales computacionales a las experimentales, varían las constantes elásticas un máximo de un 40%.

5.5.1. PLACA VMM

En la tabla N° 5.96 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa VMM. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.454	1.608	10,6
E_x	[Mpa]	8.850	9.684	9,4
E_y	[Mpa]	8.850	9.248	4,5
G_{xy}	[Mpa]	3.315	2.591	-21,9
G_{xz}	[Mpa]	2.026	2.034	0,4
G_{yz}	[Mpa]	2.026	2.032	0,3
ν_{xy}	[-]	0,33	0,46	40,0

Tabla N° 5.96: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa VMM

5.5.2. PLACA MMM

En la tabla N° 5.97 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa MMM. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.511	1.272	-15,8
E_x	[Mpa]	10.080	11.082	9,9
E_y	[Mpa]	10.080	10.835	7,5
G_{xy}	[Mpa]	3.780	3.852	1,9
G_{xz}	[Mpa]	2.210	2.196	-0,6
G_{yz}	[Mpa]	2.210	2.169	-1,9
ν_{xy}	[-]	0,33	0,39	16,9

Tabla N° 5.97: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa MMM

5.5.3. PLACA TTT

En la tabla N° 5.98 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa TTT. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.818	1.484	-18,4
E_x	[Mpa]	23.729	22.227	-6,3
E_y	[Mpa]	21.569	19.572	-9,3
G_{xy}	[Mpa]	3.215	4.501	40,0
G_{xz}	[Mpa]	3.774	3.758	-0,4
G_{yz}	[Mpa]	3.609	3.620	0,3
ν_{xy}	[-]	0,14	0,15	4,8

Tabla N° 5.98: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa TTT

5.5.4. PLACA MTM

En la tabla N° 5.99 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa MTM. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.610	1.536	-4,6
E_x	[Mpa]	14.522	12.078	-16,8
E_y	[Mpa]	13.847	13.953	0,8
G_{xy}	[Mpa]	3.604	4.448	23,4
G_{xz}	[Mpa]	2.678	2.685	0,3
G_{yz}	[Mpa]	2.630	2.621	-0,3
ν_{xy}	[-]	0,24	0,32	33,1

Tabla N° 5.99: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa MTM

5.5.5. PLACA MTMTM

En la tabla N° 5.100 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa MTMTM. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.646	1.402	-14,8
E_x	[Mpa]	15.888	14.270	-10,2
E_y	[Mpa]	15.058	15.321	1,7
G_{xy}	[Mpa]	3.675	4.820	31,2
G_{xz}	[Mpa]	2.858	2.795	-2,2
G_{yz}	[Mpa]	2.795	2.747	-1,7
ν_{xy}	[-]	0,23	0,27	15,9

Tabla N° 5.100: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa MTMTM

5.5.6. PLACA U0

En la tabla N° 5.101 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa U0. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.975	1.850	-6,3
E_x	[Mpa]	42.247	52.751	24,9
E_y	[Mpa]	13.792	11.749	-14,8
G_{xy}	[Mpa]	4.156	4.148	-0,2
G_{xz}	[Mpa]	5.533	5.531	0,0
G_{yz}	[Mpa]	4.156	4.141	-0,4
ν_{xy}	[-]	0,27	0,18	-34,0

Tabla N° 5.101: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U0

5.5.7. PLACA U45

En la tabla N° 5.102 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa U45. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.713	1.430	-16,5
E_x	[Mpa]	8.704	10.214	17,4
E_y	[Mpa]	8.704	9.513	9,3
G_{xy}	[Mpa]	8.427	8.227	-2,4
G_{xz}	[Mpa]	3.066	3.004	-2,0
G_{yz}	[Mpa]	3.066	2.951	-3,7
ν_{xy}	[-]	0,61	0,48	-21,3

Tabla N° 5.102: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U45

5.5.8. PLACA U55

En la tabla N° 5.103 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa U55. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.729	1.424	-17,6
E_x	[Mpa]	7.746	8.628	11,4
E_y	[Mpa]	12.894	15.161	17,6
G_{xy}	[Mpa]	7.963	7.918	-0,6
G_{xz}	[Mpa]	3.017	1.874	-37,9
G_{yz}	[Mpa]	3.272	3.165	-3,3
ν_{xy}	[-]	0,43	0,31	-27,0

Tabla N° 5.103: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U55

5.5.9. PLACA U65

En la tabla N° 5.104 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa U65. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.709	1.460	-14,6
E_x	[Mpa]	7.744	7.904	2,1
E_y	[Mpa]	18.921	20.279	7,2
G_{xy}	[Mpa]	6.025	6.481	7,6
G_{xz}	[Mpa]	2.820	2.790	-1,1
G_{yz}	[Mpa]	3.273	3.277	0,1
ν_{xy}	[-]	0,26	0,18	-32,4

Tabla N° 5.104: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U65

5.5.10. PLACA U75

En la tabla N° 5.105 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa U75. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.721	1.452	-15,6
E_x	[Mpa]	8.436	7.848	-7,0
E_y	[Mpa]	25.634	28.119	9,7
G_{xy}	[Mpa]	4.193	4.840	15,4
G_{xz}	[Mpa]	2.792	2.777	-0,5
G_{yz}	[Mpa]	3.423	3.412	-0,3
ν_{xy}	[-]	0,15	0,12	-22,7

Tabla N° 5.105: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U75

5.5.11. PLACA U80

En la tabla N° 5.106 se muestran las constantes elásticas computacionales comparadas con las constantes elásticas experimentales de la placa U80. En amarillo las variables que cambian más de 40%.

PROP	UNIDAD	FEM	OPTIMIZ.	DIF. [%]
ρ	[kg/m ³]	1.740	1.395	-19,8
E_x	[Mpa]	8.931	7.542	-15,6
E_y	[Mpa]	28.708	39.330	37,0
G_{xy}	[Mpa]	3.525	3.822	8,4
G_{xz}	[Mpa]	2.846	2.810	-1,3
G_{yz}	[Mpa]	3.567	3.539	-0,8
ν_{xy}	[-]	0,11	0,07	-40,0

Tabla N° 5.106: Constantes elásticas Computacionales y experimentales de placa U80

6. DISCUSIONES Y COMENTARIOS

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos por cada placa experimentada.

6.1. PLACA VMM

La placa VMM corresponde al laminado de una barrera química típica en la industria. El velo C posee fibras del tipo C, con muy buena resistencia a la corrosión. El velo C y MAT 450 corresponden a refuerzos con fibras multidireccionales. El velo C y MAT 450 pueden absorber 10 veces su peso en resina y 2 veces su peso en resina correspondientemente.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que 5 modos se correlacionan en más de un 80%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 9%.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad aumentan entre 5 a 10% y que el módulo de corte principal disminuye muy considerablemente a más de un 20%.

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.2. PLACA MMM

La placa MMM está pensada para estudiar las constantes elásticas del MAT 450. Este refuerzo absorbe un 60% en peso de resina y no tiene muy buenas propiedades mecánicas. Laminados con solo MAT 450 se conocen como laminados manuales de tipo 1. Las fibras multidireccionales se pueden entender como un material isotrópico de 2 dimensiones.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que los 6 modos se correlacionan en más de un 80%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 2%. Estos resultados son los mejores esperables y los más confiables.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad aumentan entre 7 a 10%. Las otras constantes elásticas no tienen mayor diferencia, lo que valida las obtenidas con el programa TRILAM en gran medida.

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.3. PLACA TTT

La placa TTT está pensada para estudiar las constantes elásticas de la TELA 800. Este refuerzo absorbe un 50% en peso de resina y es el encargado de darle buenas propiedades mecánicas al laminado manual. Cuando se combinan refuerzos multidireccionales como el MAT 450 y fibras bidireccionales como la TELA 800 se llama laminado del tipo 2.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver 5 modos se correlacionan en más de un 80%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 2%.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad disminuyen entre 6 a 9% y que el módulo de corte principal aumenta muy considerablemente a más de un 40%. En el modelo matemático se consideró la máxima eficiencia para calcular los módulos de elasticidad transversal. Dado que se supuso 3 fibras unidireccionales orientadas en 0° , 90° y 0° ; suena razonable que disminuya el módulo de elasticidad en el eje x o 0° y casi el doble en el eje y o 90° .

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.4. PLACA MTM

La placa MTM corresponde al tejido más delgado por el método "Hand Lay Up". Combina 2 MAT 450 con una TELA 800. El MAT 450 absorbe resina por lo que otorga propiedades químicas, y la TELA 800 provee las propiedades mecánicas.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que los 6 modos se correlacionan en más de un 90%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 1%. Estos resultados son los mejores esperables y los más confiables.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad están cambiados entre el mayor y el menor. Esto se debe a que al momento de laminar la TELA 800, esta estaba rotada en 90°. La TELA 800 es un tejido cuasi-isotrópico, pero es difícil de distinguirlo con la vista. A pesar de esto, se observa que los módulos de elasticidad son menores que los calculados. El módulo de corte G_{xy} aumentó considerablemente sobre un 23%.

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.5. PLACA MTMTM

La placa MTMTM corresponde a otro tejido por el método "Hand Lay Up". Combina 3 MAT 450 con 2 TELA 800. El MAT 450 absorbe resina por lo que otorga propiedades químicas, y la TELA 800 provee las propiedades mecánicas.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que los 6 modos se correlacionan en más de un 97%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 2%. Estos resultados son los mejores esperables y los más confiables.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad están cambiados entre el mayor y el menor. Esto se debe a que al momento de laminar las TELAS 800, estas estaban rotadas en 90°. La TELA 800 es un tejido cuasi-isotrópico, pero es difícil de distinguirlo con la vista. A pesar de esto, se observa que los módulos de elasticidad son menores que los calculados. El módulo de corte G_{xy} aumentó considerablemente sobre un 31%.

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Pero debido a que su espesor no es tan pequeño, al momento de secado de la resina, esta no se curva considerablemente.

6.6. PLACA U0

Esta placa tiene el laminado más común y estudiado de todos. Las fibras unidireccionales en 0° de inclinación. Se utilizan 4 refuerzos de UNI 500 que corresponden a fibras unidireccionales.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que solo 2 modos se correlacionan en más de un 80%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 7%. Estos resultados son los peores encontrados. También es importante notar que esta placa con 4 refuerzos UNI 500 tiene el menor espesor de las 6 estudiadas.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad varían con respecto a los calculados. El módulo en sentido de las fibras es mayor que el calculado, lo que quiere decir que el módulo de elasticidad del UNI 500 es mayor a lo considerado. En cambio en el sentido transversal a las fibras disminuye, lo que indica que la eficiencia entre la fibra y resina es menor que la considerada.

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.7. PLACA U45

Esta placa tiene 4 UNI 500 en un espesor de aproximadamente 2 [mm]. El ángulo de 45° supone las mismas propiedades mecánicas en ambos ejes. Este refuerzo corresponde a fibras unidireccionales.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que los 6 modos se correlacionan en más de un 90%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 3%. Estos resultados son los mejores esperables y los más confiables.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad aumentan entre 9 a 17%. Esto quiere decir que el módulo de elasticidad del UNI 500 es mayor al considerado. La diferencia entre los módulos se puede deber a que el ángulo de tejido medido es 43° .

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.8. PLACA U55

Esta placa tiene 4 UNI 500 en un espesor de aproximadamente 2 [mm]. El ángulo de 55° supone el doble de propiedades mecánicas en el eje y o 90° que el eje x o 0°. Este refuerzo corresponde a fibras unidireccionales.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que los 6 modos se correlacionan en más de un 80%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 5%. Estos resultados son los mejores esperables y los más confiables.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad aumentan entre 12 a 17%. Esto quiere decir que el módulo de elasticidad del UNI 500 es mayor al considerado. La diferencia en proporción entre los módulos se puede deber a que el ángulo de tejido medido es 57°.

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.9. PLACA U65

Esta placa tiene 4 UNI 500 en un espesor de aproximadamente 2 [mm]. El ángulo de 65° supone mayores propiedades mecánicas en el eje y o 90° que el eje x o 0°. Este refuerzo corresponde a fibras unidireccionales.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que 5 modos se correlacionan en más de un 90%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 2%.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad aumentan entre 2 a 7%. Esto quiere decir que el módulo de elasticidad del UNI 500 es mayor al considerado. La diferencia en proporción entre los módulos se puede deber a que el ángulo de tejido medido es 67° .

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.10. PLACA U75

Esta placa tiene 4 UNI 500 en un espesor de aproximadamente 2 [mm]. El ángulo de 75° supone mayores propiedades mecánicas en el eje y o 90° que el eje x o 0° . Este refuerzo corresponde a fibras unidireccionales.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que los 6 modos se correlacionan en más de un 88%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 2%. Estos resultados son los mejores esperables y los más confiables.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad difieren de los calculados. El módulo del eje y o 90° aumenta un 10%, lo que podría estar en relación a las mejores propiedades del refuerzo UNI 500. El módulo del eje x o 0° en cambio disminuye un 7%. La diferencia en proporción entre los módulos se puede deber a que el ángulo de tejido medido es 77° y también que la eficiencia entre la fibra y resina puede ser menor a la considerada.

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.11. PLACA U80

Esta placa tiene 4 UNI 500 en un espesor de aproximadamente 2 [mm]. El ángulo de 80° supone mucho mayores propiedades mecánicas en el eje y o 90° que el eje x o 0° . Este refuerzo corresponde a fibras unidireccionales.

Al comparar la correlación de los primeros 6 modos, se puede ver que los 6 modos se correlacionan en más de un 88%. Además la diferencia en frecuencia de estos, no supera un 5%. Estos resultados son los mejores esperables y los más confiables.

De las constantes elásticas importantes, se puede decir que los módulos de elasticidad difieren enormemente de los calculados. El módulo del eje y o 90° aumenta un 37%. El módulo del eje x o 0° en cambio disminuye un 16%. La diferencia en proporción entre los módulos se puede deber a que el ángulo de tejido medido es 83° y también que la eficiencia entre la fibra y resina puede ser menor a la considerada.

Esta placa al ser fabricada por el proceso manual, presenta un espesor no uniforme. Además por su espesor pequeño, al momento de secado de la resina, esta se curva levemente.

6.12. GENERAL

De las placas VMM y MMM con fibras multidireccional se obtiene que los módulos de elasticidad son mayores que las entregadas por el programa TRILAM. Además se observa que el módulo de corte G_{xy} es menor en el caso de la placa VMM, pero se mantiene igual en la placa. Con los resultados de estas placas se puede concluir que el refuerzo MAT 450 tiene mejores propiedades que las calculadas y que el VELO C tiene más bajo módulo de corte que el calculado.

La placa TTT demuestra que las constantes elásticas calculadas son mayores que las reales. Dado que las constantes elásticas de la TELA 800 son menores y las del MAT 450 son mayores; suena razonable que las constantes elásticas calculadas de las placas MTM y MTMTM sean un poco menor que las reales.

Con respecto al refuerzo con UNI 500 se puede definir que tiene mayores propiedades mecánicas que las calculadas. Además se puede inferir que el módulo de elasticidad transversal de este refuerzo es menor que el calculado. En las 6 placas estudiadas se cumplen estas condiciones.

7. CONCLUSIONES

Se realizó el experimento modal con las 11 placas de PRFV y se obtuvieron las funciones de respuesta (FRF) en frecuencia de todas ellas. Con estas FRF se obtuvieron las frecuencias naturales y modos de vibración reales de cada placa.

Se calcularon las constantes elásticas y densidades de las 11 placas de PRFV con un modelo analítico. Estas propiedades se utilizaron para un análisis modal de elementos finitos y se obtuvieron las frecuencias naturales y modos de vibración computacionales.

Con el programa femtools se correlacionaron los primeros 6 modos de vibración, para finalmente optimizar los modos computacionales y obtener las constantes elásticas reales de cada placa.

Los resultados obtenidos tuvieron suficiente correlación como para decir que los modelos matemáticos utilizados funcionan para predecir las constantes elásticas. Debido a que el proceso es artesanal, nunca se podrá determinar en forma exacta las constantes elásticas, pero si lo suficiente como para diseñar elementos con PRFV con un factor de seguridad razonable.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.fibra.cl/>
- [2] <http://www.arteplastica.cl/> (Palatal A430)
- [3] <http://www.owencorning.cl/>
- [4] <http://www.matweb.com/> (E-Glass Fiber, C-Glass Fiber)
- [5] Apunte curso Elasticidad y Resistencia de Materiales II, Universidad Carlos III de Madrid
- [6] Elastic mechanical properties of fiber reinforced composite materials, 2011, Eva Kormanikova and Kamila Kotrasova.
- [7] Lamina Analysis - <http://abdmatrix.com/site/openrepository/files/Lamina%20Analysis.pdf>
- [8] TRILAM – Programa computacional comercial para predecir propiedades mecánicas de laminados compuestos.
- [9] Viviana Meruana, Dinámica Estructural, Apuntes para el curso ME706