

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

Diseño de una pasarela peatonal mediante solución híbrida con materiales compuestos

Autor: Francisco García Romero

Tutor: Javier Fernando Jiménez Alonso

Tutor ponente: Andrés Sáez Pérez

**Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras**
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Diseño de una pasarela peatonal mediante solución híbrida con materiales compuestos

Autor:

Francisco García Romero

Tutor:

Javier Fernando Jiménez Alonso

Profesor asociado

Tutor ponente:

Andrés Sáez Pérez

Catedrático de Universidad

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Trabajo Fin de Grado: Diseño de una pasarela peatonal mediante
solución híbrida con materiales compuestos

Autor: Francisco García Romero
Tutor: Javier Fernando Jiménez
Alonso

Tutor Andrés Sáez Pérez
Ponente:

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mi familia

*A la familia que
elegí*

*A mis compañeros
de carrera*

*A mis maestros y
profesores*

ÍNDICE

ÍNDICE	11
Agradecimientos.....	27
Introducción	28
Introducción al bloque.....	32
Definición: ¿Qué es un material compuesto?	33
Características generales de los materiales compuestos.....	34
Leyes de comportamiento en función de la micromecánica de los materiales.....	37
Materiales generalmente anisótropos	37
Materiales monoclinicos.....	38
Materiales Ortótropos	38
Materiales transversalmente isótropos.....	40
Componentes de los FRP	41
Resinas	41
Tipos de resinas	42
Refuerzos	44
Tipos de Refuerzos	44
Formas de presentación del refuerzo de un material compuesto	51
Núcleos y estructuras tipo sándwich	60
Espumas	60
Honeycombs.....	61
FRP en Construcción y Arquitectura.....	63
Puentes y pasarelas de FRP	66
Diseños Conceptuales de Puentes y Pasarelas en FRP	69
Teoría de laminados aplicada a materiales compuestos	70
Ecuaciones de Placa y Teoría de Laminados.....	70
Teoría Clásica o de Segundo Orden-Placa Delgada-Formulación de Kirchoff-Love	70
Teoría de Primer Orden-Placa Gruesa-Formulación de Reissner-Mindlin.....	71
Teoría de Laminados.....	72
Tipos de Laminados y Consecuencias en la matriz de Comportamiento	75
Métodos de Producción para Materiales Compuestos.....	76
Introducción.....	76

Clasificación de Métodos	76
Molde Abierto/Molde Cerrado	76
Métodos según grado de automatización	77
Métodos de Producción empleados en Ingeniería Civil	77
Hand lay-up	79
Prepregs	82
Resin Transfer Moulding (RTM)/Vacuum Assisted Resin Transfer (VARTM).....	86
Criterios de Fallo en Compuestos.....	89
Introducción.....	89
Clasificación de tipos de Criterios.....	89
Criterios de Fallo basados en el fin del comportamiento elástico lineal.....	91
Criterio de Máxima Deformación.....	92
Criterio de Máxima Tensión	93
Criterio de Tsai-Wu.....	93
Criterios de Fallo basados en la predicción de la rotura	96
Criterio de Puck	96
Introducción al bloque.....	101
Antecedentes.....	102
Renovación de la Conexión entre barrios del Centro Histórico	102
Conexión actual del barrio de Pescaderías y la Chanca con Plaza de Pavía	103
Conexión prevista mediante la ejecución del proyecto.	104
Análisis de alternativas	105
Alternativa 0: No actuación.....	105
Alternativa 1: Pasarela mixta con trazado recto.....	106
Alternativa 2: Pasarela híbrida con trazado recto	106
Alternativa 3: Pasarela mixta con trazado curvo	106
Alternativa 4: Pasarela híbrida con trazado curvo	107
Elección de trazado final.....	107
Justificación del trazado de la pasarela	107
Objetivos de proyecto.....	108
Condicionantes normativos	108
Posición de las Pilas	110

Consideraciones estructurales derivadas del trazado: la viga curva	112
Elección de Materiales.....	117
Introducción.....	117
Valores característicos.....	117
Resinas Epoxy HexPly M34 de HexCel	118
Fibra de Vidrio E-Epoxy 01543 1000 TF970:	119
Fibra de Carbono-AS4D.....	121
Núcleo de PET G-PET.....	122
Estructuración del mercado de compuestos.....	123
Cálculo de Propiedades de los materiales de Proyecto	125
Cálculo propiedades elásticas de materiales compuestos	126
Regla de mezclas directa (modelo de Reuss) e indirecta (Voigt)	127
Estimación del módulo elástico longitudinal	127
Estimación del módulo elástico transversal.....	127
Estimación módulos de Poisson	128
Estimación del módulo de Poisson mayor, ν_{12}	128
Estimación del módulo de Poisson menor, ν_{21}	128
Estimación del módulo de Poisson menor, ν_{23}	128
Estimación del módulo de cizalladura	129
Predicción simplificada del módulo de elasticidad con laminados apilados en distintas direcciones.....	129
Regla de Halpin-Tsai.....	130
Módulo elástico transversal	130
Módulo cizalladura G12	130
Cálculo de propiedades bajo suposición de micromecánica periódica.....	131
Cálculo de propiedades térmicas.....	131
Valores calculados	133
M34/AS4.....	133
M34/01543 1000 TF970	134
Selección del Proceso de Fabricación.....	137
Descripción del proceso constructivo	138
Introducción.....	138

Transporte.....	139
Cimbrado.....	139
Justificación de la sección transversal	141
Introducción.....	141
Sección en cajón en U	141
Diafragmas	143
Criterios de Diseño del Laminado.....	144
Criterios de aplicación general	144
Diseño de laminado propuesto.....	146
Laminado de las alas	148
Laminado de las almas	149
Laminado del fondo del cajón.....	150
Laminado de los diafragmas	151
Justificación del Modelo.....	152
Introducción.....	152
Software empleado.....	152
Modelado de la geometría.	154
Elementos a emplear. Discusión.....	157
Elementos Tipo Placa	157
Elementos de conexión entre losa y viga: pernos conectadores. Discusión	163
Elementos de conexión entre viga y pila: aparatos de apoyo	166
Elementos para modelado de pilas.....	167
Elementos para modelado de masa no estructural.....	170
Aparatos de apoyo.....	171
Introducción.....	171
Diseño de Aparatos de Apoyo	171
Esfuerzos de dimensionado	173
Losa de hormigón	175
Prelosa.....	175
Hormigón	176
Acero Pasivo.....	176
Criterios de Armado.....	176

Criterio de Wood Armer.....	178
Envolventes esfuerzos de Wood-Armer	180
Envolventes esfuerzos de cortantes y cortante de diseño	181
Pilas.....	182
Introducción.....	182
Dimensiones pila.....	182
Armado pila.....	182
Armado base de pila	182
Armado Longitudinal.....	182
Armado Transversal	183
Consideración de esbeltez. ELU Inestabilidad de soportes.....	183
Resumen de armado pilas.....	183
Envolventes esfuerzos de cálculo y esquemas de armado.....	184
Tuned Mass Damper (TMD)	185
Introducción.....	187
Diseño TMD según criterio de Den Hartog	187
Procedimiento selección de TMD	188
TMD elegido.....	191
Juntas.....	192
Retracción del hormigón.....	192
Fluencia del hormigón	193
Dilatación/contracción térmica	194
Junta elegida	195
Pernos	196
Introducción.....	196
Pavimento técnico	200
Introducción.....	200
Sistema Compo Concentrado 2002 de Composan	200
Barrera peatonal.....	¡Error! Marcador no definido.
Introducción.....	202
Criterios de Diseño.....	202
Diseño adoptado.....	203

Bases de Cálculo	206
Introducción.....	206
Marco Normativo de Aplicación	206
Cálculo de Acciones de Proyecto	207
Acciones Permanentes.....	207
Acciones Variables.....	208
Acción sísmica	225
Casos de carga y combinación de acciones	231
Factores de seguridad parciales.....	231
Combinación de Acciones	234
Comprobaciones realizadas.....	241
Comprobaciones resistentes: E.L.U. de Resistencia	241
Comprobaciones E.L.U. de Inestabilidad	247
Comprobaciones E.L.U./E.LS procedimiento constructivo	250
Comprobación E.L.S. Deformaciones	250
Comprobación para E.L.S de Vibraciones	252
Pruebas de carga.....	283
Introducción	283
Prueba de carga estática	283
Prueba de carga dinámica	284
Conclusiones.....	285
Desarrollos futuros	288
Bibliografía.....	290

Ilustración 1: Distintos niveles en los que el ingeniero debe tomar decisiones cuando se emplean los frp's. (Gómez Pulido, 2011).....	33
Ilustración 2: Representación esquemática de un material compuesto tipo sándwich.	33
Ilustración 3: Ejemplo de capacidad estética de los FRP (Kendall, 2014)	34
Ilustración 4: Ejemplo de diseño de orientación preferencial de fibras, anisotropía (Kendall, 2014).....	34
Ilustración 5: Ejemplificación Prefabricación. Puente de estación de tren de Dawlish (Kendall, 2014).....	34
Ilustración 6: Pasarela FRP siendo levantada con una retro (Kendall, 2014).....	34
Ilustración 7: Esquema conceptual de material anisótropo. Aunque las fuerzas aplicas P, Q, T tuvieran el mismo valor, en un material anisótropo para cada dirección existen unas propiedades distintas, con lo cual las mismas fuerzas producen efectos diferentes. (Barbero, 2008)	37
Ilustración 8: Esquema conceptual de material monoclínico (Barbero, 2008), en el que queda representado el único plano de simetría elástica presente en los mismos.....	38
Ilustración 9: Esquema conceptual de un material ortótropo, representando los tres planos de simetría elásticos. (Barbero, 2008)	39
Ilustración 10: Ejemplo de un compuesto cuya fibra de vidrio E está repartida de una manera aleatoria	40
Ilustración 11: Latas de Resina epoxy con dispensador para apilados manuales (hand-lay up) (Federal Aviation Administration, s.f.).....	41
Ilustración 12: Esquema con los distintos tipos de resinas y ejemplos de ambas	42
Ilustración 13: Gráfico de evolución de la resistencia a tracción y modulo elástico a tracción con el tiempo.....	43
Ilustración 14: Tabla con las propiedades de la fibra de carbono, extraídas de (HexCel, s.f.)	46
Ilustración 15: Esquema de proceso de producción de fibra de carbono (Friberg & Olsson, 2014)	46
Ilustración 16: Procesos de obtención de fibra de carbono. En función de la materia prima a partir de la cual se obtiene y del proceso realizado (y con ello la temperatura máxima que se alcance) se obtienen distintas rigideces/resistencias (Friberg & Olsson, 2014).....	47
Ilustración 17: Esquema de un filamento de aramida (izqda.) y de un tejido de aramida (drcha.) (Potyrala, 2011).....	47
Ilustración 18 : Gráfico en el que se muestran las resistencias específicas características de diversos materiales frente a las rigideces específicas de los mismos (Zoghi, 2011).	48
Ilustración 19: Módulos elásticos específicos en GPa (arriba izqda.). Imagen de distintos tejidos de fibras (de izqda. a derecha: vidrio, aramida, carbono) (arriba drcha.), comparativa del módulo elástico en GPa de distintos materiales (abajo, izqda.) comparativa tensiones resistentes últimas de tracción de distintos materiales (abajo, drcha.) (Friberg & Olsson, 2014)	48

Ilustración 20: (Friberg & Olsson, 2014).....	52
Ilustración 21: CSM de fibra de vidrio (Friberg & Olsson, 2014).....	53
Ilustración 22: CFM de fibra de vidrio (Friberg & Olsson, 2014).....	54
Ilustración 23: Woven Roving de fibra de vidrio (Friberg & Olsson, 2014).....	54
Ilustración 24: Plain weave (Friberg & Olsson, 2014)	56
Ilustración 25: Twill weave (Friberg and Olsson 2014)	56
Ilustración 26: Satin weave (Friberg and Olsson 2014)	56
Ilustración 27: UD weave (Friberg and Olsson 2014)	56
Ilustración 28: Ejemplos de tejidos comerciales (Federal Aviation Administration, s.f.)	57
Ilustración 29: Esquema de un tejido no crimpado (Non-Crimp Fabrics) (Friberg & Olsson, 2014).....	58
Ilustración 30: Velo de superficie, cortesía de CHM Composites	59
Ilustración 31: Estructura tipo sándwich, esquema conceptual (Federal Aviation Administration, s.f.)	60
Ilustración 32: Ejemplos de espumas (foam) comerciales basados en distintos plásticos	61
Ilustración 33: Analogía entre viga en I y honeycomb (HexCel, s.f.)	61
Ilustración 34: Tipos de honeycombs en función de la forma de la retícula (Federal Aviation Administration, s.f.).....	61
Ilustración 35: Esquema conceptual de los diferentes tipos de honeycombs, de izquierda a derecha: hexagonal, overexpanded, flexicore	62
Ilustración 36: Esquema conceptual de los diferentes tipos de honeycombs, en disposición 3-D	62
Ilustración 37: Redondos y estribos de fibra de vidrio y fibra de carbono (izqda.). Mallazo de fibra de vidrio y fibra de carbono (drcha.). Colocación de mallazo de fibra de vidrio en obra, siendo hormigonado (Bank, 2006).....	64
Ilustración 38: Tendones de pretensado de FRP nipones (izqda.). Colocación de encofrados para el tablero de un puente (superior drcha.) y pilotes de FRP (inferior drcha.).....	65
Ilustración 39: Distintos usos de FRP en refuerzo en forjados, muros, vigas y pilas	65
Ilustración 40: Arriba Izqda.: Primera pasarela all-composite (ACCS) en Aberfeldy (Escocia). Arriba drcha. : Esquema estructural del puente de la autovía del Cantábrico, primer puente carretero en FRP de Europa. (Acciona) Abajo, empleo de placa-arco de CFRP en el Royal Bridge (Auburn, Maine. Empresa AIT Bridges)	66
Ilustración 41: Tendencia en la construcción de puentes FRP a nivel mundial (Zoghi, 2011).....	67
Ilustración 42: Puentes carreteras y pasarelas en FRP en España en orden cronológico de construcción. Las mismas han sido seleccionadas de la lista existente en el que se recogen 355 pasarelas a nivel mundial de (Potyrala, 2011)	68

Ilustración 43: Diversos diseños conceptuales de puentes singulares de grandes luces en FRP propuestos por diversos autores. Arco rebajado y Arco Alto de (Kendall, 2014)	
Pasarela súper esbelta "origami" (Smits, 2014)	69
Ilustración 44: Principios de la Teoría Clásica de Placas (Oñate, 2011)	70
Ilustración 45: Conceptos asociados a la teoría de Reissner-Mindlin (Barbero, 2008) (Oñate, 2011).....	71
Ilustración 46: Esfuerzos de una placa (Barbero, 2008).....	72
Ilustración 47: Definición de la matriz de comportamiento de una lámina simétrica (Oñate, 2011).....	72
Ilustración 48: Empleado de una bolsa de vacío para la elaboración de piezas pequeñas, cortesía de West System Epoxy	86
Ilustración 49: Esquema del sistema VARTM (Friberg & Olsson, 2014).....	89
Ilustración 50: Sección transversal de la superficie de fallo de Puck (París, et al., 2012)	97
Ilustración 51: "Cigarrillo de Fractura de Puck". Representación del criterio bidimensional (Vallecillos Portillo, 2015)	99
Ilustración 52: Esquema de situación de la pasarela en Avda. del Mar, en los terrenos anexos al IES Galileo desde 1 (encuadre con la pasarela proyectada) hasta 5 (encuadre nacional)	102
Ilustración 53: Actual pasarela que conecta los barrios de Pescaderías con la Plaza Pavía.....	103
Ilustración 54: Callejero de Almería en el que quedan emplazados los puntos de interés que se buscan poner en valor: los terrenos en desuso sitos en Avda. del Mar, anexos al IES Galileo, el barrio deprimido de la Chanca y la Plaza de Pavía. Esta puesta en valor busca mejorar las zonas anexas a la Alcazaba (noreste).....	103
Ilustración 55: Esquema de la renovación de la zona, con la pasarela conectando ambas plazas (la de pavía y la de nueva construcción)	104
Ilustración 56: Esquema del alzado (desarrollado) de la pasarela sita en Avda. del mar, Almería.....	108
Ilustración 57: Esquema del posicionado de las pilas	110
Ilustración 58: Esquema de la obtención de los esfuerzos de un elemento diferencial prismático de planta curva. Fuente (Margalet De Zabalo s.f.).....	112
Ilustración 59: Explicación de la aparición de resultante no nula que genera el momento torsor ante solicitudes flectoras. (Margalet De Zabalo, 2008)	114
Ilustración 60: Explicación de carga torsora inducida por el trazado curvo. La zona rayada posee un mayor área que la que no se encuentra rayada (al ser mayor el radio de la curva). Esto hace que no se compensen los momentos con respecto al centro y aparezca un torsor.....	115
Ilustración 61: distintos módulos de Poisson en un ortótropo	128
Ilustración 62: Aproximación en la que se basa el PMMI (Barbero, 2008)	131

Ilustración 63: Valores propios de los coeficientes de dilatación de materiales convencionales empleados en construcción (Ministerio de Fomento-Dirección General de Carreteras, 2011)	132
Ilustración 64: Esquema de aplicación de bolsa de vacío	137
Ilustración 65: Esquema RTM	137
Ilustración 66: Fases principales de la construcción de un puente o pasarela en FRP (Primi & Paulotto, 2011).....	138
Ilustración 67: Zonas en las que se colocarán las uniones remachadas entre dovelas, de acuerdo a que presentan momento nulo	139
Ilustración 68: Esquema de la organización del transporte a obra.....	140
Ilustración 69: Esquema de la sección transversal de la pasarela, con las distancias y los puntos de diseño explicitados anteriormente	142
Ilustración 70: Panorámica del modelo en elementos finitos (3D) realizado mediante el software comercial ANSYS16.....	152
Ilustración 71: Definición del Triedro de Frenet	154
Ilustración 72: Esquema del proceso seguido para el modelado de la geometría de la estructura	154
Ilustración 73: Sistemas de Coordenadas Locales creados para la creación de la geometría y mallado de elementos.....	155
Ilustración 74 Líneas que constituyen la geometría del modelo	156
Ilustración 75: Áreas que constituyen la geometría del modelo	156
Ilustración 76: Mallado losa, visión 3-D.....	161
Ilustración 77: Visión 3-D de la discretización de la losa.....	161
Ilustración 78: Mallado de la viga de compuesto, con detalle al diafragma.....	162
Ilustración 79: Mallado de la viga.....	162
Ilustración 80: Detalle modelado de los pernos con BEAM188	163
Ilustración 81: Ejemplo de simplificación de curva carga desplazamiento para pernos conectores (Titoum, et al., 2008)	164
Ilustración 82: Modelado de los pernos conectores	165
Ilustración 83: Detalle del modelado de los pernos conectores. En él se puede observar el "gap" existente entre ala de compuesto losa y conectores.....	165
Ilustración 84: Detalle de la conexión mediante un "elastic link", un elemento COMBIN14	166
Ilustración 85: El elemento elegido para la modelización de aparatos de apoyo es el COMBIN14	166
Ilustración 86: Detalle del COMBIN14 empleado para el modelado de aparatos de apoyo	167
Ilustración 87: Posición y modelado de las pilas en ANSYS.....	168
Ilustración 88: Detalle de modelado de las pilas.....	169
Ilustración 89: Distribución de las masas en los Keypoints de la losa.....	170

Ilustración 90: Esquema del apoyo elastomérico tipo A según (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1982)	172
Ilustración 91: Detalles de los aparatos de apoyo empleados.....	174
Ilustración 92: Prelosa colaborante de la empresa Tecnyconta, elegida para el proyecto (Tecnyconta, 2015)	175
Ilustración 93: Esquema del procedimiento seguido para el cálculo del armado de la losa.....	177
Ilustración 94: Dirección de las armaduras, de definición de los esfuerzos y ángulo de desfase entre ambos, alfa. (Salete Casino, 2007)	178
Ilustración 95: Esquema del cálculo del ancho eficaz a cortante para secciones no rectangulares aplicado a nuestro caso	183
Ilustración 96: Esquema del procedimiento para el cálculo del TMD de acuerdo a la teoría del profesor Den Hartog (Jiménez Alonso & Sáez Pérez, 2015)	187
Ilustración 97: Diagrama de flujo con los que pasos especificados en (Heinemeyer, et al., 2009) para el diseño ante vibraciones para puentes y pasarelas ligeros.....	190
Ilustración 98: Esquema del TMD de acción vertical de la casa Maurer Söhne, y selección de las dimensiones de acuerdo a lo previsto en el catálogo de Maurer.....	191
Ilustración 99: Esquema de Junta JNA, según catálogo de (Composán, 2010).....	192
Ilustración 100: Catálogo de Juntas de Neopreno Armado	195
Ilustración 101: Criterios de dimensionado del perno según RPX-95.....	197
Ilustración 102: Cortante Vx para la combinación más desfavorable. Unidades en Pa	198
Ilustración 103: Cortante Vx para la combinación más desfavorable. Unidades en Pa	198
Ilustración 104: Detalle en 3-D del Sistema CompoConcentrado2002 de Composán (Composan, 2011)	200
Ilustración 105: Gama de colores ofertada por Composán para el Sistema CompoCincntrado2002.....	200
Ilustración 106: Ficha del CompoConcentrado2002	201
Ilustración 107: Detalle del sistema CompoConcetrado2002 (Composan, 2011)	201
<i>Ilustración 108: Vista de alzado y lateral de la sección, con detalle y acotación de la barrera (en el esquema, aparecen las dos secciones que adopta la barrera: aquella entre diafragmas y la propia del diafragma).....</i>	203
Ilustración 109: Detalle en 3-D del diseño propuesto para la barrera.....	203
Ilustración 110: Sección por diafragma	204
Ilustración 111: Sección entre diafragmas	205
Ilustración 112: Ejemplificación de cómo reparte la carga térmica entre nodos en función del input usado. (ANSYS Inc., 2014)	224
Ilustración 113: AXIL N11 (en Pa)	241
Ilustración 114:AxilN22 en Pa.....	242
Ilustración 115: Axil N12 en Pa.....	242

Ilustración 116: Q13	243
Ilustración 117: Q23	243
Ilustración 118: M11 en Pa.....	244
Ilustración 119 M22 en Pa.....	244
Ilustración 120: M12 en Pa.....	245
Ilustración 121: Vista general de la deformada (valor máximo: 0.019689m).....	251
Ilustración 122: Mapa de colores de la resultante de desplazamientos, valor máximo para el valor frecuente de la sobrecarga de uso: 0.019689m.....	252
Ilustración 123: Valores de rango crítico de frecuencias, previsto en (Heinemeyer, et al., 2009)	253
Ilustración 124: Grado de Confort previstos en la IAP-11.....	254
Ilustración 125:Valores de rango crítico de confort, previsto en (Heinemeyer, et al., 2009).....	254
<i>Ilustración 126: Metodología de diseño ante solicitud dinámica. Cortesía de (Heinemeyer, et al., 2009)</i>	255
Ilustración 127: Visión en conjunto de los modos de vibración de la estructura,	257
<i>Ilustración 128: Modo de vibración (vertical) para la primera frecuencia natural (1.26Hz)</i>	258
Ilustración 129: Modo de vibración (vertical) para la segunda frecuencia natural (1.58Hz).....	258
Ilustración 130: Modo de vibración (horizontal) para la tercera frecuencia natural (2.34Hz).....	259
Ilustración 131: Modo de vibración (vertical) para la cuarta frecuencia natural (2.61Hz)	259
Ilustración 132: Modo de vibración (torsional) para la quinta frecuencia natural (4.08Hz).....	260
Ilustración 133: Modo de vibración (torsional) para la sexta frecuencia natural (5.64Hz)	260
Ilustración 134: Modo de vibración (vertical) para la séptima frecuencia natural (6.17Hz).....	261
Ilustración 135: Modo de vibración (vertical) para la octava frecuencia natural (6.975Hz).....	261
Ilustración 136: Modo de vibración (torsional) para la novena frecuencia natural (8.68Hz).....	262
Ilustración 137: Modo de vibración (vertical) para la décima frecuencia natural (10.06Hz).....	262
Ilustración 138: Clases de tráfico peatonal especificadas en (Heinemeyer, et al., 2009)	263
Ilustración 139: Clases de confort para los peatones especificadas en (Heinemeyer, et al., 2009)	264

Ilustración 140: Situaciones de tráfico consideradas aproximativamente como características en el diseño dinámico de pasarelas, de acuerdo a (Heinemeyer, et al., 2009).....	264
Ilustración 141: Valores propios de coeficientes de amortiguamiento mínimo y medios para materiales convencionales, recogida en (Heinemeyer, et al., 2009)	266
Ilustración 142: Evolución de la aceleración (dirección X) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección X) para el caso de tráfico considerado (TC1-A)	269
Ilustración 143: Mapa de aceleraciones (dirección X) para el caso de tráfico TC1-A ..	269
Ilustración 144: Evolución de la aceleración (dirección Y) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Y) para el caso de tráfico considerado (TC1-A)	270
Ilustración 145: Evolución de la aceleración (dirección Z) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Z) para el caso de tráfico considerado (TC1-B)	270
Ilustración 146: Evolución de la aceleración (dirección X) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección X) para el caso de tráfico considerado (TC5)	271
Ilustración 147: Mapa de aceleraciones (dirección X) para el caso de tráfico TC5. Tiempo=1seg	272
Ilustración 148: Evolución de la aceleración (dirección Y) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Y) para el caso de tráfico considerado (TC1-B)	272
Ilustración 149: Mapa de aceleraciones a los 10.2 segundos en la dirección Z para la clase de tráfico TC1-B	274
Ilustración 150: Evolución de la aceleración (dirección X) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección X) para el caso de tráfico considerado (TC5)	275
Ilustración 151: Mapa de aceleraciones (dirección X) para el caso de tráfico TC5. Tiempo=1seg	276
Ilustración 152: Evolución de la aceleración (dirección Y) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Y) para el caso de tráfico considerado (TC1-B)	276
Ilustración 153: Evolución de la aceleración (dirección Z) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Z) para el caso de tráfico considerado (TC5)	277
Ilustración 154: Evolución de la aceleración (dirección X) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección X) para el caso de tráfico considerado (TC5)	278
Ilustración 155: Mapa de aceleraciones (dirección X) para el caso de tráfico TC5. Tiempo=1seg	279
Ilustración 156: Evolución de la aceleración (dirección Y) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Y) para el caso de tráfico considerado (TC1-B)	279

Ilustración 157: Evolución de la aceleración (dirección Z) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Z) para el caso de tráfico considerado (TC5)	281
Ilustración 158: Mapa de aceleraciones (dirección Z) para el caso de tráfico TC5.	
Tiempo=0.5seg	281
Ilustración 159: Diagrada de flujo de estudios dinámico	282
Ilustración 160: Botellas de agua y piscinas infantiles llenas de agua como prueba de carga en pasarelas peatonales.	283
Ilustración 161 Deformada ante la prueba de carga.....	283
Ilustración 162: Mapa de colores de la deformada en Prueba de carga	284

Agradecimientos

Tras las horas de trabajo, los cafés, las risas nerviosas y chascarrillos propios de las noches previas a entrega, tras los exámenes, las excursiones y tras muchas más cosas que probablemente habrá experimentado cualquiera que lea este trabajo como universitaria en general y estudiante de ingeniería en particular, a uno solo le queda volver la vista atrás y rememorar quién estuvo ahí. En las buenas y en las mejores, pues la memoria por sí misma tinta los malos momentos como experiencias que evocar con una sonrisa.

En mi humilde caso, esas personas tienen, como casi siempre, nombres y apellidos. Nada de esto hubiera sido posible sin mi familia, sin mis padres y mi hermano, (aparatos de) apoyo, sin mis amigos de toda la vida (desde el colegio hasta el instituto) y a mis compañeros de Universidad, mujeres y hombres ardidos en mil batallas (exámenes) de los que he aprendido más de lo que yo les pudiera enseñar. En especial, quiero resaltar mis compañeros de casi todos los trabajos habidos y por haber en la ESI: a Luis Blanes y a José Carlos Hartillo, por estar siempre ahí aun cuando no era necesario.

Ahora, siendo ya específicos con la redacción de este Trabajo Fin de Grado, no puedo dejar de acordarme y dedicarlo muy en especial por todo el esfuerzo que conmigo han hecho mis dos tutores: Javier Fernando Jiménez Alonso y Andrés Sáez Pérez.

Del primero no puedo más que agradecerle todas las mañanas, tardes (y llamada nocturna) que ha pasado conmigo en su estudio, enseñándome y adentrándome en este mundo de puentes y pasarelas, tratándome siempre de igual. Tanto es así, que creo no me creerían si les cuento el compañerismo que me ha demostrado. Me llevo un tutor y un amigo, (solo espero que él confirme la parte de amistad que le toca)

De Andrés destaco siempre su confianza, cordialidad, saber hacer, sus buenos consejos siempre acertados y el tiempo que siempre me ha dedicado que sé, vale su peso en oro.

No todo el mundo puede tener la suerte de haber estado tan a gusto con su tutor. Yo puedo decir que lo estuve con los dos. Si esto hubiera sido una guerra (y parte de ella ha tenido, pues no ha sido poco el esfuerzo) hubiera tenido en Andrés el mejor comandante y en Javi el mejor compañero de trinchera.

Paco García Romero, D.C.

Introducción

El presente Trabajo Fin de Grado que se expone a continuación constituye un proyecto a medio camino entre lo académico y lo profesional, teniendo siempre en cuenta el ámbito educativo y de formación en el que se encuentra el autor. Sin embargo, ese fue siempre el objetivo que se persiguió desde el primer momento con su elección: el de aplicar técnicas y materiales no convencionales en proyectos cercano a la realidad, reivindicando el papel investigador e innovador de la Universidad como vehículo de desarrollo y creatividad sin por ello desdeñar el carácter formador propio de profesionales técnicos que imprime el hecho de estudiar en una Escuela de Ingenieros. Servidor invita humildemente al lector a que juzgue el grado en que ambos objetivos han cristalizado en este documento.

Desde el punto de vista de motivación en cuanto a su desarrollo, este Trabajo parte de la necesidad de evaluar el comportamiento estructural de los materiales compuestos en general y de los compuestos de fibra de vidrio y de carbono en particular. Esta consideración entraña con multitud de estudios y artículos que aparecen con recurrencia en diversas publicaciones y congresos que buscan adaptar diseños ya existentes al empleo de estos materiales o realizar estudios de sensibilidad sobre su posible implementación. Existen muchísimos ejemplos de ello (véase por ejemplo, el artículo (van Ijselmuiden, 2014)

De esta manera, el empleo de materiales compuestos en ingeniería de puentes y de pasarelas es un foco de estudio que ha sido llevado a la realidad en un número nada despreciable de veces (en (Potyrala, 2011) existe un recuento de 355 puentes y pasarelas en las que el compuesto ha sido empleado en diferentes formas y ejerciendo diversas funciones estructurales).

Siguiendo esta tendencia, dentro del campo de los objetivos a cumplir con este TFG, se presentó la posibilidad de realizar una alternativa en material compuesto para un trabajo a nivel de anteproyecto de una pasarela mixta (acero-hormigón) situada en la Avda. del Mar, Almería presentado por uno de los tutores de este proyecto, D. Javier Fernando Jiménez Alonso. De esta manera, se trabajó con un trazado de pasarela aprobado por la Gerencia de Urbanismo, realizando un estudio de las implicaciones técnicas, así como de los pros y contras derivados del empleo de estos materiales.

De acuerdo a lo propuesto, el proyecto se basa en el diseño de una pasarela híbrida (viga de material compuesto y losa superior de hormigón armado) y de los elementos estructurales asociada a la misma. En ese sentido, se ha buscado realizar un proyecto de aplicación práctica, en el que se han empleado materiales de productos frecuentes en el mercado, y de profundidad equilibrada, realizándose dimensionados en función a criterios de diseño marcados por las normativas y los criterios de

fabricantes. De esta manera, el empleo de material compuesto constituye el eje vertebrador del trabajo por ser el material principal de la pasarela, pero no por ello se descuidan los otros elementos, pues se considera representativo el realizar un estudio holístico, ecléctico, que sirva al lector como un marco de comparación interesante para lo ya conocido en el uso de materiales convencionales y sirva al autor para adentrarse en el mundo del diseño y de la toma de decisiones (muchas de ellas de compromiso) que ello implica.

Además, el empleo de nuevos materiales supone, aparte de un reto, un interesante ejercicio de introspección con respecto a lo aprendido y aplicado para otros materiales, ya que nos obliga a profundizar en los conceptos aplicados en los convencionales y adaptarlos con las servidumbres correspondientes a los compuestos, dado la escasez de normativa al amparo del diseño.

Desde un punto de vista organizativo, el trabajo se divide en dos partes claramente diferenciadas cuya existencia y orden evidencia el trabajo realizado: una primera parte, el Bloque 1, en el que se realiza una breve revisión de las propiedades y características intrínsecas de los materiales compuestos, con especial atención a su aplicación en Ingeniería Civil y Estructural en general y a su empleo en puentes y pasarelas en particular; y un Bloque 2 en el que se explicitan los estudios y análisis de diseño llevados a cabo para el dimensionado de la pasarela propuesta como solución.

Sobre el Bloque 1 explicitar que en ningún momento se buscó crear unos apuntes o un libro de materiales compuestos, existiendo libros de mayor calado y enjundia a los que el autor insta a su consulta en base a las numerosas referencias que de los mismos que representa, quedando el bloque como una mínima expresión de los mismos, más conceptual y cualitativa que cuantitativa.

En base al diseño propuesto y que ocupa el Bloque 2, el material compuesto se presenta como una solución competitiva dado que la ligereza y gran capacidad mecánica del mismo, así como sus buenas condiciones de durabilidad lo hacen idóneo. Asimismo, a la vista de dicha solución, se concibe la misma como estructura singular por su forma y desarrollo y dimensiones, lo cual aporta un grado mayor de compresión y dificultad al proyecto, pero entraña con la estética propia de las pasarelas a las que se les exige un valor monumental por sí mismas.

De esta manera, la pasarela propuesta consiste en una viga continua de cuatro vanos y tres pilas, de trazado en espiral a la subida en su primer tramo y recto en su tramo final, siendo la luz que se salva 19 m y el trazado total en desarrollo de 60 m, quedando marcada la distancia entre las dos primeras pilas por la Avda. del Mar y el último por las necesidades de flecha. De la misma forma, la forma curva de la pila implica teóricamente (lo cual se demuestra en el cálculo) la aparición de grandes torsiones, a las cuales se debe atender.

En cuanto al desarrollo del trabajo, se ha buscado que el mismo sea auto contenido, poniéndose al alcance del lector los criterios, fórmulas, datos de catálogo y fichas de fabricantes que se han empleado, para hacerle partícipe de primera mano de las decisiones adoptadas. Servidor humildemente le propone tenga a bien leer, ojear o consultar todo aquello que considere oportuno, que le sea útil y que sepa apreciar el cariño con que se ha realizado el trabajo que se expone a continuación.

Bloque 1: Materiales Compuestos en Ingeniería Civil

Introducción al bloque

Este bloque trata de realizar un resumen sintético pero que muestre una visión panorámica y autosuficiente de los materiales compuestos, sus principales características y los pros y contras acerca de su empleo en el mundo de la ingeniería civil y la arquitectura en general y como material de uso en pasarelas peatonales similares a la que es objeto de nuestro proyecto en particular.

Definición: ¿Qué es un material compuesto?

En sentido amplio, se denomina material compuesto a todo aquel material formado por “la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfaces de separación entre ellos para forma un nuevo material” (París, et al., 2012). Generalmente, son muchos los autores que a esta definición añaden como consideración *sine qua non* el hecho que son materiales artificiales (Barbero Pozuelo, et al., 2010). Esta deferencia se hace dado que es cierto son muchos los materiales presentes en la naturaleza que presentan una estructura similar (tejidos musculares, madera, bambú, etc.)

El objetivo último y la razón de ser de los *composites* no es otra que la elaboración de nuevos materiales que posean mejores características conjuntamente que las de sus componentes por separado. De esta manera podríamos concluir que la aparición de los materiales compuestos no deja de ser una revisión, desde la micromecánica a la macromecánica, de la célebre cita de Aristóteles:

“un todo es más que la suma de sus partes”

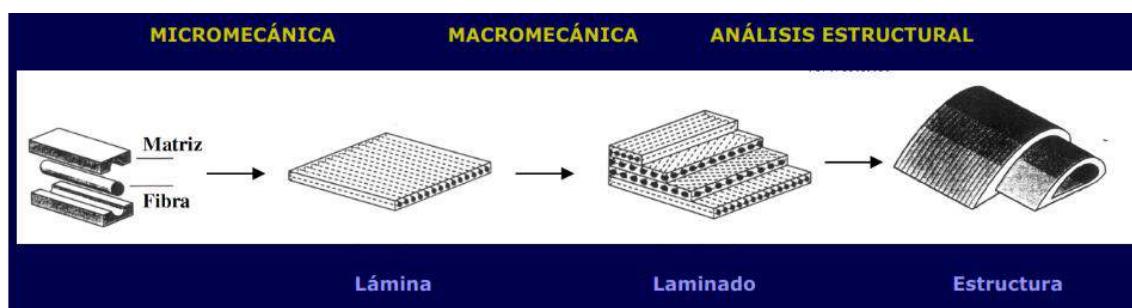


Ilustración 1: Distintos niveles en los que el ingeniero debe tomar decisiones cuando se emplean los frp's. (Gómez Pulido, 2011)

Actualmente el término de material compuesto ha adquirido en español la designación propia que en inglés ha venido refiriéndose como “composite material” y que ahora se viene a preferir como “fiber reinforced polymer” (también conocido por su acrónimo *frp* o por el español polímeros reforzados con fibras, plásticos reforzados). De esta manera, podemos afirmar que cuando hablamos de material compuesto nos referimos, en sentido estricto, a la aglomeración de una serie de fibras de refuerzo por parte de una matriz polimérica (*fiber reinforced polymer*).

De esta manera, quedan claramente definidas las dos entidades que componen un material compuesto: unos

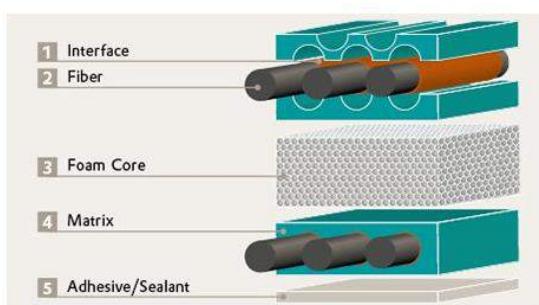


Ilustración 2: Representación esquemática de un material compuesto tipo sándwich.

refuerzos longitudinales encargados de aportar tanto rigidez como resistencia en la dirección en la que se disponen y una matriz que permite que estos refuerzos se comporte de una manera congruente y en bloque, que los protege y que aporta rigidez en la dirección perpendicular a aquella en la que se disponen los refuerzos longitudinales. En posteriores apartados profundizaremos tanto en la función de refuerzo y matriz así como en los posibles materiales candidatos a ejercer dichas funciones, de acuerdo a la ciencia y la técnica disponibles.

Características generales de los materiales compuestos

De acuerdo a lo visto en el apartado anterior, podemos afirmar que hay tantos materiales compuestos como situaciones posibles conciben los ingenieros para su empleo. Sin embargo, dado que su aparición y su desarrollo mayor y primigenio tuvo lugar en el campo de la aeronáutica, las características que los aglutinan suelen ser las excelentes propiedades por unidad de peso o propiedades específicas.

Si bien es cierto que existe una gran variabilidad entre las diferentes disposiciones de elementos para fibra y matriz, existen una serie de propiedades generales que se les pueden atribuir a los materiales compuestos (Friberg & Olsson, 2014) (Kendall, 2014):

- Las propiedades del compuesto son mezcla de las propiedades de fibra y matriz
- Posibilidad de conformar piezas de forma complicada, con la capacidad estética que eso conlleva
- Baja densidad
- Anisotropía dirigida a optimizar el material a las tensiones principales a las que está sometido
- Propiedades mecánicas relativamente buenas
- Buena resistencia a la corrosión y a la oxidación

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS FRP



Ilustración 3: Ejemplo de capacidad estética de los FRP (Kendall, 2014)

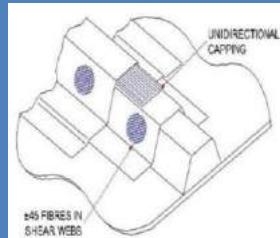


Ilustración 4: Ejemplo de diseño de orientación preferencial de fibras, anisotropía (Kendall, 2014)



Ilustración 5: Ejemplificación Prefabricación. Puente de estación de tren de Dawlish (Kendall, 2014)



Ilustración 6: Pasarela FRP siendo levantada con una retro (Kendall, 2014)

VENTAJAS EN EL USO DE COMPUESTOS

Tabla 1: Ventajas en el uso de FRP (Friberg & Olsson, 2014)

Propiedades Mecánicas	Propiedades de Diseño	Coste	Métodos de Producción	Construcción e instalación	Durabilidad	Sostenibilidad
Excelente resistencia específica	Grandes posibilidades estéticas de acuerdo a facilidad de formas	Menores costes del ciclo de vida completo y de mantenimiento	Posibilidad de producción masiva	Sencilla y más segura, necesitada de menor maquinaria y más barata debido al bajo peso	Buena durabilidad y mayor tiempo de servicio	Baja huella de carbono con respecto a otros materiales (no se tiene en cuenta la fibra de carbono)
Buena rigidez	Eficiencia estructural al colocar las fibras en la dirección de la tensión principal	Menores costes por maquinaria de colocación y cierre de vías de tráfico anexos	Son posibles grandes piezas de forma compleja	Menor tamaño y coste de la subestructura asociada	Resistencia ante ataques químicos y ante las sales de deshielo	Menor gasto de energía en el transporte
Alta resistencia a la tracción	Baja densidad	Pese a que son altos, los precios son cada vez más competitivos		Construcción no tan limitada por el tiempo atmosférico	Resistencia ante la degradación atmosférica	El GFRP exige menos consumo de energía que aluminio y acero
Alta resistencia al impacto (absorción de energía)	Bajo coeficiente de expansión térmica , incluyéndose la posibilidad de CTE=0	Menores costes de reparación, comparadas con la estructura metálica		Menores costes sociales debido a reducción de tiempo de cierre del tráfico	Mayor resistencia ante inundaciones y terremotos	Menor producción de residuos.
Buen comportamiento a fatiga y a carga sísmica	Permeable a ondas electromagnéticas					
Buenas propiedades de amortiguamiento						

DESVENTAJAS EN EL USO DE FRP

Tabla 2: Desventajas en el uso de FRP (Friberg & Olsson, 2014)

Propiedades Mecánicas	Propiedades de Diseño	Coste	Métodos de Producción	Durabilidad	Sostenibilidad
Baja resistencia a cortante comparada con la resistencia a tracción	Faltas de códigos a nivel internacional	Alto coste inicial y unitario	No existen métodos estandarizados	Posibles problemas con uniones en campo	Ante quemado, emite gases tóxicos (CO2 y CO)
Baja rigidez del compuesto de fibra de vidrio	El diseño suele estar determinado por las deformaciones, debido a la baja rigidez de algunos FRP (GFRP)	Materias primas de coste elevado	Problemas en caso de curado no satisfactorios	Delaminaciones y roturas en la superficie	Algunos provienen de combustibles fósiles
Susceptible de creep	Necesidad de grandes secciones debido a baja rigidez (sobre todo GFRP)	Pese a que son altos, los precios son cada vez más competitivos		Falta de datos del comportamiento a largo plazo	Las matrices termoestables son no reciclables
Reblandecimiento debido a fatiga	Necesidad casi manifiesta del empleo del MEF debido a la gran cantidad de láminas que entran en juego	Menores costes de reparación, comparadas con la estructura metálica		Algunos tipos de fibra de vidrio se pueden atacar ante álcalis	Se necesitan altas temperaturas y se emiten gases durante la manufactura de fibras
Falta de información en cuanto a la fatiga de las conexiones (remachadas y/o adhesivas)	Es necesario comprobar distintas direcciones de fallo en torno a las conexiones debido a la anisotropía			Susceptible a radiación ultravioleta y a la humedad en el caso de algunas resinas	Un 50% más de consumo de energía con respecto al uso de madera
Comportamiento frágil, con la falta de comportamiento de aviso que ello implica	Experiencia limitada en ingeniería civil			Combustible	La fibra de carbono es difícil de justificar desde su punto de vista de impacto ambiental

Leyes de comportamiento en función de la micromecánica de los materiales

De acuerdo a la disposición propia de las fibras en un material en este se puede llegar a formar diferentes planos de simetría elástica. En función de los planos de simetría que se formen, se podrán inducir distintas leyes de comportamiento que se muestran a continuación. Se han tomado como textos de referencia (París, 2000) y (Kollár & Springer, 2003)

Materiales generalmente anisótropos

En un material generalmente anisótropo, no existen, por definición planos de simetría elástica. Esto es lo que sucede, por ejemplo, cuando las fibras se alinean en tres direcciones no ortogonales entre sí (Kollár & Springer, 2003).

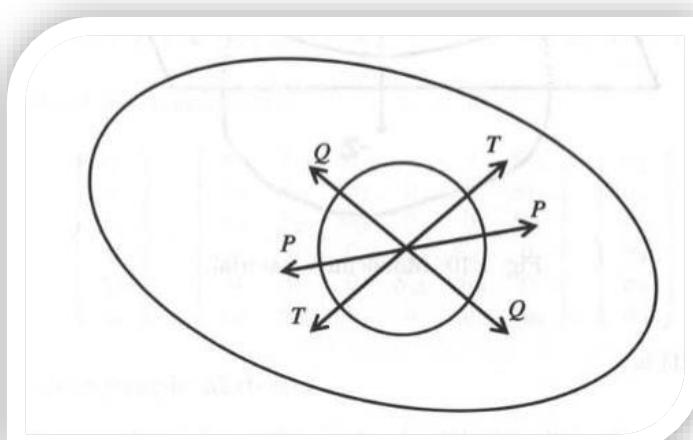


Ilustración 7: Esquema conceptual de material anisótropo. Aunque las fuerzas aplicas P , Q , T tuvieran el mismo valor, en un material anisótropo para cada dirección existen unas propiedades distintas, con lo cual las mismas fuerzas producen efectos diferentes. (Barbero, 2008)

Esto se traduce en que la matriz de comportamiento es una matriz 6x6 completa:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix}$$

Materiales monoclinicos

En el caso de que exista un plano de simetría con respecto a la disposición de las fibras, podemos decir que el material se define como monoclinico. La existencia de este plano de simetría elástica se traduce físicamente en el desacoplamiento entre la aplicación de una tensión normal y la aparición de una tensión tangencial fuera del plano en el que se aplica la tensión longitudinal

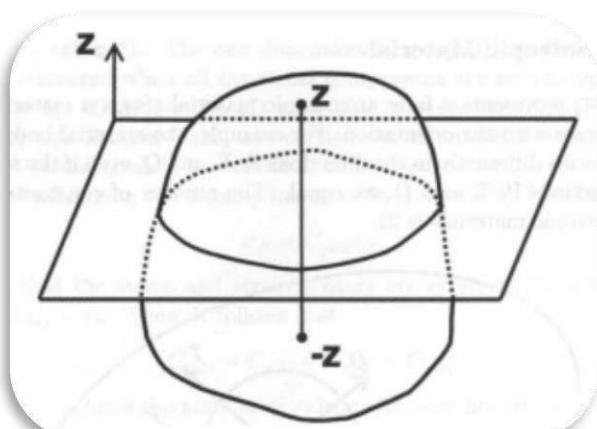


Ilustración 8: Esquema conceptual de material monoclinico (Barbero, 2008), en el que queda representado el único plano de simetría elástica presente en los mismos

Matemáticamente, la eliminación de este acoplamiento entre tensiones normales y tangenciales se traduce en que los términos $C_{14}, C_{15}, C_{24}, C_{25}, C_{34}, C_{35}$ se vuelven 0, de forma que la matriz de comportamiento queda de la forma:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ 0 & 0 & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix}$$

Materiales Ortótropos

La existencia de tres planos de simetría elásticos mutuamente perpendiculares con respecto a la dirección en las que se disponen las fibras es la condición propia de un material ortotropo.

En un material ortotropo, la existencia de dos planos más de simetría elástica con respecto a los materiales monoclinicos (por lo tanto, tres planos de simetría elástica) implica el desacoplamiento de la tensión transversal ante una solicitación normal siempre y cuando la acción normal se aplique en una de las direcciones contenidas en un plano de simetría elástica (o en uno de sus paralelos). En el caso de que la carga no se aplique en una de estas direcciones de ortotropía, sí se producirán acoplamientos entre tensiones normales y tangenciales.

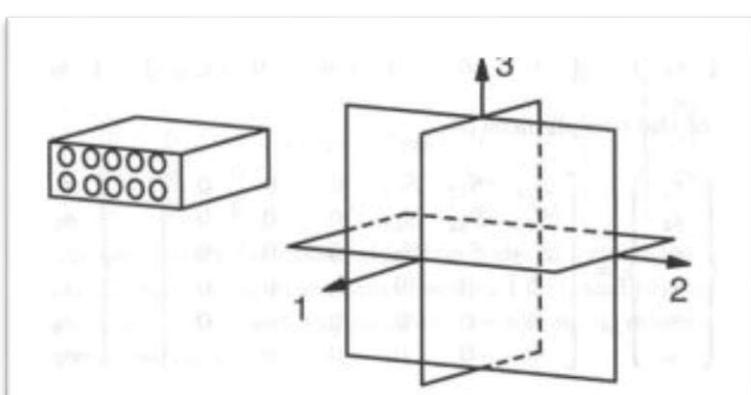


Ilustración 9: Esquema conceptual de un material ortotropo, representando los tres planos de simetría elásticos. (Barbero, 2008)

Matemáticamente, este desacoplamiento se expresa en la nulidad de las componentes C_{16} , C_{26} , C_{36} y C_{45}

Generalmente, un método empleado en la formación de laminados ortotropos consiste en la distribución “equilibrado o balanceada” de las fibras: existen el mismo espesor de láminas orientadas a θ° con respecto a la de la dirección longitudinal de la pieza existe que a 0° (las láminas orientadas a 0 ó 90° no se incluyen, ya que, por definición, generan carácter ortotropo; es la descompensación en otras direcciones lo que lleva aporta carácter anisótropo).

En el caso de que las tres direcciones de ortotropía marcadas por los planos de simetría elástica sean las direcciones propias del sistema de referencia del elemento en estudio, podemos considerar al material como “especialmente ortotropo”. (Bonet, et al., 2011)

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Algunos autores (Kollár & Springer, 2003) vienen a definir una nueva nomenclatura para las dos submatrices que se pueden observar, quedando de la forma:

$$\begin{bmatrix} [L] & \cdots & [0] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [0] & \cdots & [M] \end{bmatrix}$$

Materiales transversalmente isótropos

Un material transversalmente isótropo se caracteriza porque en el aparecen tres planos de simetría elástica mutuamente perpendiculares, diferenciándose del material ortotrópico en que uno de los planos de simetría puede ser considerado como isótropo. (Kollár & Springer, 2003). Esta consideración es similar a la consideración de considerar que existe un “eje de simetría”, por lo que cualquier plano que contenga el eje de simetría es un plano de simetría elástica. (Barbero, 2008). Esta aproximación es empleada para composites unidireccionales en los cuales las fibras se encuentren distribuidas de manera aleatoria. De esta manera, un plano que corte longitudinalmente a una fibra, es un plano de simetría elástica.

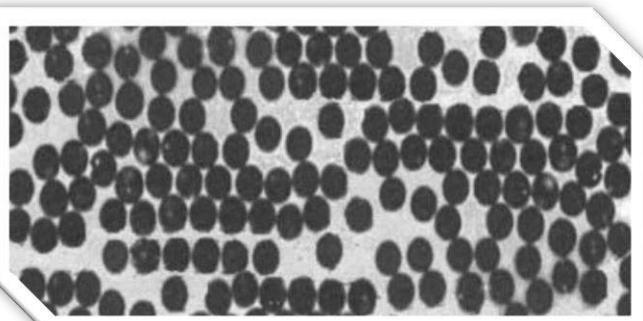


Ilustración 10: Ejemplo de un compuesto cuya fibra de vidrio E está repartida de una manera aleatoria

De esta manera, la matriz de comportamiento para un laminado en el que todas las fibras están orientadas en la misma dirección correspondería a la siguiente forma:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{25}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Componentes de los FRP

Resinas

En un material compuesto las resinas constituyen la matriz que aglomera las fibras, dando resistencia al conjunto del material en aquellas direcciones en las que no existan fibras dispuestas en sentido longitudinal (Friberg & Olsson, 2014). Generalmente, los esfuerzos de cortante así como la transferencia de tensiones interlaminares en una pieza de material compuesto son absorbidos por la matriz polimérica. En el mercado existen una gran cantidad de matrices, debido a que, previamente a su empleo como tal, son muchas las que se han venido usando habitualmente como adhesivos.



Ilustración 11: Latas de Resina epoxi con dispensador para apilados manuales (hand-lay up) (Federal Aviation Administration, s.f.)

Una característica importante siempre a tener en cuenta en la matriz es que para que pueda realizar su función de una manera coherente estructural y tensionalmente hablando es que debe presentar un módulo de elasticidad menor y una deformación en rotura superior a los de la fibra para poder transferir eficientemente las cargas a las fibras.

A continuación pasamos a realizar una clasificación muy común en la literatura y basada en la naturaleza de los polímeros que componen las resinas: resinas termoestables y resinas termoplásticas:

Thermoplastics	Thermosets
Heat and pressure softens the polymer, hence easy to repair	Decomposes with heat
Shelf life is indefinite	Shelf life is definite
High strains to failure	Low strains to failure
Easy to handle, not tacky	Tacky
Reprocessing is possible	Reprocessing not possible
Cure cycles are short	Cure cycles are long
Excellent resistance towards solvents	Reasonable resistance towards solvents
Higher fabrication temperatures and viscosities required	Lower fabrication temperatures

Tabla 3: Principales características de las resinas termoplásticas y termoestables, contrapuestas:

Tipos de resinas

En función de la naturaleza de los polímeros que las componen podemos distinguir entre resinas formadas por:

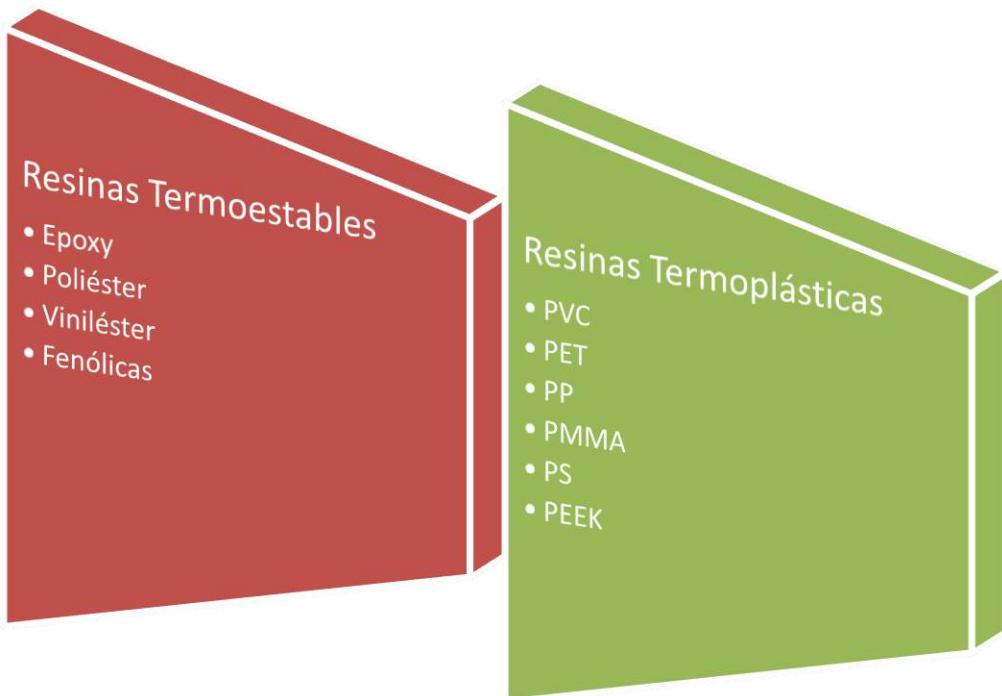


Ilustración 12: Esquema con los distintos tipos de resinas y ejemplos de ambas

Resinas Termoestables

Las resinas termoestables reciben el nombre de los polímeros que los componen, caracterizados por su pérdida de forma y propiedades de manera irreversible tras alcanzarse su denominada “temperatura de degradación”. Pese a esta característica que los hace inservibles para un hipotético reciclaje, es cierto que sus mejores propiedades mecánicas los hacen más usados en el campo de la ingeniería civil.

Son resinas termoestables las resinas epoxy, de poliéster, de vinilester, las fenólicas y otras similares.

Property	Unit	Epoxy	Polyester	Vinyl ester
Tensile strength	MPa	80	65	75
Modulus of elasticity	GPa	3.25	2.75	3

Tabla 4: Propiedades de distintas resinas termoestables

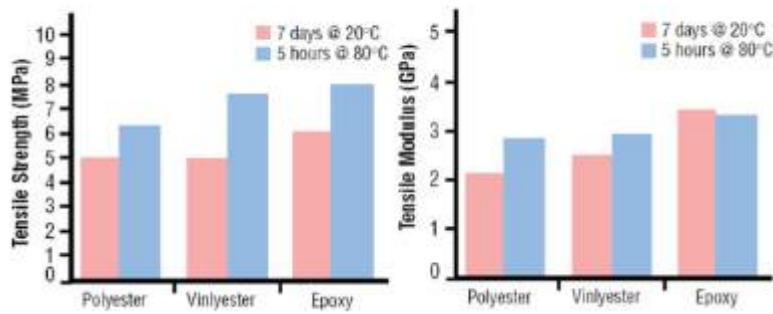


Ilustración 13: Gráfico de evolución de la resistencia a tracción y modulo elástico a tracción con el tiempo

Resinas Termoplásticas

Las resinas termoplásticas se caracterizan por presentar una temperatura, conocida como temperatura de transición vítrea en la cual el material se comporta de forma fluida, recuperando sus propiedades tras un enfriamiento. Esto las hace hipotéticamente reciclables.

Generalmente, las propiedades mecánicas de los polímeros termoplásticas suelen ser inferiores a las de los polímeros termoestables. Ello hace que, normalmente, se prefiera a los termoestables para funciones de mayor compromiso estructural.

Sin embargo, es cierto que en el diseño de elementos de material compuesto, los polímeros termoplásticos si vienen cumpliendo funciones como núcleo dentro de las estructuras sándwich de piezas de compuestos, constituyendo materiales ligeros y de baja capacidad estructural cuyo objetivo es el de aportar inercia al conjunto de la pieza, dando brazo mecánico a las partes de mejores propiedades de rigidez y resistencia.

Ejemplos de polímeros termoplásticos son el PVC, el polipropileno (PP), metacrilato (PMMA), poliestireno (PS), ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno), SAN (Estireno-Acrilo-Nitrilo) o el PEEK. (Friberg & Olsson, 2014)

Property	PE S	PE EK	PP	PS	ABS	SAN	PET	PBT	PM MA	PA	P C
Tensile strength (MPa)	90 8	93. 38	25-	19-55	35-48	55.6- 72	45- 160	50- 170	41 7	82. 7	6 9
Young's Modulus (GPa)	2. 7	3.5 1.9	1.4- 3.35	2.4- 2.5	1.75- 3.8	3.585- 10.3	2.3- 10.3	2.3 3	2.3 3	2.8 3	2. 3

Tabla 5: Propiedades medias de distintas resinas termoplásticas (Friberg & Olsson, 2014)

Refuerzos

Los refuerzos son los miembros de los materiales compuestos encargados de soportar los esfuerzos longitudinales a los que están sometidos los elementos fabricados con estos materiales. Actualmente, la ciencia e ingeniería de materiales ha conseguido el empleo de diversos materiales como refuerzos y que pueden ser adquiridos en el mercado cada vez de una manera más extendida y con un coste más competitivo.

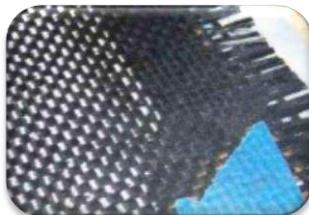
Dentro del mundo de los compuestos, las materiales empleados como refuerzos más utilizados son las fibras de carbono, las de vidrio y las aramidas, con sus correspondientes tipos que ahora pasamos a exponer.

Tipos de Refuerzos

Los tres tipos de refuerzos más empleados en ingeniería y concretamente del mundo de la construcción son las fibras de vidrio, carbono y aramidas (en orden descendente en extensión de uso).



Fibra de vidrio



Fibra de carbono



Fibra de aramidas

Fibra de Vidrio

Su precio competitivo y sus buenas propiedades específicas (por unidad de masa/peso) hace que sea uno de los refuerzos más empleados dentro del campo de la ingeniería civil y de estructuras y que provienen del procesado del vidrio, de la fundición (a unos 1400°C) de una serie de óxidos que se conforman en una serie de hilos que configuran un filamento.

La composición de la fibra de vidrio aparece pues dividida entre los óxidos (principalmente de silicio) y otros componentes (limos, ácido bórico, arcilla, etc.)

En función de la proporción de los diferentes componentes propios de la fibra de vidrio, podemos distinguir, principalmente, varios tipos de fibra de vidrio siendo los más importantes E, C, S2, R y E-CR y siendo la de mejores propiedades para la ingeniería civil la primera, la tipo E. La siguiente tabla muestra las diferentes propiedades de las distintas clases de fibra de vidrio

Glass Composition-By Weight		Type	Unit	E	C	EC-R	R & S		
Composition		E Glass	S-2 Glass*						
Silicon Dioxide	52-56%	64-66		Specific gravity	-	2.6	2.52	2.72	2.53
Calcium Oxide	16-25%			Tensile strength					
Aluminum Oxide	12-16%	24-26%		- Filament	N/mm ²	3400	2400	3445	4400
Boron Oxide	8-13%			- Roving	N/mm ²	2400	-	-	3600
Sodium & Potassium Oxide	0-1%			Tensile modulus	kN/mm ²	73	70	73	86
Magnesium Oxide	0-6%	9-11%		Fracture strain	%	4.8	4.8	4.8	4.8
				Softening points	°C	846	750	882	985

Tabla 6: Propiedades características de las distintas fibras de vidrio (HexCel, s.f.) (Friberg & Olsson, 2014)

Fibra de Carbono

Las fibras de carbono son un tipo de refuerzo de altas prestaciones empleadas en ingeniería. En ingeniería, se suele dividir la fibra de carbono en fibras de:

- Alto Módulo (High Modulus-HM)
- Ultra Alto Módulo (Ultra High Modulus-UHM)
- Alta Resistencia (High Strength-HS)

La fibra de carbono es un material de altísimas propiedades mecánicas (rígidas y resistentes) tanto de manera absoluta como de manera relativa al peso. Sin embargo, su alto coste (aunque cada vez se hace más competitivo) hace que se considere emplear solo para aplicaciones en las que alcanzar estas características extremas sea la única solución. Buena cuenta de estas propiedades se puede extraer de las siguientes tablas extraídas de catálogos propios del fabricante HEXCEL

Fiber Type	Number of Filaments	Tensile Strength (ksi) (MPa)		Tensile Modulus* (Msi) (GPa)		Strain** (%)	Weight/Length (g/m)	Density (g/cm³)	Standard Spool Size (lb)
AS4	3000	670	4619	33.5	231	1.8	0.210	1.79	4
	6000	640	4413	33.5	231	1.7	0.427	1.79	4
	12000	640	4413	33.5	231	1.7	0.858	1.79	8
AS4C	3000	675	4654	33.5	231	1.8	0.200	1.78	4
	6000	645	4447	33.5	231	1.7	0.400	1.78	4
	12000	650	4482	33.5	231	1.8	0.800	1.78	8
AS4D	12000	700	4826	35.0	241	1.8	0.765	1.79	8
AS7	12000	710	4895	36.0	248	1.7	0.800	1.79	8
IM2A	12000	770	5309	40.0	276	1.7	0.446	1.78	4
IM2C	12000	830	5723	43.0	296	1.8	0.446	1.78	7.5
IM6	12000	830	5723	40.5	279	1.9	0.446	1.76	4
IM7	6000	800	5516	40.0	276	1.9	0.223	1.78	4
	12000	820	5654	40.0	276	1.9	0.446	1.78	4
IM8	12000	880	6067	45.0	310	1.8	0.446	1.78	4
IM9	12000	890	6136	44.0	303	1.9	0.335	1.80	2
IM10	12000	1010	6964	45.0	310	2.0	0.324	1.79	2
HM63	12000	680	4688	64.0	441	1.0	0.418	1.83	3

* Tensile Modulus Calculated as Chord (6000 - 1000)

** Strain at Failure

Ilustración 14: Tabla con las propiedades de la fibra de carbono, extraídas de (HexCel, s.f.)

La fibra de carbono proviene de la pirolisis y cristalización controlada (a altas temperaturas de entre 2.000-2.400°C) de diferentes tipos de precursores. En función de los precursores empleados y las temperaturas y procesos empleados obtendremos los distintos tipos de fibras de carbono:

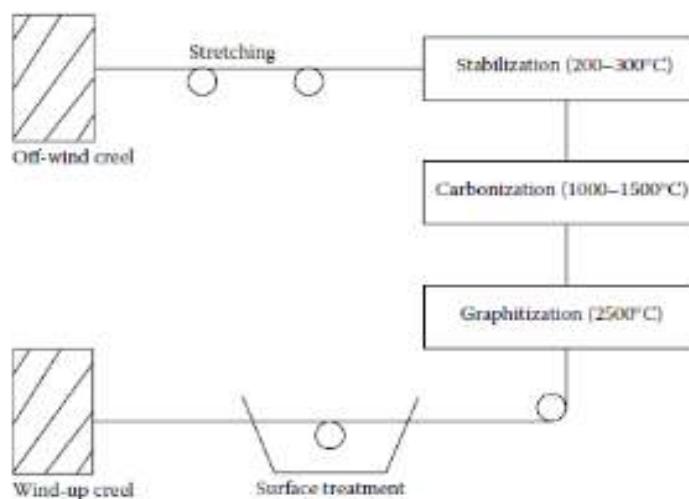
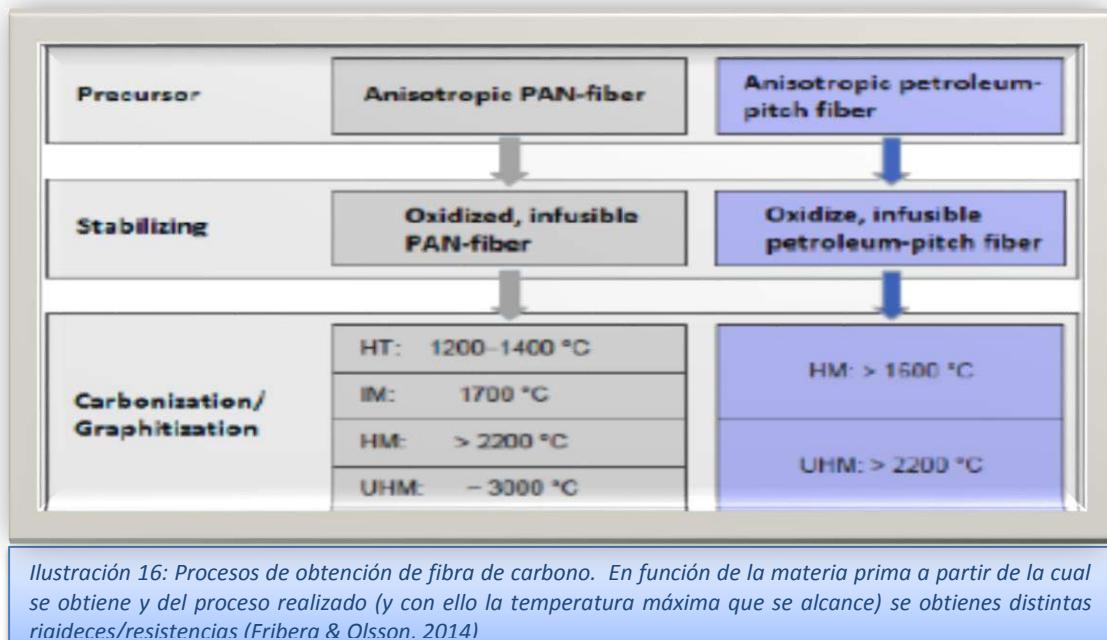


Ilustración 15: Esquema de proceso de producción de fibra de carbono (Friberg & Olsson, 2014)



Fibra de Aramida

Las fibras de Aramida, de las cuales las más empleadas y extendida en ingeniería civil es el KEVLAR, constituyen un tipo de fibra que presenta características y costes a medio camino entre la fibra de vidrio y la de carbono. Sus principales componentes son carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

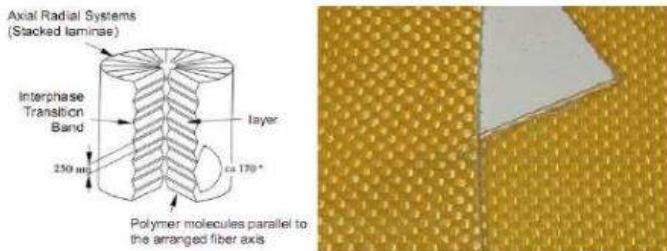


Ilustración 17: Esquema de un filamento de aramida (izqda.) y de un tejido de aramida (drcha.) (Potyrala, 2011)

Podemos decir que las principales características de las fibras de aramida son:

- Resistencia relativamente alta
- Baja densidad
- Módulo elástico medio
- Buena resistencia a abrasión

Sus principales desventajas son:

- Baja resistencia a la compresión
- Sensible a la radiación ultravioleta

Comparación fibras

A continuación mostramos una serie de gráficos y tablas en los que aparecen comparativa de las distintas fibras.

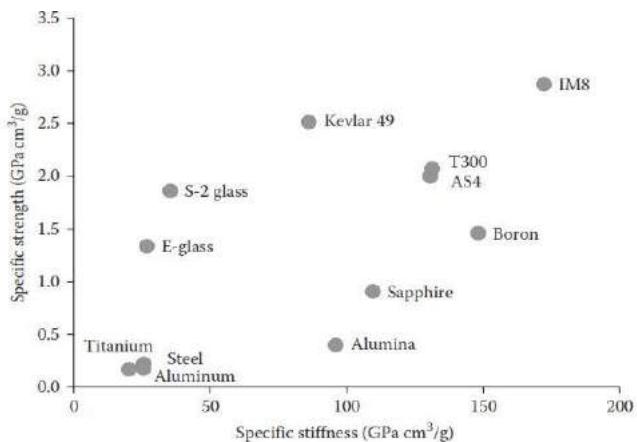


Ilustración 18 : Gráfico en el que se muestran las resistencias específicas características de diversos materiales frente a las rigideces específicas de los mismos (Zoghi, 2011)

Material	Specific modulus
M46 unidirectional composite	160
M46 bi-directional composite	70
E-glass unidirectional composite	23
Steel	27

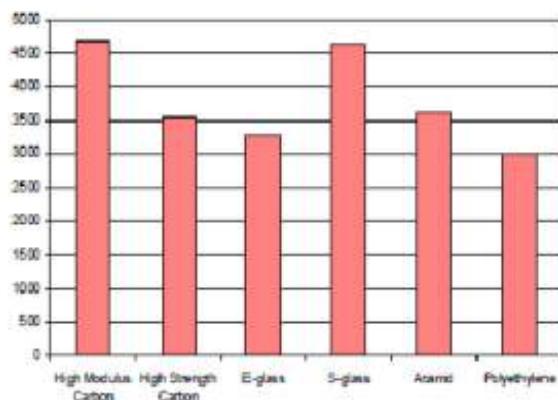
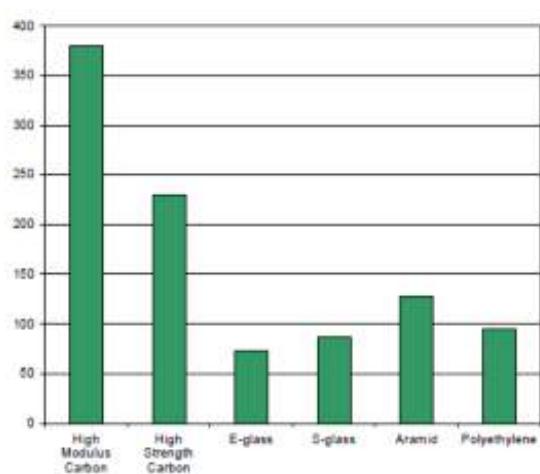


Ilustración 19: Módulos elásticos específicos en GPa (arriba izqda.). Imagen de distintos tejidos de fibras (de izqda. a derecha: vidrio, aramida, carbono) (arriba drcha.), comparativa del módulo elástico en GPa de distintos materiales (abajo, izqda.) comparativa tensiones resistentes últimas de tracción de distintos materiales (abajo, drcha.) (Friberg & Olsson, 2014)

Fibres										
Property	Unit	Glass				Aramid			Carbon	
		E	S2	R	ECR,C	Kevlar 29	Kevlar 49	Teijin Technora	HS	HM
Density	g/cm ³	2.6	2.5	2.4-2.6	2.4-2.6	1.44	1.44	-	1.8	1.9
Modulus of elasticity	GPa	72	85-90	86	69	83-100	115-130	70	215-235	370
Tensile strength	MPa	3450	4600	4400	3030	2750	2750	3000	3530	4400
Strain	%	4.8	5.7	-	4.4	4	2.4	4.4	1.4-2.0	0.5-0.9
Specific gravity	-	2.54	2.47	2.55	2.49	1.44	1.44	1.39	1.77	1.77
Heat transfer coefficient	W/m ² K	long: 6 to 10, trans: 19 to 23				long: -6 to -2, trans: 60 to 80		long: -1 to 0, trans: 22 to 50		
Coeff. of thermal expansion	10 ⁻⁶ /°C	5				-		7.2		

Note: HS – high strength HM – high modulus

Tabla 7: Distintas propiedades para distintas clases de fibra y tipos de fibra dentro de las clases (Friberg & Olsson, 2014)

Formas de presentación del refuerzo de un material compuesto

Fibras

Es la forma primigenia en la que se consigue el refuerzo. Dado que este refuerzo debe ser puesto en obra, comercialmente se suele distribuir en formas que faciliten su empleo como refuerzo al que aplicar una matriz. Generalmente, las fibras se agrupan formando entidades superiores, cuya terminología aparece bien definida en el glosario de (Clarke, 1996). Estas entidades son las siguientes. Esta precisión resulta importante dado que traducidos del inglés, son todos sinónimos y en ocasiones casi intercambiables; sin embargo, existen ligeras diferencias o se emplean solo con determinadas fibras:

Fiber

Strand

Yarn

Tow

End

- **Fibra (“fiber”):** en sentido amplio, generalmente a todos los refuerzos se los llama de fibra, dado que están formados por la misma, presentada de diversas formas. En sentido estricto, se suele usar fibra por “filamento”
- **Strand (“nervio, tendón”):** término genérico para conjunto/haz de filamentos no trenzados que sirven como unidad. La generalidad del término engloba a otros términos como tow, end, yarn...

- **Yarn (hilo):** término genérico para un grupo filamentos continuos normalmente trenzados y listos para hacer tejidos textiles.
- **Tow:** grupo no trenzado de filamentos continuos, normalmente usado para aquellas fibras artificiales, específicamente para fibra de carbono.
- **End:** es una única fibra, tendón, o un grupo de fibras que es incorporada a un producto. Un “end” suele ser un hilo individual situado en la dirección longitudinal de un tejido. Este término se suele asociar normalmente a grupos de filamentos no trenzados en fibras de aramidas y fibras de vidrio.

Rovings

Los “rovings” son un conjunto, un haz de fibras unidireccionales (agrupaciones similares a “ovillo”, “bobina”) que se usan directamente y extensivo en procesos automáticos para la formación de compuestos como pultrusión y enrollado de filamentos. En estos procesos se exige la aplicación de tensión para controlar la orientación y consolidación. Las propiedades de las fibras de los rovings suelen ser reducidas cuando son tejidas y usadas como refuerzos. (Clarke, 1996)

Se suelen distinguir dos tipos de Rovings (Friberg & Olsson, 2014):

- Rovings Directas: aquellas que están formados por filamentos paralelos que no se entrelazan. Dada la unicidad del filamento y la capacidad de dar lugar a mayores pesos y volúmenes de fibras, por lo que su uso solo se ve recomendado para procesos de producción de alto rendimiento que no desmerezcan el material, alcanzándose propiedades del orden de diez veces superiores al CSM
- Roving unidas: aquellas que aparecen entrelazadas formando cabos. Tienden a dar lugar a un empaquetado menos compacto, y, por tanto, las propiedades que ofrecen suelen ser menores que la de las bobinas directas.



Roving Directa



Roving Unida

Ilustración 20: (Friberg & Olsson, 2014)

Los rovings de fibra de vidrio son formados mediante el melt-spinning, enfilado mediante fusión.

Mats

El término engloba a un conjunto de estructuras de refuerzo bidimensionales formadas por filamentos de pequeña o gran longitud

Chopped Strand Mat (CSM)

El CSM es un material de refuerzo planar en el cual los hilos de fibras (no tejidas) son cortados en pequeños trozos que son aproximadamente distribuidos uniformemente y con una orientación no preferente, al azar. Estas fibras se mantienen unidas mediante la aplicación de un “binder”, una resina que une ligeramente los filamentos entre sí y que se puede disociar una vez que se procede a la impregnación con resina del refuerzo.

El hecho de emplear CSM implica el conseguir porcentajes de fibra muy reducidos, no llegando estos normalmente al 25% y siendo el “efectivo” (aquel que está orientado en la dirección idónea para soportar un esfuerzo determinado) no superior al 10%.



Ilustración 21: CSM de fibra de vidrio (Friberg & Olsson, 2014)

También debido al empleo de fibras cortas, el papel de la matriz es fundamental para la transmitir la carga. En líneas generales, las fibras cortas terminan proporcionando peores propiedades que las largas. De acuerdo a estas características explicadas, el uso de CSM se termina limitando a piezas de bajo compromiso estructural. Asimismo, es importante tener que evaluar el aglutinante empleado y su compatibilidad con la resina así como si el agua u otros agentes pueden afectar al material durante su vida en almacén.

Para los CSM de fibra de vidrio, la norma ISO reguladora es la ISO 2559: Fibra de vidrio CSM para refuerzo de sistema de resina de poliéster.

Continuous Filament Mat (CFM)

Representa un refuerzo planar cuyas características son similares al del CSM, siendo la principal diferencia que en un mat CFM las fibras son continuas (largas), distribuidas uniformemente y orientadas aleatoriamente. (Clarke, 1996). Gracias al empleo de filamentos continuos, se suelen obtener mejores propiedades que con el CSM. Se tiende a usar en pultrusión así y como en otros procesos de producción continua y en Hot Press Moulding (Moldeo por presa caliente) (Friberg & Olsson, 2014)



Ilustración 22: CFM de fibra de vidrio (Friberg & Olsson, 2014)

Woven Roving (Haces de fibras tejidos)

Los woven roving's (hilos para tejido) constituyen un refuerzo planar bidireccional constituido por filamentos orientados en la dirección longitudinal (generalmente, aquella en la que se desenrolla) llamados "warps" y unos perpendiculares a los anteriores que los cosen llamados "weft" o "fill". Por norma general, estos filamentos son no trenzados



Ilustración 23: Woven Roving de fibra de vidrio (Friberg & Olsson, 2014)

Por sus características, los WR son de fácil puesta en obra, especialmente en la producción de grandes áreas. La disposición de fibras continuas otorga mejores propiedades al WR frente a otros competidores, como el CSM.

Para grandes pesos de refuerzo mediante WR el porcentaje de fibra puede decaer hasta el 40% debido al crimpado (entrelazado) de los filamentos. Debido a la forma en la que se configuran los warps y wefts, la fibra efectiva suele repartirse a partes iguales (20% en ambas direcciones perpendiculares. En el caso de que los WR sean

gruesos, con una textura en torno a 400-600 g/m², se pueden dar problemas relacionados con la falta de impregnación por parte de la resina, aparición de huecos y falta de unión entre láminas con la consecuente aparición de rasante. Esta es la razón por la que se suelen intercalar láminas de CSM entre aquellas de WR.

La ISO 2113 en su sección “Woven glass fibre rovings fabrics of E-glass fibre for the glass reinforcement of polyester resin system” regula estos materiales.

Tejidos

Los tejidos presentan, en comparación con los Woven Rovings, un menor espesor del ply y una mayor ligereza. La gama de formas de entrelazado existentes entre los warps y los wefts es variada. Ello hace que los principales parámetros que deben ser tenidos en cuenta a la hora de definir un tejido son los que se muestran a continuación (Friberg & Olsson, 2014):



- Número de filamentos
- Fibra de “warp”
- Fibra de “weft”
- Tipo de tejido

Existen diversas formas de configurar los warps y los wefts que dan lugar a distintos tipos de tejido:

- **Plain weave**

Es el tejido primigenio. Ofrece una serie de puntos positivos tales como mayor estabilidad, porosidad y un deslizamiento interlaminar reducido. Siempre que el número de filamentos sea igual en la dirección warp y weft, se garantizan propiedades uniformes.

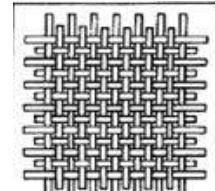


Ilustración 24: Plain weave (Friberg & Olsson, 2014)

- **Twill weave**

El tejido en twill presenta un mejor drapeado, una mejor capacidad para adaptarse a la forma y pliegues de la pieza.

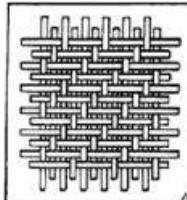


Ilustración 25:
Twill weave
(Friberg and
Olsson 2014)

- **Satin weave**

El tejido satin presenta una superficie más fina y es más adaptable a los moldes, se consiguen mayores densidades y propiedades satisfactorias de resistencia en ambas direcciones

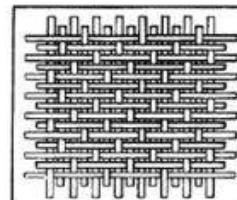


Ilustración 26: Satin weave (Friberg and
Olsson 2014)

- **Unidirectional weave**

Presenta las mejores propiedades en una única dirección. Ello sirve de anticipación al concepto de Non-Crimp Fabric (tejidos no entrelazados).

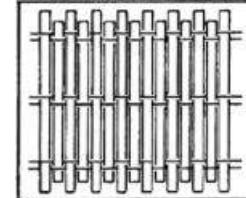


Ilustración 27: UD weave (Friberg and
Olsson 2014)

Las distintas propiedades de un tejido están, como no podía ser de otra forma, íntimamente ligadas con estas propiedades. Esta dependencia pasamos a describirla a continuación (Friberg & Olsson, 2014):

- La resistencia de la fibra es función de la cantidad de fibras, el tipo de fibra warp y el tipo de fibra weft (también llamada fill)

- La apariencia del tejido así como su capacidad para puesta en obra son principalmente consecuencia del tipo de tejido adoptado

Se pueden alcanzar hasta un 50% de volumen de fibra debido a que el crimpado es menor que en los WR debido al menor peso,

Durante la elaboración de piezas de compuesto empleando tejidos, se puede controlar relativamente bien el espesor, peso y resistencia del material.

La ISO 2113 en su sección “Tejidos hilados de fibra de vidrio para plásticos reforzados” (Clarke, 1996) regula estos productos.

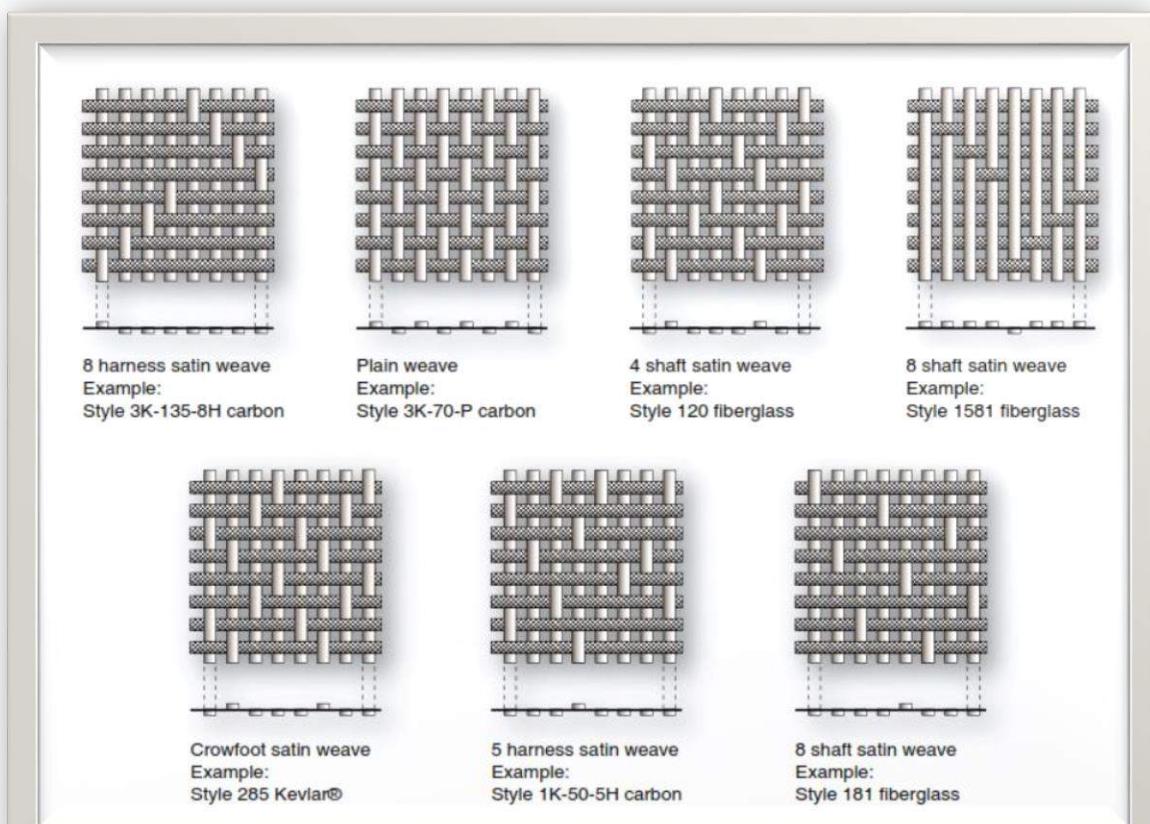


Ilustración 28: Ejemplos de tejidos comerciales (Federal Aviation Administration, s.f.)

Tejidos no Crimpados (No entrelazados)

Consisten en apilación de tejidos unidireccionales en distintas direcciones elegidas en el proyecto, siendo estos cosidos en la dirección vertical por otros hilos ligeros dispuestos para ello. De esta manera, se permite orientar la fibra en la dirección en que se aprovechen mejor las propiedades de acuerdo a su función estructural. Además, se puede alcanzar un mayor porcentaje de fibras y se pueden conseguir formas relativamente complejas mediante procesos sencillos, así como orientaciones a 45º, dificultosas de acuerdo a los distintos tejidos propuestos. Asimismo, este tipo de estructuras resultan resistentes a la fluencia (creep).

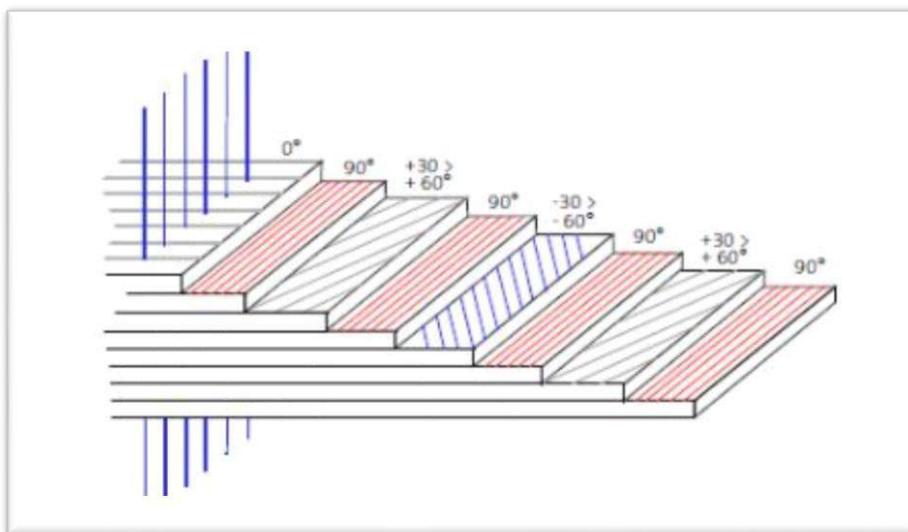


Ilustración 29: Esquema de un tejido no crimpado (Non-Crimp Fabrics) (Friberg & Olsson,

Puntos negativos sobre los tejidos estos tejidos son que en ellos siempre cabe la posibilidad de que se formen bolsas de resina y zonas de bajas propiedades debido a zonas angulosas (Kasapoglou, 2010) o por el entrelazado de fibras (crimp) (Friberg & Olsson, 2014).

Velos de superficie

Son capas ligeras echas de fibra de vidrio (C-glass sobre todo) o de otras fibras cuyo objetivo es dar un acabado estético y anticorrosión a la pieza. Se suelen emplear en conjunto con gel coats para conferir mejores propiedades y prevenir el escape de

resina. En cualquier caso, son **capas no estructurales**, con lo cual se debe aplicar a capas que se presenten unidas.



Ilustración 30: Velo de superficie, cortesía de CHM Composites

Moldes preformados con fibras integradas

Son estructuras de fibras ya dispuestas que forman una estructura tridimensional. Su uso está restringido a grandes producciones.

Comparativa económica entre tipos de presentación de refuerzos

De acuerdo a la forma de presentación de los refuerzos estos presentan unas características u otras, así como un mayor o menor precio. En (Friberg & Olsson, 2014) se realiza una comparativa la cual consideramos conveniente sacar a colación pues, si bien no deja de ser estimativa, nos da una idea relativa de qué opciones son más o menos caras y, en función de las propiedades necesarias, elegir una u otra.

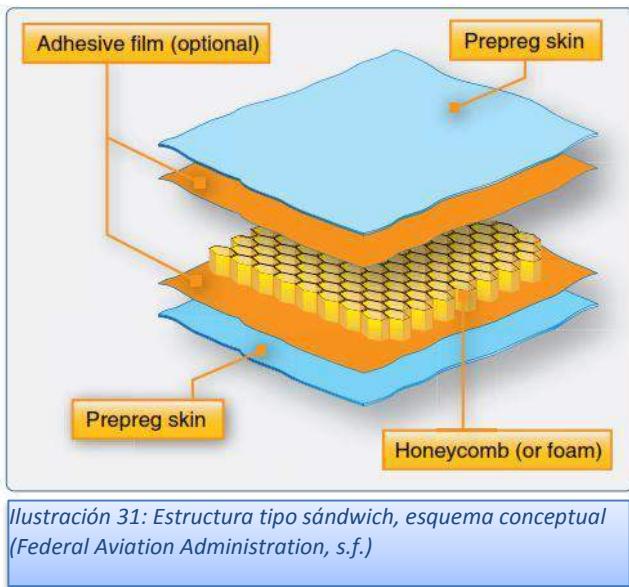
Ilustración 12

Reinforcement type	Cost factor
Continuous strand	1.0-2.5
Cloth fabric	3.5-6.5
Woven roving fabric	2.0-3.5
Chopped strands	1.0-1.5
Reinforcing mats	1.5-2.5
Surfacing mats	5.0-6.0

Comparativa de coste de refuerzos en función de su modo de acopio

Núcleos y estructuras tipo sándwich

Tal y como hemos explicado anteriormente, es una práctica común la de la colocación de núcleos (en inglés, "cores") en las piezas de material compuestos con el objetivo de aportar inercia a la pieza, colaborar en la producción de una forma concreta o incluso ejercer pequeñas labores de bajo compromiso resistente (Clarke, 1996). De esta manera, se da lugar a lo que se conoce como estructuras tipo sándwich.



De acuerdo a la función que hemos explicitado se asigna a los núcleos, estos deben cumplir una serie de requisitos; a saber (Clarke, 1996):

- ✓ Baja densidad
- ✓ Módulo de cizalladura y resistencia a cortante alta
- ✓ Resistencia en la dirección del espesor
- ✓ Estabilidad térmica y dimensional
- ✓ Resistencia a fatiga, al impacto y a la humedad

- ✓ Fácilmente moldeables
- ✓ Que presenten buena capacidad para generar un pegado superficial resistente.

Los materiales que pueden ejercer la función de núcleo son de diversos tipos, aunque generalmente se encuadran en dos grandes grupos: espumas y honeycombs

Espumas

Son elementos formados por materiales de macroestructuras en forma de celdillas abiertas o cerradas, pudiendo ser estos materiales diversos tipos de plásticos.

Asimismo, la forma de aplicación de las espumas puede ser por proyección in situ o por formación de “slab stock”; es decir, bloques de espumas preparados para la formación de estructuras sándwich



Ilustración 32: Ejemplos de espumas (foam) comerciales basados en distintos plásticos

Generalmente los materiales más empleados como núcleos en forma de espuma son poliuretanos, polivinilos rígidos, PET y polimetacrílicas (PMI).

Dentro de las espumas existen distintos grados de densidad y propiedades, siendo algunas más indicadas para la formación de estructuras sándwich y otras para el relleno in situ. Incluso, para algunos usos estructurales a las espumas se las dotan de refuerzos (normalmente de fibras cortas) que mejoran sus propiedades.

Honeycombs

Los honeycombs (en inglés, panal de abejas) son estructuras de carácter macroscópicamente reticular (siendo la repetición de polígonos, normalmente octógones) que se emplean cuando se tiene que tender a una optimización del peso crítico (Clarke, 1996) debido a su elevado coste.

Existe variedad en el mercado acerca de los materiales que conforman el honeycomb, siendo uno de los más usuales son aleaciones de aluminio como

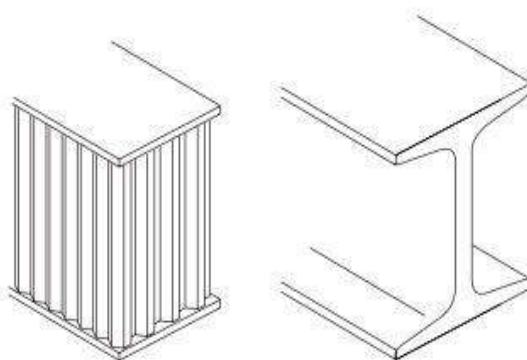


Ilustración 33: Analogía entre viga en I y honeycomb (HexCel, s.f.)

el 5052 H39 o el 5056 H39, el NOMEK, compuestos reforzados con fibra de vidrio o de aramidas y el papel Kraft.

Los honeycombs permiten, en general, crear unas estructuras compuestas de mayor capacidad estructural que los espumas. Mediante el empleo de un honeycomb podemos decir que la analogía entre la viga en I y la estructura sándwich es completa, dado que la mayor capacidad resistente de este hace que sea capaz de absorber unos esfuerzos cortantes

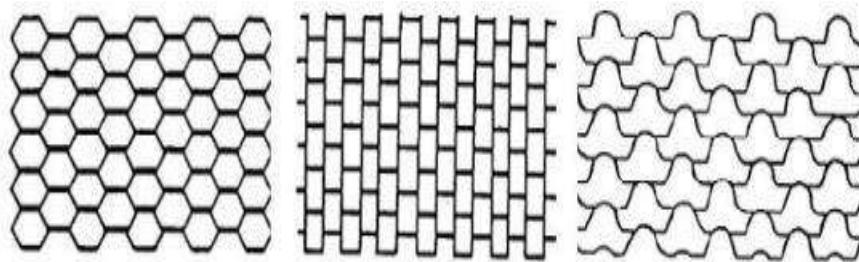


Ilustración 35: Esquema conceptual de los diferentes tipos de honeycombs, de izquierda a derecha: hexagonal, overexpanded, flexicore

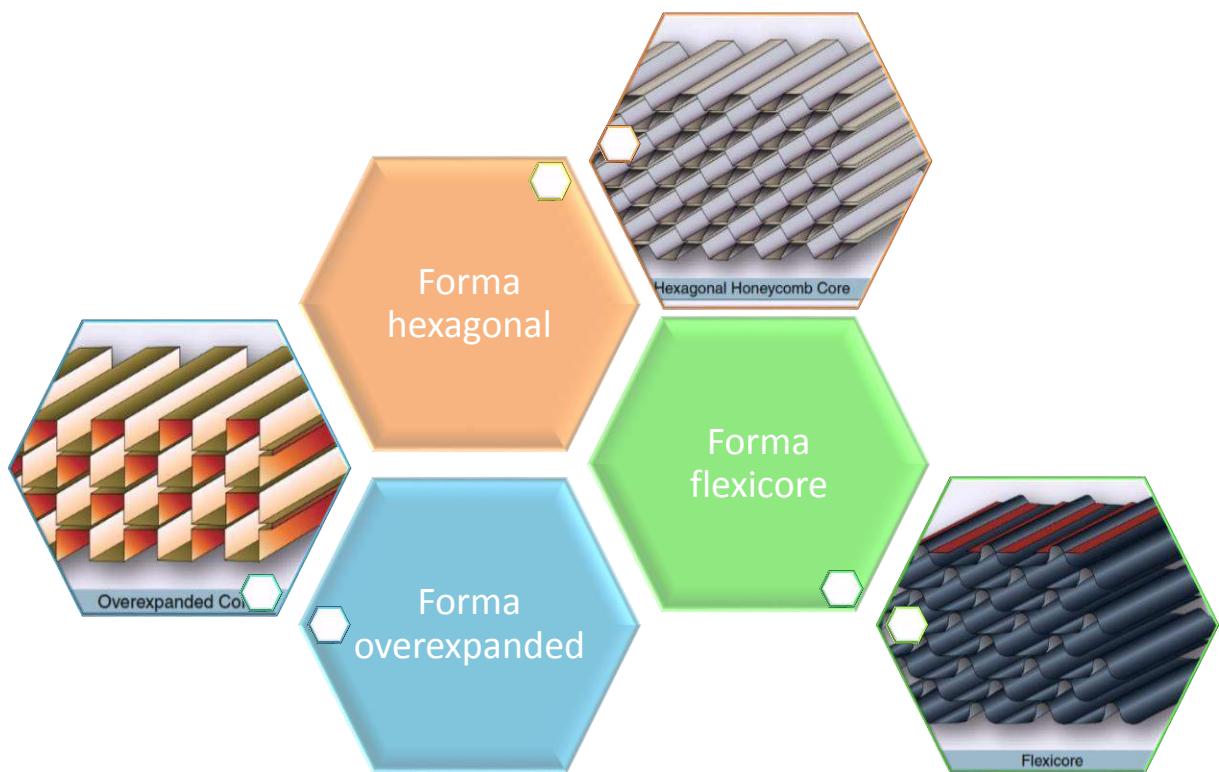


Ilustración 36: Esquema conceptual de los diferentes tipos de honeycombs, en disposición 3-D

FRP en Construcción y Arquitectura

Si bien es cierto que queda todavía un amplio camino para que terminemos llamando a los *composites* como material “tradicional” de construcción, es cierto que, cada vez más, su empleo es aparece con mayor asiduidad dentro del mundo de la construcción. Este interés ha sido demostrado desde hace mucho tiempo a nivel internacional y también nacional (viéndose este interés patente a nivel nacional en su recogida como una sección única dentro del I Congreso Nacional de Materiales Compuestos (Philippe, 1995) (Laffarga Osteret & Olivares Santiago, 1995) organizado por los profesores D. Federico París y D. José Cañas) en el año 1995 en Sevilla.

Actualmente, podemos encontrar materiales compuestos tanto ejerciendo labores estructurales de alto compromiso como empleándose en labores ornamentales, decorativas o de cerramiento.

El desarrollo dentro del campo de los compuestos y su entrada en el mercado ha hecho que a día de hoy su empleo en construcción sea una realidad. Su uso ha venido siendo de gran utilidad dentro del campo estructural como refuerzo (*frp strengthening*) o en menor medida como redondos de armado para vigas de hormigón (*frp reinforcing*).

Generalmente, los materiales compuestos se tienden a emplear en una serie de situaciones en las que sus características propias los hacen alternativas competitivas a otras opciones más tradicionales. Son estas situaciones propias en las que su uso es recomendado las siguientes (Bank, 2006):

- **Necesidad de reducción de peso en elementos resistentes**, en los que los materiales tradicionales viene presentando tanto espesores como densidades superiores. Esta reducción de peso resulta indispensable para la adquisición de estructuras esbeltas o de aquellas que necesiten maquinaria adicional para proporcionar movimientos (tómese como ejemplo el caso del puente elevadizo sito en el puerto de Ciudadela, Menorca).
- **Necesidad de reducción de tiempos en puesta en obra**. Al venir las piezas de fábrica ya conformadas, una vez ejecutadas la infraestructura de apoyo necesaria, la puesta en obra resulta rápida, traduciéndose ello en menores costes económicos (gastos de personal e indirectos) y sociales (reducción de tiempos de corte de tráfico si la obra atraviesa una vía, por ejemplo)
- **Dificultades logísticas a la hora de puesta en obra**. Debido a la reducción de peso que introduce la elección de materiales compuestos, resulta de interés su

empleo en situaciones en las que el acceso para la colocación de elementos sea complicado y necesite de maquinaria de elevación de baja entidad.

- **Posibilidad de problemas de corrosión debido a ambientes marinos y/o químicamente agresivos.** Proyectos situados en ambientes agresivos que invaliden una solución metálica-mixta pueden ser propicios para los frp, sobre todo para aquellos compuestos de fibra de vidrio.

Dentro del campo de la ingeniería civil, los materiales compuestos se vienen empleando en diversos campos, los cuales pasamos a enumerar (Bank, 2006):

Usos en obra nueva

- **Empleo para vigas en cajón**
- **Empleo como perfiles estructurales**
- **Uso como redondos o mallas de armado para hormigón armado**

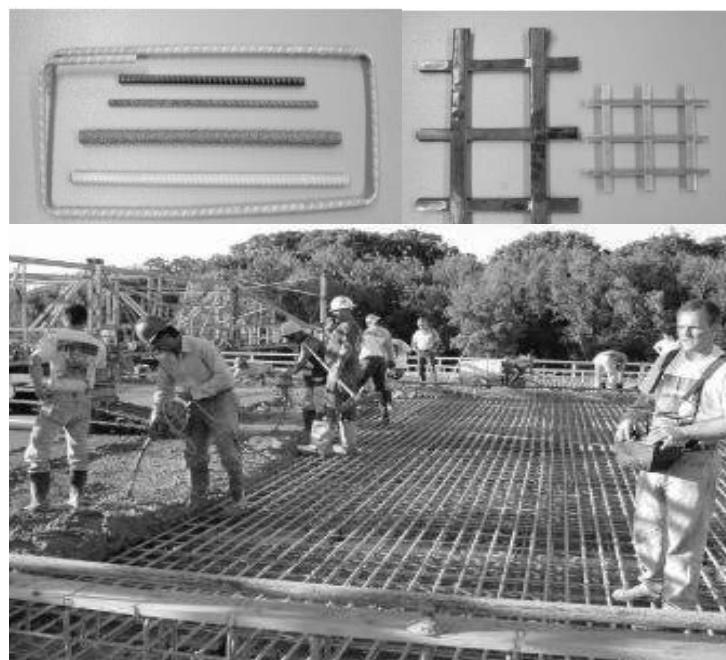


Ilustración 37: Redondos y estribos de fibra de vidrio y fibra de carbono (izqda.). Mallazo de fibra de vidrio y fibra de carbono (drcha.). Colocación de mallazo de fibra de vidrio en obra, siendo hormigonado (Bank, 2006)

- **Uso para cables pretensados o cordones de pretensado en hormigón**
- **Empleo como encofrados para elementos de hormigón**
- **Uso como fibras de refuerzo en hormigón, generalmente como fibras cortas (hormigón GRC)**

- **Pilotes GFRP**



Ilustración 38: Tendones de pretensado de FRP nipones (izqda.). Colocación de encofrados para el tablero de un puente (superior drcha.) y pilotes de FRP (inferior drcha.)

Usos en rehabilitación, reparación y refuerzo

- **Bandas de refuerzo de fibra de carbono para pilares**
- **Bandas de refuerzo de fibra de carbono vigas de hormigón**



Ilustración 39: Distintos usos de FRP en refuerzo en forjados, muros, vigas y pilas

Puentes y pasarelas de FRP

El empleo de materiales FRP en la construcción de pasarelas es relativamente nuevo si lo comparamos con el empleo de materiales más convencionales como madera, acero y hormigón armado y pretensado. Sin embargo, desde sus primeros usos en la década de los 70, fruto del desarrollo acaecido en el mundo de los plásticos reforzados en otros ámbitos como el de la industria aeronáutico o la automoción, el empleo de estos materiales se ha puesto en alza, sobre todo en aquellas condiciones en las que primen problemas de corrosión o la necesidad de un peso reducido (Bank, 2006), tal y como explicamos anteriormente.

Tipológicamente, entre los puentes y/o pasarelas elaboradas con material compuesto se tiende a realizar una clasificación de acuerdo a la presencia estructural que tiene el composite. Esta clasificación suele ser la siguiente:



Ilustración 40: Arriba Izqda.: Primera pasarela all-composite (ACCS) en Aberfeldy (Escocia).
Arriba drcha. : Esquema estructural del puente de la autopista del Cantábrico, primer puente carretero en FRP de Europa. (Acciona) Abajo, empleo de placa-arcos de CFRP en el Royal Bridge (Auburn, Maine. Empresa AIT Bridges)

- All-composite: Todos los elementos estructurales que aparecen se encuentran formados por elementos de FRP.
- Híbridos: Está referido a estructuras mixtas, compuestas generalmente por vigas de FRP que soportan una losa de hormigón que les da mayor inercia.
- Empleo de FRP en elementos estructurales auxiliares normalmente de otro material, como tableros, redondos de armado, cables tensores, tendones de pretensado

Esta clasificación es repetida normalmente en la bibliografía (Potyrala, 2011) (Zoghi, 2011) especializada en puentes y pasarelas de FRP. A continuación mostraremos algunos ejemplos presentes en España de puentes de material compuesto, seleccionados de la lista presente en (Potyrala, 2011) con 355 puentes y pasarelas en los que se ha empleado materiales FRP. Obsérvese, de acuerdo a los datos mostrados, que el empleo de compuestos ha sufrido en España una tendencia claramente alcista a partir de la primera década del Siglo XXI:

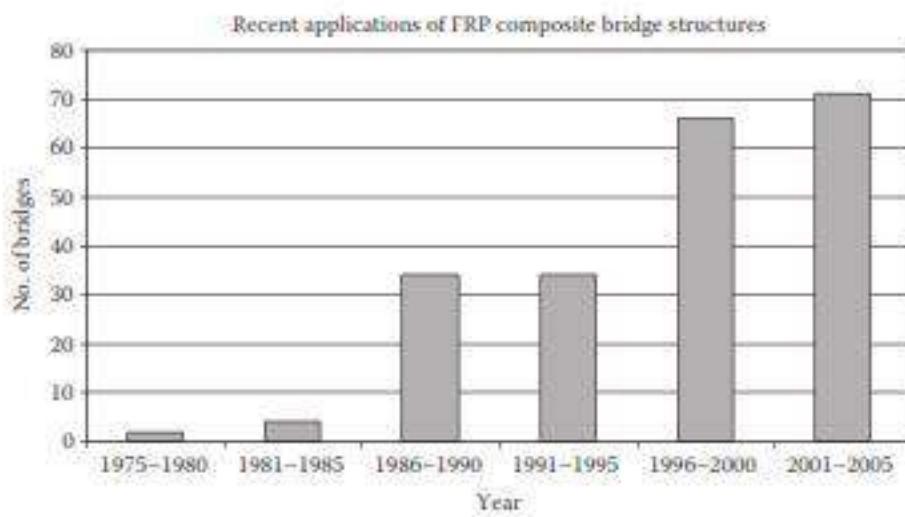


Ilustración 41: Tendencia en la construcción de puentes FRP a nivel mundial (Zoghi, 2011)



Primera Pasarela de Lleida
(PeDelta, 2002)



Puente Carretero Autovía M-
111 (Acciona, 2008)



Sendero Cueva de Oñate-
Arrikrutz (PeDelt, 2008)



Segunda Pasarela GFRP en
Lleida (2010)



Pasarela del Manzanares
(Acciona, 2011)



Puente de Asturias en Autovía
del Cantábrico (Acciona, 2014)

Ilustración 42: Puentes carreteras y pasarelas en FRP en España en orden cronológico de construcción. Las mismas han sido seleccionadas de la lista existente en el que se recogen 355 pasarelas a nivel mundial de (Potyrala, 2011)

Diseños Conceptuales de Puentes y Pasarelas en FRP



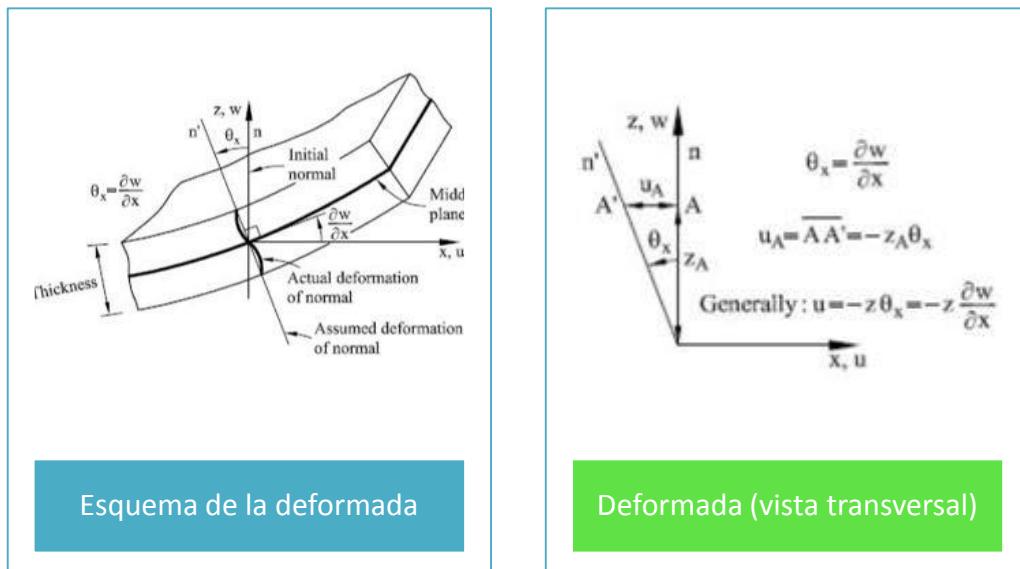
Ilustración 43: Diversos diseños conceptuales de puentes singulares de grandes luces en FRP propuestos por diversos autores. Arco rebajado y Arco Alto de (Kendall, 2014) Pasarela súper esbelta "origami" (Smits, 2014)

Teoría de laminados aplicada a materiales compuestos

Ecuaciones de Placa y Teoría de Laminados

En este apartado se pretenden exponer, a modo de recordatorio, las expresiones propias de la teoría de placas, tanto de placas delgadas como de placas gruesas, así como exponer brevemente la teoría de laminados y el cálculo de las matrices de rigidez propia de los mismos. Se emplaza al lector a consultar bibliografía especializada para más detalles (París, et al., 2012) (Oñate, 2011) (Barbero, 2008) (Domínguez Abascal, 2003)

Teoría Clásica o de Segundo Orden-Placa Delgada-Formulación de Kirchoff-Love

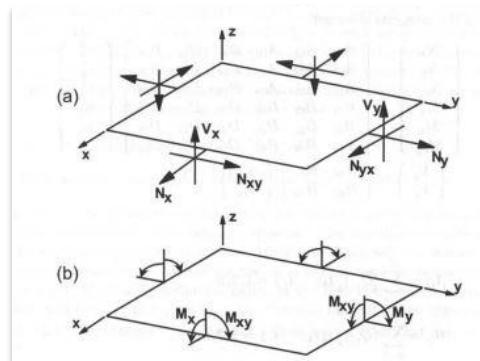
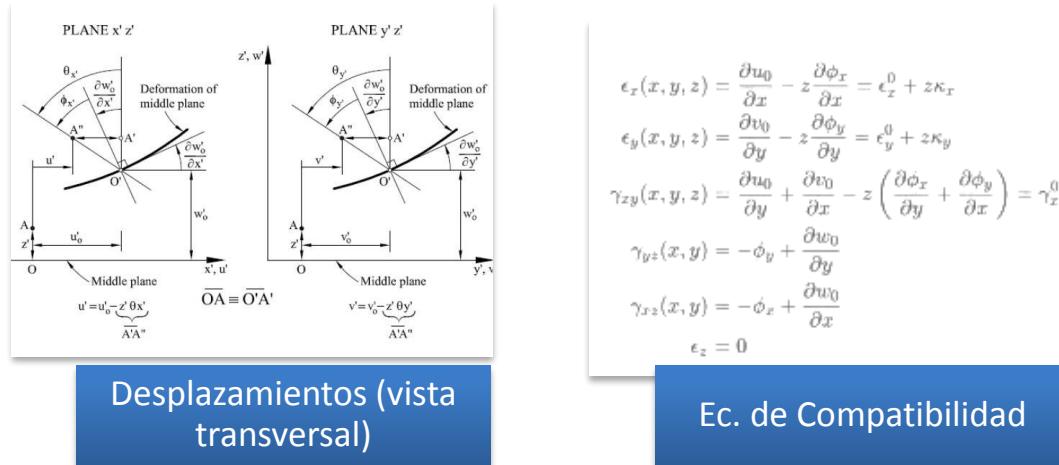
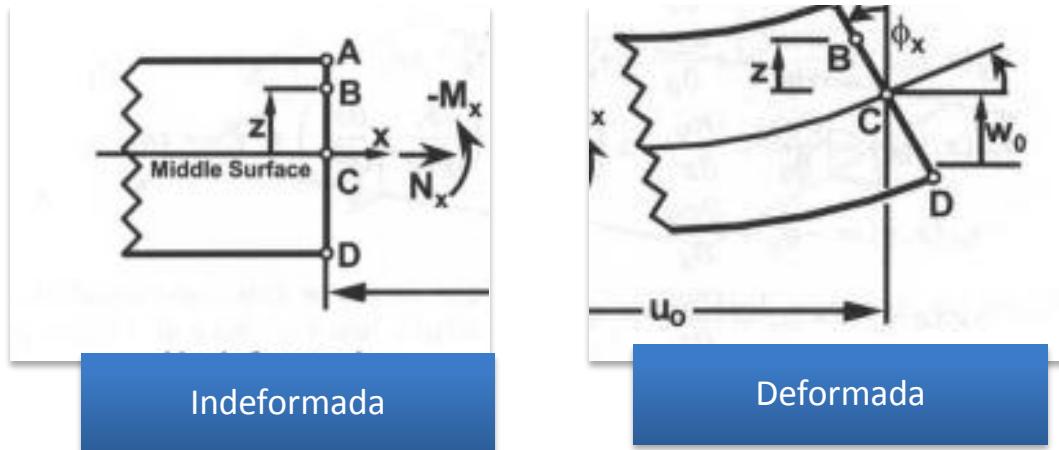


$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \varepsilon_z = 0 \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial y} = 0\end{aligned}$$

Ecuaciones de compatibilidad

Ilustración 44: Principios de la Teoría Clásica de Placas (Oñate, 2011)

Teoría de Primer Orden-Placa Gruesa-Formulación de Reissner-Mindlin



Esfuerzos

Ilustración 45: Conceptos asociados a la teoría de Reissner-Mindlin (Barbero, 2008) (Oñate, 2011)

Teoría de Laminados

Llamaremos laminado a un conjunto de dos o más láminas unidas entre sí, siendo las orientaciones entre las láminas cualesquiera entre sí (siendo esta hipótesis base para considerar que, a priori, el material no posee direcciones principales de ortotropía), (París, et al., 2012)

La Teoría General de Laminados busca encontrar la relación entre esfuerzos y deformaciones asumiendo como propias las hipótesis generales de la teoría de placas. Asumiendo un comportamiento tipo placa de primer orden (T. de Reissner-Mindlin), los esfuerzos de un laminado genérico posee un la forma:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{44} & H_{45} \\ H_{45} & H_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}$$

El significado de cada uno de los términos se explica a continuación:

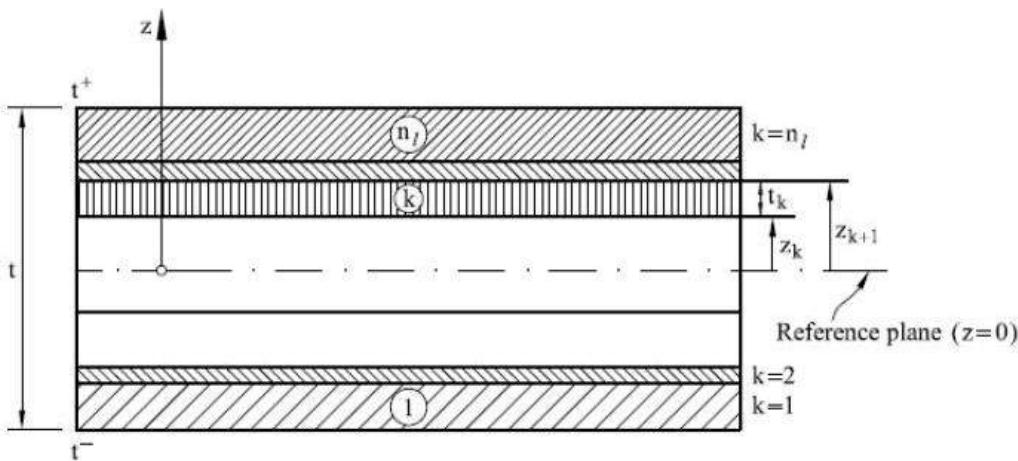


Ilustración 47: Definición de la matriz de comportamiento de una lámina simétrica (Oñate, 2011)

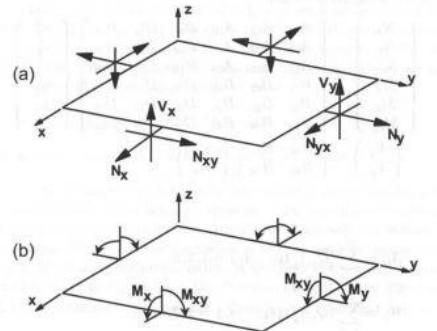


Ilustración 46: Esfuerzos de una placa (Barbero, 2008)

- Los coeficientes A_{ij} representan la rigidez en el plano del laminado del mismo (rigidez a axiles en la dirección longitudinal y transversal y cortante en el plano (Barbero, 2008). Se obtienen de la siguiente fórmula:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k; \quad i,j = 1,2,6$$

Con \bar{Q}_{ij} los coeficientes correspondientes de la matriz de comportamiento en los ejes de referencia del laminado (que no tienen que coincidir con los principales de la lámina, recordemos) de la lámina k -ésima y t_k el espesor de la lámina k -ésima del laminado

- Los coeficientes B_{ij} representan el acoplamiento entre la respuesta extensional (esfuerzos coplánarios al laminado) y la respuesta a flexión (que vendrá determinada por los coeficientes D). Se obtienen de la siguiente fórmula:

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k \bar{z}_k; \quad i,j = 1,2,6$$

Con \bar{z}_k la distancia de la lámina al plano de referencia del laminado.

- Los coeficientes D_{ij} representan la rigidez del laminado a flexión. Se obtienen de la siguiente fórmula:

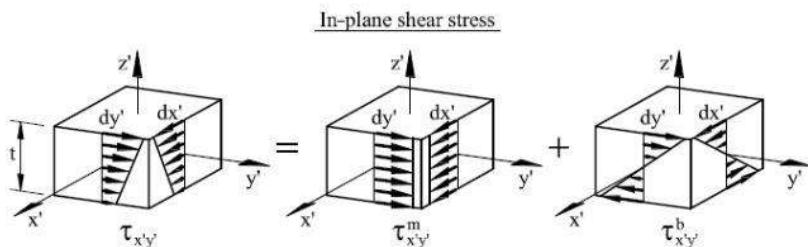
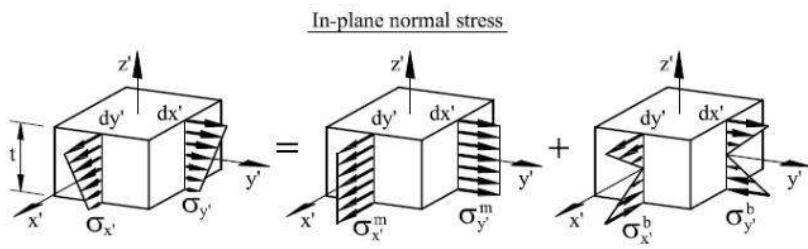
$$D_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k (t_k \bar{z}_k^2 + \frac{t_k^3}{12}); \quad i,j = 1,2,6$$

- Los coeficientes H_{ij} representan la rigidez del laminado a flexión. Se obtienen de la siguiente fórmula:

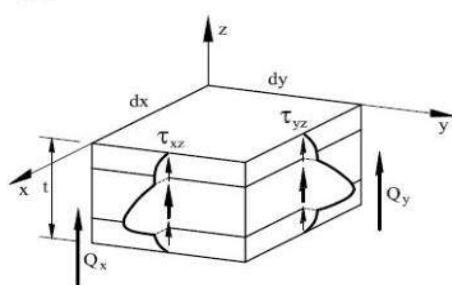
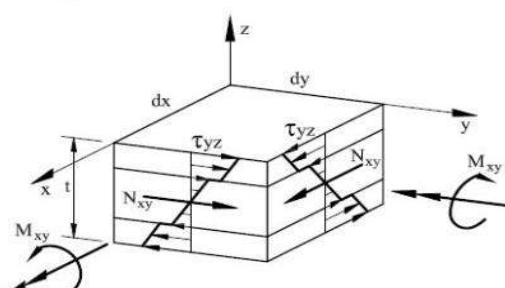
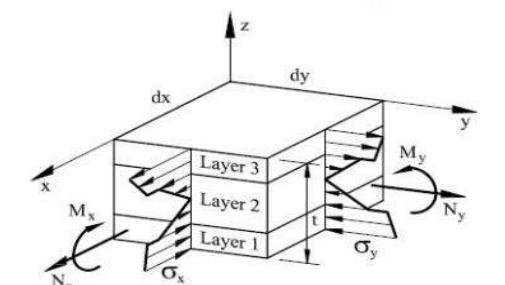
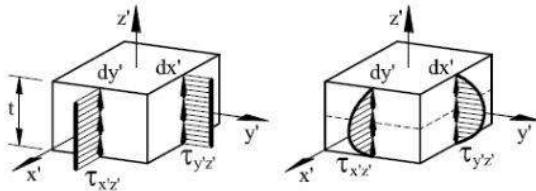
$$H_{ij} = \frac{5}{4} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij}^*)_k [t_k - \frac{4}{t^2} (t_k \bar{z}_k^2 + \frac{t_k^3}{12})]; \quad i,j = 4,5$$

De acuerdo al elemento SHELL281 que hemos escogido para el modelado de las placas, este proceso lo hace internamente ANSYS al entregarle como entrada la secuencia de laminado. Otros elementos necesitarían que se les entregara la matriz A-B-D-H de rigidez del laminado.

COMPARACIÓN ENTRE LAS TENSIONES



Reissner-Mindlin theory Exact theory



Las dos ilustraciones muestran la distribución de tensiones en sobre el espesor de una placa según la teoría de Reissner-Mindlin y la evolución de estas mismas tensiones en el que caso que el elemento sea laminado.

Evidentemente, en el laminado se presentan discontinuidades debidas a las diferentes láminas (cada una con una rigidez y una resistencia diferentes) (Oñate, 2011)

Tipos de Laminados y Consecuencias en la matriz de Comportamiento

Como veremos más adelante, ingenierilmente se busca que no se produzca ni acoplamientos entre axil y flector (laminado simétrico) ni acoplamientos entre axil y cortante (laminado que genere placa ortótropa). Ello se suele conseguir proponiendo laminados del siguiente tipo (Bank, 2006) y París y Cañas (París, et al., 2012)

- Laminados Cross-Ply: laminados cuyas direcciones de fibras vayan a 0 o a 90º. Ortótropo tanto en sus propiedades planares como de flexión. $B_{16} = B_{26} = B_{12} = B_{66} = 0$.
- Laminados Equilibrados: laminados en los que por cada ply cuya dirección de fibra sea de un ángulo Θ posea otro con una dirección de fibra de ángulo $-\Theta$.
- Laminados Cuasi-Isotrópicos : laminados en los que la

De los tres, solo el cross-ply es ortótropo tanto a flexión como a comportamiento planar.

Métodos de Producción para Materiales Compuestos

Introducción

La producción de plásticos, ligada a sectores industriales, y de plásticos avanzados con cada vez mayores compromisos estructurales dentro del mundo aeronáutico y, más recientemente, otros muchos campos como el de la ingeniería civil que nos ocupa, ha hecho de vital importancia el desarrollo de diversos procedimientos de fabricación que permitan la reducción de ciclos de producción y de bajada de costes que puedan competir en precio con materiales tradicionales.

Realizaremos una breve clasificación, presente en la literatura actual (Friberg & Olsson, 2014), de los diferentes procesos existentes, en aras de remarcar los pros y contras de cada grupo y encuadrar de una forma lógica en qué rango se van a situar aquellos que se han venido utilizando en construcción. Posteriormente, haremos una selección de aquellas alternativas consideradas para el proyecto concreto objeto de estudio, exponiendo y evaluando las características que nos han llevado a la selección del método a emplear. Se ha intentado, en la medida de lo posible.

Clasificación de Métodos

Existen en la literatura actual dos clasificaciones de los distintos métodos de producción:

- En función de la forma del molde, teniendo en cuenta si son de molde abierto (“open mould”) o de molde cerrado (“closed mould”)
- En función del grado de automatización del proceso: manual, semi-automático y totalmente automatizados.

Molde Abierto/Molde Cerrado

Molde Abierto

Generalmente, asociados a bajos coste de inversión inicial y bajas propiedades finales

- Laminado Manual (“Hand-lay-up”, también llamado “wet lay-up”)
- Laminado mediante spray (“Spray-up”)
- Enrollado de filamentos (“Filament Winding”)

Molde Cerrado

El empleo de moldes cerrados emplea un mayor grado de tecnificación que lleva consigo unos mejores acabados y propiedades y, a su vez, un mayor coste bruto, como veremos más adelante, debido a una mayor automatización

- Moldeado mediante Transferencia de Resina (conocido por sus siglas en inglés RTM: "Resin Transfer Moulding")
- Moldeado mediante Infusión de Resina (conocido por sus siglas en inglés RIM: "Resin Infusion Moulding")
- Moldeado por Inyección
- Pultrusión

Métodos según grado de automatización

Métodos Manuales

- Laminado Manual
- Laminado con Spray

Métodos Semi-Automáticos

- Moldeado mediante infusión de resina

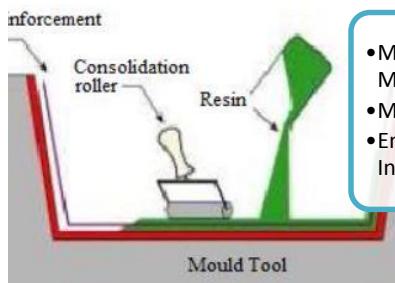
Métodos Automáticos

- Pultrusión
- Enrollado de Filamentos
- Moldeado mediante Transferencia de Resina (RTM)
- Moldeado mediante Inyección

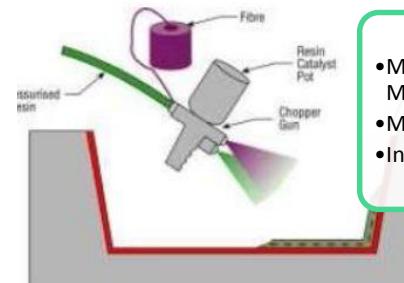
Métodos de Producción empleados en Ingeniería Civil

A continuación se exponen los métodos plausibles de elaboración de elementos de material compuesto en función de la pasarela proyectada y se explicitan las razones que han llevado a la elección de una de las siguientes alternativas propuestas. Estas son Hand lay-up, empleo de prepregs con aplicación mediante bolsa de vacío (vacuum-bag) y Vacuum-bag Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM por sus siglas en inglés; en español Moldeado mediante Transferencia de Resina Asistido por bolsa de Vacío).

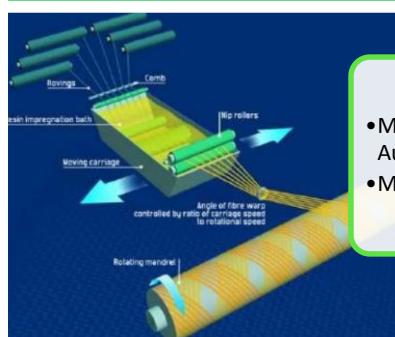
Hand lay-up



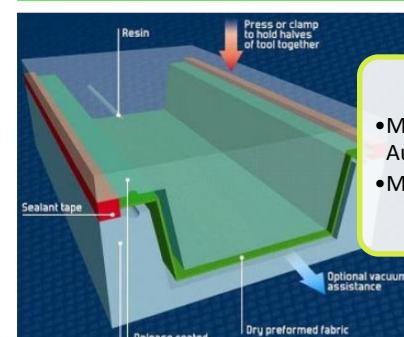
Spray-up



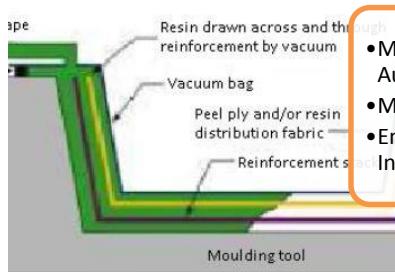
Filament Winding



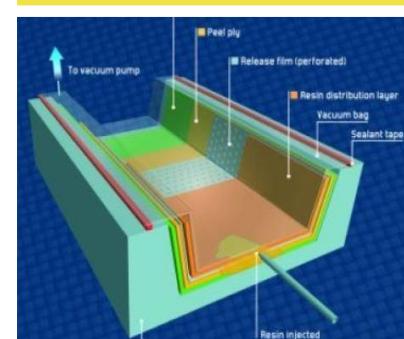
RTM



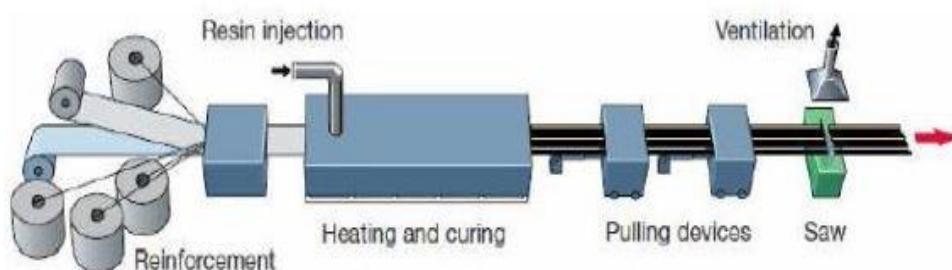
VARTM



RIM



Pultrusion



Hand lay-up

Introducción

El hand lay-up o wet lay-up (laminado manual o laminado húmedo, debido a como se aplica la resina que embebe a la fibra de refuerzo) es un proceso de moldeado abierto y generalmente en frío (a temperatura y presión ambiente) en el que se aplica por parte de los operarios la resina necesaria para aglomerar la fibra. Desde el punto de vista estricto, el hand lay up emplea únicamente la acción manual de los encargados de colocar y encolar los refuerzos.

A este método se le presupone pues un curado a temperatura ambiente, sin la aplicación de calor y/o presión, lo cual entraña con la reducida inversión inicial que se asocia. Para complementar este proceso, han aparecido variantes al mismo que vayan en el sentido de aplicar presión/alta temperatura para propiciar un curado que implique una mayor proporción de fibras.

El carácter manual de este método le permite a priori la manufactura de piezas de formas complicadas (en cierto sentido, propias de puentes) y de gran tamaño. Dado el carácter *ad hoc* en el que se encuadra el diseño de puentes en general y de pasarelas peatonales en concreto, esto puede resultar de interés. Ya que se buscan formas que se adapten a condicionantes de anchura de paso o de gálibo que varían en función de la situación del proyecto así como una aproximación estética del diseño, la necesidad de realizar formas relativamente complejas puede resultar importante. Asimismo, la falta de repetición prevista y la posibilidad de producir piezas de gran tamaño puede influir en aumentar la baja productividad que, previsiblemente se puede asociar a este método, debido a su inexistente automatización.

Fases del Proceso

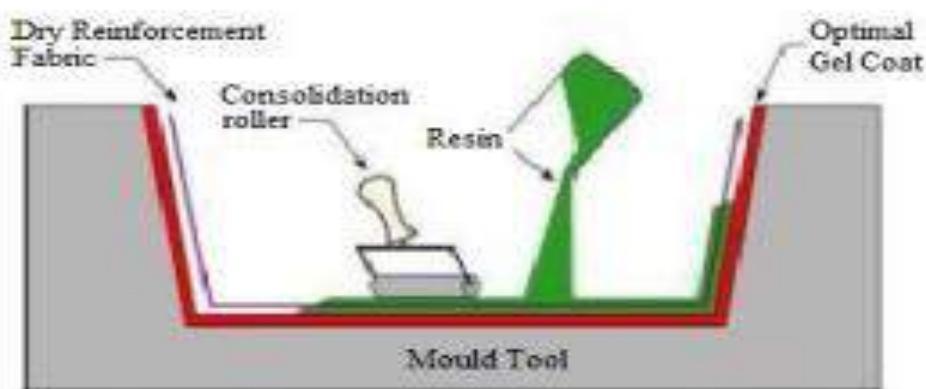
1. **Elaboración del Molde.** El Hand-lay up emplea un molde abierto que, generalmente, suele ser también de material compuesto aunque reducido a su mínima expresión dado que no son necesarias mayores características. Para la realización de este molde previo se suele preferir la madera por su coste relativamente bajo.
2. **Preparación del Molde para acoger a Matriz/Fibra.** El molde preparado se limpia de polvo y suciedad y se prepara mediante la aplicación de agentes que permitan un desmolde limpio, generalmente jabonosos o cera.

3. **Aplicación del “gel coat”.** A continuación se aplica normalmente una capa, llamada en la literatura “gel coat”, cuyo objetivo es el de servir barrera exterior protectora a la pieza así como proporcionar constituir una capa de acabado (capa “vista”) al elemento elaborado. El gel coat suele ser resina de polyester o viniléster (siendo, por norma general, un material más tixotrópico y de mejor resistencia al ataque químico que la resina que constituye la matriz del compuesto). En muchas ocasiones, el gelcoat presenta pigmentación que puede emplearse para dar color a la parte de acabado de la pieza. (Quiminet, 2006) (CFS, s.f.)

El gel coat suele ser aplicado mediante dos métodos, en función del producto empleado como tal:

- **En estado líquido.** Se aplica mediante su extensión con herramientas de barrido. Es necesario un tiempo para que cure
 - **En spray.** Se aplica el producto mediante una pistola de gel coat/spray en el que, tras alcanzar el espesor previsto, se puede proceder a la aplicación las capas principales del laminado.
4. **Curado del “gel coat”.** La capa de “gel coat” se deja curar hasta conseguir una consistencia suficiente, que sea capaz de soportar las siguientes capas del laminado. Propio, como hemos dicho anteriormente, de la aplicación de gelcoats en estado “líquido”.
 5. **Aplicación de las láminas.** Una vez se ha curado la capa de gelcoat procederemos de la siguiente manera:
 - 5.1 Se extiende una capa de la resina que va a constituir la matriz del FRP. Si es necesaria la dosificación de aditivos para favorecer el curado, estos deben de ser combinados con la resina a aplicar en función de la fórmula del fabricante. Por norma general, los aditivos empleados para promover el curado a temperatura ambiente son catalizadores como distintos peróxidos y aceleradores como el napthanato de cobalto) (Clarke, 1996)
 - 5.2 Se colocan las fibras/tejidos de refuerzo
 - 5.3 Se aplica laminado mediante extendido con cepillo/brocha/rodillo sobre las fibras
 - 5.4 Se realiza un compactado mediante un rodillo que busca consolidar la unión entre fibra y matriz así como liberar el aire ocluido, Este rodillo adopta diversos nombres según la bibliografía (“Split washer” (Clarke, 1996), “squegee” (Friberg & Olsson, 2014))
 - 5.5 Se repite el proceso las veces que sean necesarias hasta la obtención del espesor deseado

6. **Recorte de las partes sobrantes, que sobresalen del molde debido a la compactación mediante rodillo (principio de continuidad)**
7. **Proceso de curado.** Normalmente el proceso de curado se realiza a presión ambiente y también a temperatura ambiente (siempre y cuando se empleen los aditivos nombrados con anterioridad). En ciertos casos, se puede recurrir a mayores temperaturas mediante un horno o a un proceso de post-curado una vez realizado el desmolde para cambiar propiedades o adecuar la pieza al uso.
8. **Desmolde**
9. **Acabado, aplicando gelcoat a la parte internas (si procede) y a las zonas recortadas**



Calidad del Resultado

El bajo grado de calor y presión empleada en el proceso de curado implica que se alcance una proporción de fibras (V_f) relativamente baja (bastante menor del 50%, en torno al 35%). Es por ello que suelen ser necesarios espesores mayores que para otros métodos más evolucionados (pero que implican mayores costes iniciales).

Las propiedades alcanzadas no son de alto grado, debido a la falta de automatización del proceso, por lo que el compromiso estructural al que se debe someter a estas piezas debe ser medio bajo.

La manualidad del método le da versatilidad: piezas de gran tamaño y forma diversa puede ser elaboradas. Ello implica que, pese a que las propiedades alcanzadas no sean óptimas, si han sido lo suficiente como para emplear en pasarelas peatonales (aunque normalmente en la literatura se habla de este método y se le asocia casi siempre el empleo de prepregs y bolsas de vacío así de temperaturas de curado medias altas). (Primi & Paulotto, 2011)

Capacidad de Producción

Tal y como se puede observar el proceso es manifiestamente manual y nada automatizado. Cifras en torno a la capacidad de producción asociada a un equipo profesional empleando este método se encuentran en torno a la fabricación de 3 kg de pieza por hora, siendo su rango rentable de aplicación reducido, restringido a bajas producciones de piezas (entre 1 y 500). (Clarke, 1996)

Los moldes normalmente de 3 m² aunque existen moldes entre 0.5 m² y 300m² (Clarke, 1996)

Costes de Producción

De acuerdo a lo expuesto con anterioridad, la inversión inicial necesaria es mínima y se limita a útiles, materias primas, (variará en función de si pretendemos aportar un proceso de curado más energético, que generalmente no suele ser común debido a que el bajo grado de aprovechamiento del material y de automatización de acuerdo al proceso desaconseja mayores inversiones). Sin embargo, el bajo grado de automatización hace que grandes producciones sean inabordables.

Es cierto que se produce una pérdida de material relativamente alta debido a los retales que son necesarios cortar tras el compactado. Sin embargo, esto se suele compensar en comparación con otros métodos debido a los bajos costes de inversión inicial. (Clarke, 1996)

Prepregs

Introducción

Los “prepregs” (de preimpregnado) constituyen una evolución en la forma de aplicación de la resina que aglomera las fibras, ya que las fibras aparecen presentadas en forma de láminas que ya aparecen preimpregnadas de resinas. Dado que este preimpregnación se lleva a cabo desde fábrica, los plies de prepregs presentan un mayor grado de aprovechamiento del material y, de la misma manera, producen unas piezas con mejores propiedades para un menor espesor.

Es importante recalcar que, desde un punto de vista estricto, el prepreg no es un procedimiento de formación piezas compuestas sino que, tal y como hemos expresado anteriormente, es una forma de presentar el refuerzo de fibroso. Sin embargo, si es cierto que, de la misma manera que siendo coherentes con el método del laminado manual podemos entender que el método en sí mismo puede ser el

reactivo limitante a la consecución de unas mayores propiedades (y que, por tanto, el empleo de mejores materiales puede estar desaprovechado). Por tanto, de la misma manera podemos entender que el empleo de un material de mejores propiedades previas exige que, de utilizarse, se prevean emplear los medios necesarios para poder sacar rendimiento a estos materiales. Por norma general estos medios suelen ser aquellos destinados aplicar, principalmente, mayor temperatura (horno, manta de calor), mayor presión (bolsa de vacío) o ambos (autoclave). El tamaño propio de los elementos estructurales de las obras civiles hace que el paso de las piezas por hornos o autoclaves sea generalmente complicado, por lo que se tienden a preferir bolsas de vacío y mantas térmicas, capaces de extenderse y cubrir mayor superficie.

La variedad de los prepregs es tanta como combinaciones posibles haya entre refuerzos y matriz, por lo que existen muchos productos comerciales con distintas matrices termoestables, cada una con una necesidad diferente de curado. En la medida de lo posible se ha optado por explicar cómo se llevaría a cabo un procedimiento destinado a la elaboración de piezas propias de ingeniería civil, empleando por tanto los medios plausibles por tamaño (manta de calor, bolsa de vacío) y las temperaturas y presiones propias alcanzables (60-70°C y 2-5 bar)

Fases del Proceso

El procedimiento de ejecución con preprepss es relativamente parecido al procedimiento propio del laminado manual descrito en el epígrafe anterior, presentando una clara diferencia tal y como se ha explicado anteriormente: la necesidad, debido al material que se emplea de un proceso de curado que necesita:

-Obligatoriamente de un aporte de temperatura considerablemente superior a la temperatura ambiente, para que se produzca la reacción necesaria para que se produzca el curado de la resina termoestable y la aglomeración de la fibra.

-Una presión que favorezca esta reacción de curado y consiga un mayor porcentaje de fibra, con la consecuente mejora de las propiedades (longitudinales, mayoritariamente)

La necesidad de temperatura aparece evidenciada debido a las características propias de las resinas termoestables que se emplean para preimpregnar las fibras que constituyen los preprepss. Para ello definiremos a continuación los tres estados en los que, heurísticamente, se vienen a encuadrar los estados de las resinas termoestables (Federal Aviation Administration, s.f.):

- Estado A: la matriz y el refuerzo aparecen mezclados sin que se desencadene la reacción química pertinente al curado. Este estadio es propio de la resina aplicada durante el laminado manual

- Estado B: tanto matriz como fibra aparecen entremezclados y se comienza a producir la reacción de curado, aunque esta no llega a finalizar (necesidad de un mayor aporte de energía). En este estado se encuentran las resinas termoestables con las que se preimpregnan las fibras de los prepregs, adquiriendo estas una consistencia pegajosa y presentando un espesor al que presentará después del curado (parámetro que se tiende a denominar en la literatura como CPT, siglas en inglés de Cured Ply Thickness). Para evitar que se desencadene toda la reacción, a los preprepregs se les exige que se los mantenga en frío hasta su empleo (normalmente a -20°C. Estas especificaciones suelen estar indicadas dentro de lo que se viene a llamar "shelf life", "vida en estante/almacén").
- Estado C: se ha producido el curado de la matriz termoestable que aglomera a la fibra del FRP. Cada resina implica una determinada temperatura de curado (yendo desde la temperatura ambiente hasta una más elevada), aunque la gran mayoría de los preprepregs están elaborados mediante preimpregnación de resinas que necesiten una temperatura alta de curado (debido a que suelen ser las que presentan mejores características a precios razonables)

De acuerdo a lo explicado, el estado B es propio de los preprepregs comerciales existentes en el mercado (Clarke, 1996) y, por tanto, ello suele condicionar en gran medida la necesidad de implementar algún mecanismo capaz de transmitir calor e iniciar la reacción completa (Federal Aviation Administration, s.f.).

De esta manera, podemos establecer que el proceso de fabricación de elementos mediante preprepregs suele tener contar con los siguientes puntos:

1. **Elaboración del Molde.** De forma similar al proceso de Hand-lay up emplea un molde abierto de material compuesto elaborado mediante un pre-molde de madera
2. **Preparación del Molde para acoger a Matriz/Fibra.** El molde preparado se limpia de polvo y suciedad y se prepara mediante la aplicación de agentes que permitan un desmolde limpio, generalmente jabonosos o cera.
3. **Aplicación del “gel coat” o de la película de desmolde.** De características similares a los empleados en el hand lay-up
4. **Curado del “gel coat”.** La capa de “gel coat” se deja curar hasta conseguir una consistencia suficiente, que sea capaz de soportar las siguientes capas del laminado. Propio, como hemos dicho anteriormente, de la aplicación de gelcoats en estado “líquido”.

- 5. Aplicación de las láminas.** Una vez se ha curado la capa de gelcoat procederemos de la siguiente manera:
 - a. Se coloca una lámina de prepreg, **a la que se le quita el film protector trasero**
 - b. Se extiende la lámina mediante el empleo de un rodillo
 - c. Se repite el proceso hasta llegar al espesor (previo al curado) previsto las veces que sean necesarias.
 - d. Es necesaria la colocación de tejidos porosos que permita el ascenso de los materiales sobrantes tras el proceso de vacío y posterior curado
- 6. Proceso de vacío.** Se extiende sobre la parte trasera de los plies una bolsa de vacío con el objetivo de someter a presión el laminado y ejercer mediante este método la compactación (esta compactación es la que se realizaba en el hand-lay up mediante rodillos) con el objetivo de eliminar el aire ocluido y favorecer la consolidación fibra matriz. Normalmente la presión generada mediante una bolsa de vacío está en torno a los (2-5bar).
- 7. Proceso de curado. Ciclo de Calor.** Se somete al prepreg al proceso de curado típico impuesto por el fabricante para alcanzar la reacción de curado completa. De acuerdo a los medios de aplicación de calor propios de piezas de gran tamaño (mantas de calor) normalmente se suele buscar ciclos de calor cuyas temperaturas máximas esté en torno a los 60-70°C
- 8. Recorte de los retales sobrantes.**
- 9. Acabado, aplicando gelcoat a la parte internas (si procede) y a las zonas recortadas**

Capacidad de Producción

La capacidad de producción está normalmente limitada a los largos ciclo de curados exigidos (más si cabe de acuerdo a que la temperatura aportada no suele ser muy alta debido a los medios empleables), siendo el resto del proceso por norma general más rápido

Costes de Producción

La inversión inicial en materia prima y la maquinaria es mayor. Los prepgs tienen en el mercado un coste mayor que la fibra y la resina por separado, hay que tener en cuenta también el empleo de fungibles (para recortes) así como la necesidad de un medio de aporte calor (por lo general, para tableros serán mantas eléctricas) así como de bolsas de vacío. Sin embargo, es cierto que una vez comprados, la mayor automatización del proceso afecta en la mayor productividad, aunque, como hemos dicho anteriormente la capacidad de producción del proceso suele estar ligada al ciclo de curado. No obstante, estudio de costes más preciso debe de ser realizado debido a

la presencia de la necesidad obligatoria de los ciclos de curado, la aplicación de presión y su coste energético derivado.

El empleo de estos medio no llega a resultar un grandísimo salto económico y la imposibilidad de realizar grandes piezas no se ve, generalmente, excesivamente mermada; no obstante, es necesario justificar su empleo, generalmente mediante la elaboración de piezas de mayor compromiso estructural y optimización. Tal y como decíamos anteriormente, el material se aprovecha más, por lo que un estudio preciso nos puede llevar a considerar existe un balance entre el exceso de material existente en un laminado manual y el empleo de medios y materias más sofisticados.

Calidad del Resultado

Las proporciones de fibra alcanzadas mediante prepregs son del entorno 50% siendo por tanto superiores a las del hand lay-up.

Resin Transfer Moulding (RTM)/Vacuum Assisted Resin Transfer (VARTM)

Introducción

El proceso de Moldeado por Transferencia de Resina de molde constituye un método de molde cerrado automático de producción de piezas de material compuesto cuyo modelo de funcionamiento se basa principalmente en la inyección de resina a las fibras de refuerzo secas que se encuentran dentro de un molde cerrado bivalvo.

A este método también se le plantea una variante, el VARTM, que se basa en el mismo principio pero que no opta por el molde bivalvo, sino que confía en un molde rígido para la parte inferior de la pieza y una bolsa de vacío para la superior mediante la cual aportar presión y así aligerar el trabajo encomendado al ciclo de curado siendo incluso a temperatura ambiente.

Con ello se consigue eliminar el aire ocluido y reducir así el número de huecos. Ello redunda positivamente en la capacidad de conseguir un mayor porcentaje de fibra, tendiéndose por tanto a un mayor aprovechamiento de la fibra de refuerzo que es el material más caro (en el sentido de que exige de coste de mano de obra pero que parte del trabajo realizado anteriormente a mano según hand lay-up ahora se confía al difusor de resina).

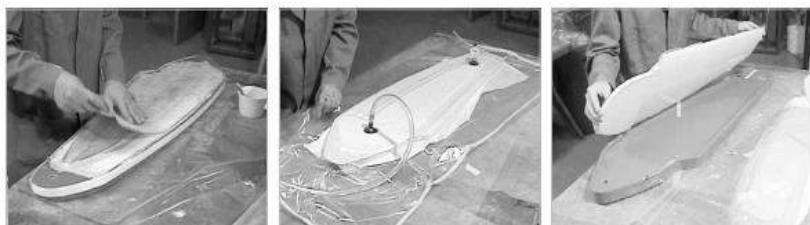


Ilustración 48: Empleo de una bolsa de vacío para la elaboración de piezas pequeñas, cortesía de West System Epoxy

La variante que se contempla del RTM, el VARTM, implica el empleo de bombas de vacío que ayuden a eliminar el aire ocluido y reducir así el número de huecos. Ello redunda positivamente en la capacidad de conseguir un mayor porcentaje de fibra, tendiéndose por tanto a un mayor aprovechamiento de la fibra de refuerzo que es el material más caro. De esta manera se consiguen espesores mayores so pena de un aparataje algo más sofisticado, aunque no de un coste sumamente elevado. De hecho, la aparición del VARTM supone una variación que implica confiar a una bomba de vacío parte del proceso que, a priori, se suponía que iba a ser exclusivamente realizada mediante la aplicación de calor, con lo que se reducen los costes considerablemente.

Realizaremos una exposición primero del RTM y después explicaremos que variantes en cuanto proceso introduce el VARTM

Fases del Proceso (RTM)

- 1. Elaboración del Molde.** Se elabora un molde, generalmente de FRP, que sea bivalvo
- 2. Preparación del Molde para acoger a Matriz/Fibra.** El molde preparado se limpia de polvo y suciedad y se prepara mediante la aplicación de agentes que permitan un desmolde limpio, generalmente jabonosos o cera.
- 3. Preparación de las fibras.** Se colocan las fibras de refuerzo de acuerdo para que queden repartidas por todo el perímetro del molde, en el orden que se consideren conveniente.
- 4. Colocación de la bolsa de vacío.**
- 5. Encendido de la bomba de vacío y expulsión del aire contenido en el molde, previa inyección de la resina.** Se mantendrá encendida hasta que se consiga eliminar todo el aire de la pieza. No se inyectará hasta que se haya expulsado todo el aire y controlada la presión a la que va a aspirar la bomba de vacío.
- 6. Mezclado de la resina.** La resina se mezcla a máquina justo antes de ser inyectada añadiéndole aquí los aditivos necesarios para controlar su viscosidad (parámetro importante para el bombeo).
- 7. Inyección de la resina.** Se produce la inyección de la resina mediante la bomba (que bombea en torno a los 5bar de presión). Para conseguir el relleno completo de la cavidad se realizan en el molde un “pinch-off”
- 8. Recorte de las partes sobrantes, que sobresalen del molde debido a la compactación mediante rodillo (principio de continuidad)**
- 9. Proceso de curado.** Normalmente el proceso de curado se realiza a presión ambiente y también a temperatura ambiente (siempre y cuando se empleen los aditivos nombrados con anterioridad). En ciertos casos, se puede recurrir a mayores temperaturas mediante un horno o a un proceso de post-curado una vez realizado el desmolde para cambiar propiedades o adecuar la pieza al uso.

10. Desmolde

11. Acabado, aplicando gelcoat a la parte internas (si procede) y a las zonas recortadas

Fases del Proceso (VARTM)

- 1. Elaboración del Molde.** Se elabora un molde, generalmente de FRP, que sea bivalvo
- 2. Preparación del Molde para acoger a Matriz/Fibra.** El molde preparado se limpia de polvo y suciedad y se prepara mediante la aplicación de agentes que permitan un desmolde limpio, generalmente jabonosos o cera.
- 3. Preparación de las fibras.** Se colocan las fibras de refuerzo de acuerdo para que queden repartidas por todo el perímetro del molde, en el orden que se consideren conveniente.
- 4. Colocación de la bolsa de vacío.**
- 5. Encendido de la bomba de vacío y expulsión del aire contenido en el molde, previa inyección de la resina.** Se mantendrá encendida hasta que se consiga eliminar todo el aire de la pieza. No se inyectará hasta que se haya expulsado todo el aire y controlada la presión a la que va a aspirar la bomba de vacío.
- 6. Mezclado de la resina.** La resina se mezcla a máquina justo antes de ser inyectada añadiéndole aquí los aditivos necesarios para controlar su viscosidad (parámetro importante para el bombeo).
- 7. Inyección de la resina.** Se produce la inyección de la resina mediante la bomba (que bombea en torno en torno a 1-5 atm de presión). Para conseguir el relleno completo de la cavidad se realizan en el molde un “pinch-off”. Esta presión suele ser suficiente para movilizar la resina y conseguir el volumen de fibra alto especificado.
- 8. Proceso de vacío.** Se extiende sobre la parte trasera de los plies una bolsa de vacío con el objetivo de someter a presión el laminado y ejercer mediante este método la compactación con el objetivo de eliminar el aire oculto y favorecer la consolidación fibra matriz. Normalmente la presión generada mediante una bolsa de vacío está en torno a 1 atm de presión.
- 9. Proceso de curado.** Normalmente el proceso de curado se realiza a presión ambiente y también a temperatura ambiente (siempre y cuando se empleen los aditivos nombrados con anterioridad). En ciertos casos, se puede recurrir a mayores temperaturas mediante un horno o a un proceso de post-curado una vez realizado el desmolde para cambiar propiedades o adecuar la pieza al uso.

10. Desmolde

11. Acabado, aplicando gelcoat a la parte internas (si procede) y a las zonas recortadas

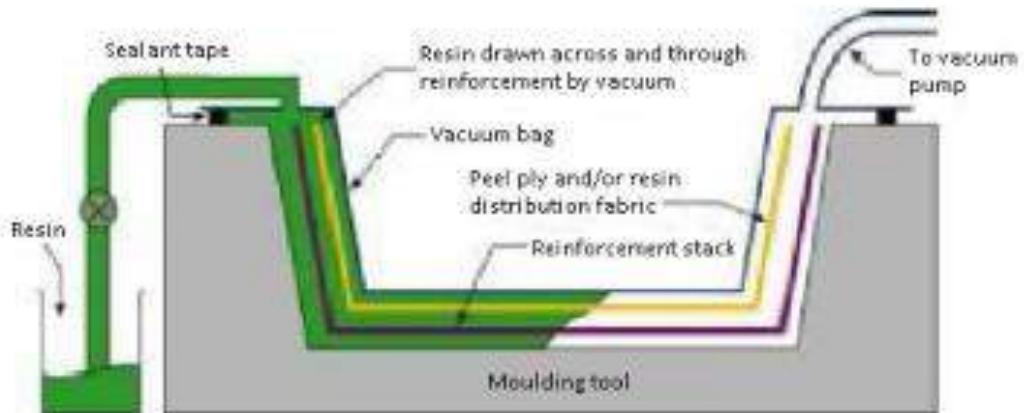


Ilustración 49: Esquema del sistema VARTM (Friberg & Olsson, 2014)

Criterios de Fallo en Compuestos

Introducción

Se va a realizar una exposición de algunos criterios de fallos existentes actualmente en la bibliografía, centrándonos principalmente en aquellos que aparecen implementados en el Mechanical APDL de ANSYS. Para ello seguiremos lo expuesto en la propia ayuda de ANSYS (ANSYS Inc., 2014) y de (París, et al., 2012)

Clasificación de tipos de Criterios

De acuerdo a lo expuesto en (París, et al., 2012) podemos dividir los criterios existentes para modelar el análisis de fallos de compuestos en dos grandes grupo, de acuerdo a qué asocien el fallo, a qué consideren estado admisible de tensiones: si al fin del comportamiento elástico lineal o a la rotura. Así podemos distinguir entre:



- Criterios de Fallo basados en el fin del comportamiento elástico lineal

Conceptualmente, se identifica con el criterio de plastificación propio de materiales isótropos. Ello hace que en muchos casos, estos criterios se constituyan como extrapolación de aquellos criterios para materiales ortotropos, generalmente de los metales (París, et al., 2012)

Entre ellos podemos encontrar, entre otros, los siguientes criterios:

- Teoría de la máxima tensión
- Teoría de la máxima deformación
- Criterio de Tsai-Hill
- Criterio de Tsai-Wu
- Criterios de Fallo basados en la predicción de la rotura

Estos métodos buscan definir el fallo del material de acuerdo a la rotura del material como compuesto o de alguna de sus partes integradoras (fibra o matriz). Estos métodos exigen la caracterización eficaz de las propiedades del compuesto y de sus partes, resaltando su no homogeneidad. Asimismo estas formulaciones beben de diversas disciplinas, tales como Elasticidad, Plasticidad, Micromecánica, Fatiga y Fractura y buscan encontrar formulaciones que expliciten los mecanismos de fallo de cada una de las partes: de la fibra y de la matriz.

Si bien este campo se encuentra en continuo desarrollo, pasamos a enumerar algunos de los criterios recogidos en (París, et al., 2012)

- Hashin (tanto para matriz como para fibra)
- Puck (tanto para matriz como para fibra)
- Knops
- Kroll

De acuerdo a lo expuesto, explicaremos aquellos criterios que consideramos de interés para el dimensionado de nuestra pasarela. Los criterios empleados de rotura a los que se ha sometido a prueba son los de Tsai-Wu y los de Puck (tanto para fibra como para matriz).

Criterios de Fallo basados en el fin del comportamiento elástico lineal

Estos criterios se pueden entender como extrapolaciones lineales y generalizadas al caso 3-D de criterios propios de materiales isótropos en los cuales se produce el fallo cuando se llega a una plastificación del material (ejemplo del criterio de Von Mises).

De esta manera, el fallo se produce cuando se supera un valor acotado a través de una combinación (generalmente cuadrática) de los esfuerzos a los que se ve sometido una pieza. Normalmente, estos criterios han venido siendo formulados para láminas biaxiales y luego se han generalizado para casos 3-D.

Recogeremos aquí, como hemos dicho los criterios de:

- Teoría de la máxima tensión
- Teoría de la máxima deformación
- Criterio de Tsai-Hill
- Criterio de Tsai-Wu

Si bien es cierto que podemos encontrar en literatura especializada tratados más holísticos y de mayor profundidad (París Carballo, 2001), hemos decidido realizar una breve explicación que nos aporte una visión general y una base teórica suficiente con la que poder interpretar los resultados obtenidos

Criterio de Máxima Deformación

Este criterio constituye una extrapolación para materiales ortótropos del criterio de Saint-Venant, formulado primigeniamente para materiales isótropos. Este criterio aparece programado en (ANSYS Inc., 2014)

Así, este criterio compara para cada dirección la deformación máxima admisible, sin establecer combinaciones cuadráticas entre los términos (París, et al., 2012). Su formulación sería la siguiente:

- **Estados de Tracción**

$$\varepsilon_{11} < X_{et} \quad \text{con } \varepsilon_{11} > 0$$

$$\varepsilon_{22} < Y_{et} \quad \text{con } \varepsilon_{22} > 0$$

$$\gamma_{12} < S_{et} \quad \text{con } \varepsilon_{22} > 0$$

Con ε_{11} y ε_{22} la deformación en la dirección longitudinal y transversal y γ_{12} la deformación tangencial o de cillazadura y X_{et} , Y_{et} y S_{et} las deformaciones máximas admisibles en las direcciones longitudinal, transversal y de cizalla, respectivamente.

- **Estados de Compresión**

$$|\varepsilon_{11}| < X_{et} \quad \text{con } \varepsilon_{11} < 0$$

$$|\varepsilon_{22}| < Y_{et} \quad \text{con } \varepsilon_{22} < 0$$

$$\gamma_{12} < S_{et} \quad \text{con } \varepsilon_{22} < 0$$

La deformación tangencial γ_{12} , así como para su tensión asociada σ_{12} ya aparece en valor absoluto, no se ve afectada por el signo (París, et al., 2012).

Aplicando las ecuaciones de comportamiento y la formulación del tensor de tensiones para ejes arbitrarios y suponiendo un comportamiento elástico lineal (París, et al., 2012) se puede llegar a la expresión del criterio para fibras cuya orientación posea un ángulo con respecto a los ejes longitudinal/transversal:

$$\sigma_x < \frac{X_t}{\cos^2 \vartheta - v_{12} \operatorname{sen}^2 \vartheta} \quad \text{o} \quad |\sigma_x| < \frac{X_c}{\cos^2 \vartheta - v_{12} \operatorname{sen}^2 \vartheta}$$

$$\sigma_x < \frac{Y_t}{\operatorname{sen}^2 \vartheta - v_{21} \cos^2 \vartheta} \quad \text{o} \quad |\sigma_x| < \frac{Y_c}{\operatorname{sen}^2 \vartheta - v_{21} \cos^2 \vartheta}$$

$$|\sigma_x| < \frac{S_t}{\operatorname{sen} \vartheta \cos \vartheta}$$

En el que se introduce por ello el coeficiente de Poisson

Criterio de Máxima Tensión

Este criterio consiste en la extrapolación para materiales ortótropos del criterio de Rankine, formulado originariamente para materiales isótropos. El material no fallará si y solo sí no se cumple ninguna de estas desigualdades:

- **Estados de Tracción**

$$\sigma_{11} < X_t \quad \text{con } \sigma_{11} > 0$$

$$\sigma_{22} < Y_t \quad \text{con } \sigma_{22} > 0$$

$$|\sigma_{12}| < S$$

- **Estados de Compresión**

$$|\sigma_{11}| < X_c \quad \text{con } \sigma_{11} < 0$$

$$|\sigma_{22}| < Y_c \quad \text{con } \sigma_{22} < 0$$

El sentido de σ_{12} es inmaterial (París, et al., 2012).

Como aproximación fruto de la comparación entre resultados teóricos y experimentales, para casos de carga que formen un ángulo con los ejes principales del laminado, podemos emplear las siguientes fórmulas simplificadas (París, et al., 2012).

$$\sigma_x < \frac{X_t}{\cos^2 \theta} \quad \text{ó} \quad |\sigma_x| < \frac{X_c}{\cos^2 \theta}$$

$$\sigma_x < \frac{Y_t}{\sin^2 \theta} \quad \text{ó} \quad |\sigma_x| < \frac{Y_c}{\sin^2 \theta}$$

$$|\sigma_x| < \frac{S}{\sin \theta \cos \theta}$$

Criterio de Tsai-Wu

El criterio de Tsai-Wu constituye una generalización de tipo cuadrática para materiales compuestos de la interacción de criterios de fallo de materiales isótropos más conocidos. De esta manera, este criterio propone una forma de cuantificación del fallo por interacción de tensiones en distintas direcciones.

Más concretamente, el criterio de Tsai-Wu procede de una generalización del criterio anterior de Tsai-Hill al cual añade términos que no incluía. Este criterio de Tsai-Hill se basa en la plastificación de Hill para materiales anisótropos. El criterio propuesto por Hill para materiales anisótropos es una extrapolación del criterio de Von-Mises para

isótropos. A este respecto, cabe decir pues que el criterio de Tsai-Hill no puede llamarse, por tanto, de la energía de distorsión. (París, et al., 2012)

Expresada en notación de índices, el criterio de Tsai-Wu para un sólido tridimensional tiene a siguiente forma

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j |_{i,j=1 \text{ a } 6} = 1$$

Siendo F_i y F_{ij} estarán relacionadas con las resistencias del material asociadas a direcciones específicas y σ_i es la componente i del pseudovector de tensiones ($\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{13}, \sigma_{23}, \sigma_{12}$). De esta manera, el criterio aparece determinado por 42 constantes para, como hemos dicho, un sólido tridimensional.

Dado que, normalmente, los materiales compuestos suelen emplearse en forma de láminas, la caracterización de esta ecuación para el caso plano resulta de interés, siendo su expresión la que sigue, siempre y cuando se desprecien términos de menor interés como la interacción entre tensiones normales y tangenciales:

$$F_1 \sigma_{11} + F_2 \sigma_{22} + F_6 \sigma_{12} + F_1 \sigma_{11}^2 + F_{22} \sigma_{22}^2 + F_{66} \sigma_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_{11} \sigma_{22} = 1$$

Los coeficientes F_i se determinan particularizando el criterio para casos concretos de valores conocidos (París, et al., 2012). De esta manera, caracterizaremos para las situaciones propias de los ensayos de caracterización del material: ensayo de tracción (en la dirección de la fibra, materiales ortótropos, dirección principal), ensayo de compresión (caso similar), en la dirección transversal y ensayos biaxiales (o ensayos fuera de los ejes principales).

De esta manera, caracterizaremos para cada estado:

- Estado de tracción ($\sigma_1 = X_t, \sigma_2 = \sigma_{12} = 0$)

De esta manera, la ecuación para estado biaxial queda:

$$F_1 X_t + F_{11} X_t^2 = 1$$

- Estado de compresión ($\sigma_1 = X_c, \sigma_2 = \sigma_{12} = 0$)

$$F_1 X_c + F_{11} X_c^2 = 1$$

Por lo que el valor de los coeficientes F_1 y F_{11} (dos incógnitas para dos ecuaciones):

$$F_1 = \left(\frac{1}{X_t} \right) + \left(\frac{1}{X_c} \right)$$

$$F_{11} = - \left(\frac{1}{X_t X_c} \right)$$

Con $X_t > 0$ y $X_c < 0$

- Tracción y compresión en la dirección transversal (la forma operativa y los resultados son análogos)

$$F_2 = \left(\frac{1}{Y_t} \right) + \left(\frac{1}{Y_c} \right)$$

$$F_{22} = - \left(\frac{1}{Y_t Y_c} \right)$$

- Dado que σ_{12} posee independencia del signo en la tensión tangencial admisible, los coeficientes toman el valor:

$$F_6 = 0$$

$$F_{66} = \left(\frac{1}{S^2} \right)$$

- Ensayo biaxial (o con una carga fuera de los ejes principales, $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma$ y $\sigma_{12} = 0$):

Aplicamos a la ecuación del criterio el estado de cargas, quedando:

$$(F_1 + F_2)\sigma + (F_{11} + F_{22} + 2F_{12})\sigma^2 = 1$$

Sustituyendo el resto de valores calculados en la ecuación, despejamos el valor de F_{12}

$$F_{12} = \frac{1}{2Z^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) Z + \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) Z^2 \right]$$

Con Z la resistencia ante estados biaxiales de la lámina en cuestión

El desarrollo para sólidos en tres dimensiones es similar pero incluyendo los términos restantes de la ecuación general expuesta anteriormente. En (Barbero, 2008) se expone cómo queda el criterio en 3-D de la misma forma en la que lo recoge (ANSYS Inc., 2014), agrupando los términos no lineales con la tensión en un coeficiente (A) y los lineales con la misma, en otro (B). De esta manera, el criterio de fallo queda

$$I_F = \frac{1}{-\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{1}{A}}}$$

En ANSYS, la implementación del criterio de fallo de Tsai-Wu aparece realizada en dos formas, siendo una mediante el tipo de fallo TWSR (Tsai-Wu Strength Ratio) y otro el TWSI (Tsai-Wu Strenght Index). De acuerdo a lo expuesto en (Barbero, 2008), se prefiere el TWSR.

Criterios de Fallo basados en la predicción de la rotura

Estos criterios buscan caracterizar la rotura del material y, de esta manera, tienen en cuenta la naturaleza compuesta del mismo, previendo pues tanto la rotura de la fibra como de la matriz y concibiendo mecanismos distintos de rotura para ambos.

Criterio de Puck

Tal y como hemos explicado, el criterio de Puck prevé los fallos de la fibra y de la matriz mediante mecanismos distintos que atienden a la física propia de la rotura de ambos de otros elementos. (París, et al., 2012). En este sentido, es similar a otros criterios también presentes en el paquete de elementos finitos ANSYS (ANSYS Inc., 2014) como podrían ser los de Hashin (1973 y 1980) o los de LaRC3 y LaRC4.

Criterio de Puck para la fibra

El criterio de Puck que afecta a la fibra no deja de ser un criterio de fallo de máxima tensión para la fibra, por el cual se producirá el fallo de la misma siempre y cuando se alcance la máxima tensión admisible de la misma. Ello, expresado matemáticamente toma la siguiente formulación (París, et al., 2012):

$$\sigma_{f1} = X_{fT} \text{ con } \sigma_{f1} > 0$$

$$\sigma_{f1} = -X_{fc} \text{ con } \sigma_{f1} < 0$$

Siendo el valor de σ_{f1} el de la tensión en la dirección de la fibra y X_{fT} y X_{fc} la resistencia a tracción y compresión, respectivamente, de las fibras. Suponiendo un comportamiento elástico lineal (aproximación pertinente en diseño debido al escaso comportamiento plástico del composite), esta expresión puede poner en función de las deformaciones. Asimismo, asumiendo que el mecanismo de fallo en compresión se corresponde con un mecanismo de inestabilidad local de micropandeo (Bank, 2006) (París, et al., 2012) (Kollár & Springer, 2003) (Friberg & Olsson, 2014), se considera necesario el hecho de tener en cuenta la componente σ_{12} ya que esta puede producir efectos de micropandeo.

De esta manera, se imputa un término corrector para el fallo en compresión, quedando la expresión (París, et al., 2012):

$$\frac{1}{\varepsilon_{1T}} \left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f2}} m_{\sigma f} \sigma_2 \right) = 1, \text{ para } \sigma_{f1} \geq 0$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{1C}} \left| \left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f2}} m_{\sigma f} \sigma_2 \right) \right| + (10\gamma_{12})^2 = 1, \text{ para } \sigma_{f1} < 0$$

Criterio de Puck para la matriz

El criterio de Puck que se aplica a la matriz busca asimilar el comportamiento de la matriz al propio de un material frágil, modelado asiduamente mediante el modelo de Mohr-Coulomb.

Conceptualmente, el criterio estima oportuno que el fallo se produce únicamente por las tensiones contenidas dentro del plano de fallo, determinándose dicho plano (su inclinación) en función del estado tensional.

El criterio de Puck contempla tres modos de fallo de la matriz, de acuerdo al mecanismo y plano de fallo que origine el estado de tensiones. Los modos de fallo de la matriz que son considerados son tres, a saber:

- Modo A: fallo de la matriz en tracción
- Modo B: fallo de la matriz en compresión, con un ángulo de plano de rotura de valor $\theta = 0^\circ$ (dominio de σ_2 frente a σ_{12})
- Modo C: fallo de la matriz en compresión, con un ángulo de plano de rotura de valor $\theta \neq 0^\circ$ (dominio de σ_{12} frente a σ_2)

El criterio de Puck para modelizar el fallo se basa, como hemos dicho, en la aplicación de un modelo basado conceptualmente en el criterio para materiales frágiles y la introducción de una serie de parámetros de base empírica, que ajusta mejor los resultados asociados al modelo.

La expresión del criterio de fallo para el modo A de rotura de la matriz

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{12}}{R_\perp^{(+)A}} \right)^2 + \left(1 - \frac{p_{\perp||}^{(+)}}{R_\perp^{(+)A}} R_\perp^{(+)A} \right)^2 \left(\frac{\sigma_2}{R_\perp^{(+)A}} \right)^2 + \frac{p_{\perp||}^{(+)}}{R_\perp^{(+)A}} \sigma_2} = 1$$

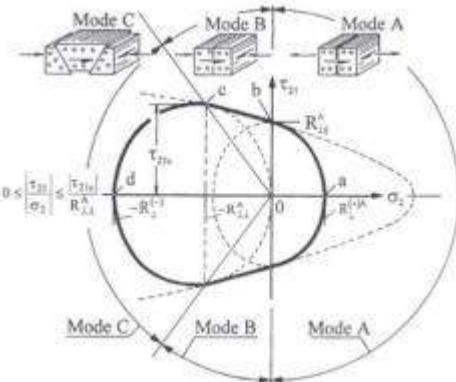


Ilustración 50: Sección transversal de la superficie de fallo de Puck (París, et al., 2012)

Los símbolos expresados denotan:

- $p_{\perp\parallel}^{(+)} :$ pendiente de la curva de fallo cuando σ_2 es mayor igual que cero en el punto $\sigma_2 = 0$. Son valores propios propuestos en (París, et al., 2012) 0.3 para fibra de vidrio y 0.35 para fibra de carbono
- $R_{\perp\parallel}^A :$ resistencia a cizalladura transversal, S_{12}
- $R_{\perp\parallel}^{(+)} :$ resistencia a tracción en la dirección transversal. Y_t

La expresión del criterio de fallo para el modo B de rotura de la matriz

$$\left(\frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{nl}}{R_{\perp\perp}^A}\right)^2 + 2\left(\frac{p}{R}\right)\sigma_n = 1, \text{ con } \sigma_n < 0$$

Particularizándola para el plano de fallo con $\theta = 0$ (cosa que se observa experimentalmente)

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{12}}{R_{\perp\parallel}^A}\right)^2 + \left(\frac{p}{R}\right)^2 \sigma_2^2} + \left(\frac{p}{R}\right) \sigma_2 = 1, \text{ con } \sigma_2 < 0$$

- $R_{\perp\parallel}^A :$ resistencia a cizalladura transversal, S_{12}
- $\frac{p}{R} = \frac{p_{\perp\parallel}^{(-)}}{S_{12}}$

Tomando según Puck la constante $p_{\perp\parallel}^{(-)}$ los valores 0.25 para fibra de vidrio y 0.3 para la fibra de carbono.

Para la determinación del plano tensional se toma una interacción de tipo cuadrática (en la que el sentido de la tensión tangencial carece de interés para la determinación del fallo).

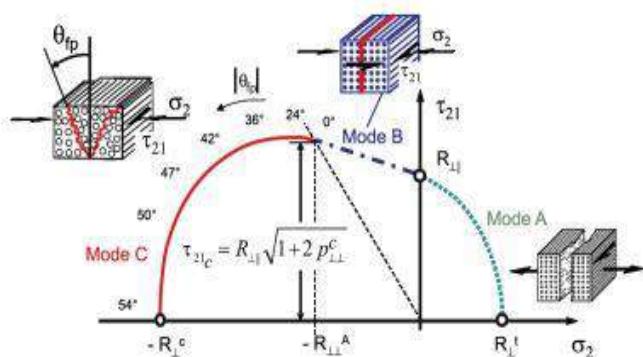


Ilustración Sección transversal de la superficie de fallo de Puck (París, et al., 2012) (Vallecillos Portillo, 2015)

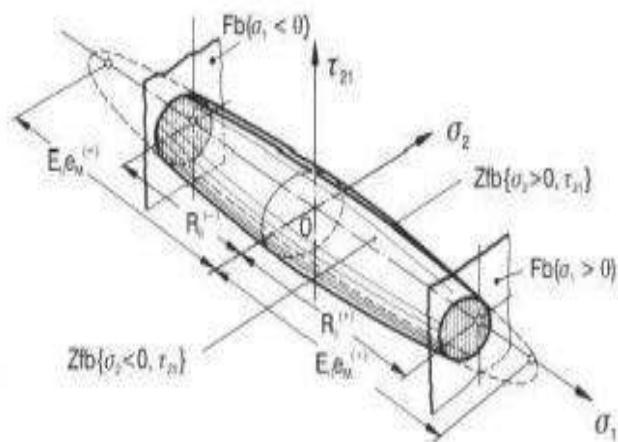


Ilustración 51: "Cigarrillo de Fractura de Puck". Representación del criterio bidimensional (Vallecillos Portillo, 2015)

Bloque 2: Diseño Pasarela Híbrida en Avda. del mar, Almería

Introducción al bloque

En este bloque se explican los procedimientos y resultado así como las conclusiones obtenidas para el diseño y dimensionado de la pasarela de proyecto.

Se ha hecho especial énfasis en resaltar tanto el trabajo realizado con el compuesto así como los elementos auxiliares propios de la misma

Antecedentes

Renovación de la Conexión entre barrios del Centro Histórico

En este apartado explicaremos sucintamente cual es el ámbito en el que se enmarca el emplazamiento del proyecto, los condicionantes ligados a dicho emplazamiento, las implicaciones que tienen a nivel de diseño y cálculo y el objetivo a cumplir: la Renovación de la Conexión entre barrios anexos del Centro Histórico y que participan de este.

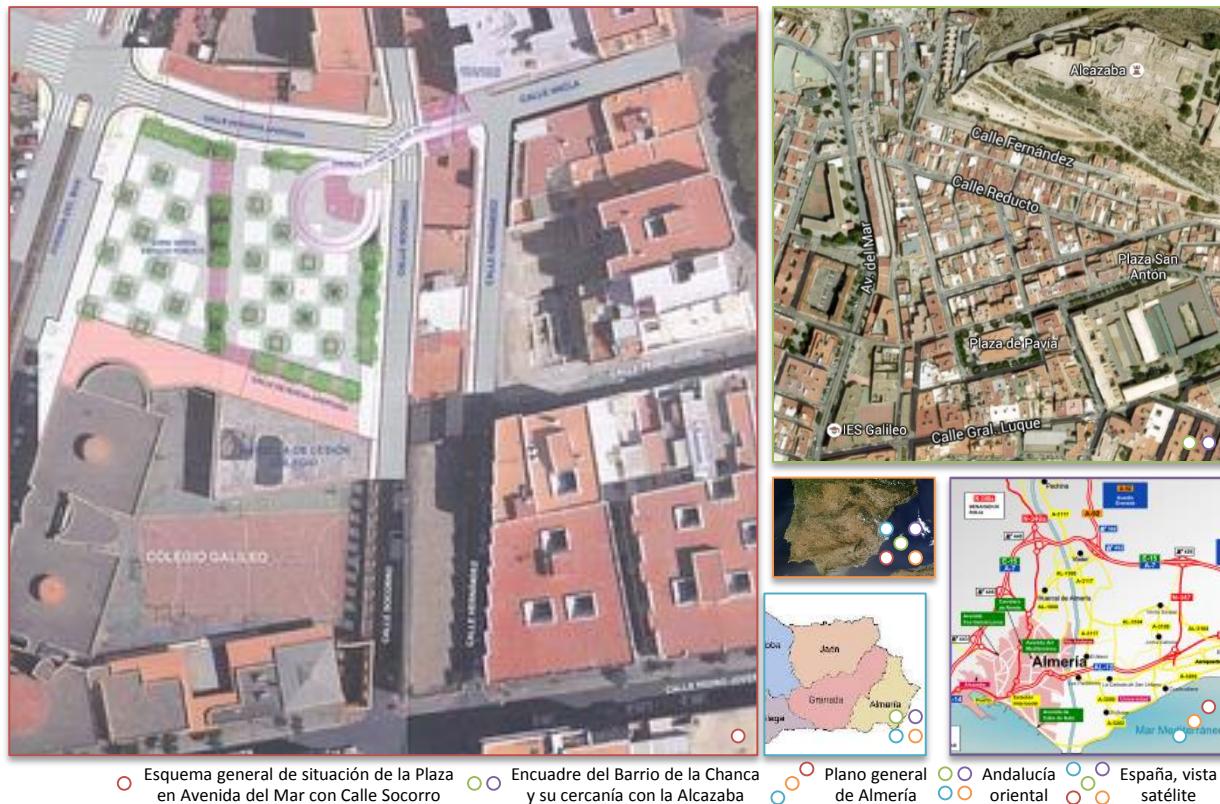


Ilustración 52: Esquema de situación de la pasarela en Avda. del Mar, en los terrenos anexos al IES Galileo desde 1 (encuadre con la pasarela proyectada) hasta 5 (encuadre nacional)

Conexión actual del barrio de Pescaderías y la Chanca con Plaza de Pavía

El proyecto se enmarca dentro de la renovación del centro histórico previsto por el Plan de Aglomeración Urbana (en adelante, PGOU) de la ciudad de Almería. Dentro de estas actuaciones, se concibe como necesaria la doble actuación dentro de una zona que sirve de nexo de unión entre barrios propios del centro histórico de la ciudad de Almería, relativamente cercanos a la Alcazaba: Pescaderías, la Chanca y Plaza de Pavía



Ilustración 53: Actual pasarela que conecta los barrios de Pescaderías con la Plaza Pavía

Ambos barrios se han encontrado tradicionalmente unidos mediante una pasarela peatonal que cruzaba a nivel la Avenida del Mar, conectando el desnivel existente entre ambos barrios. De forma precisa, la pasarela une la calle Juan Goytisolo con la calle Ancla. Su trazado recto implica la necesidad de una gran longitud para salvar dicho desnivel mediante la existencia de una pendiente que hiciera cómodo el tráfico a los viandantes. La concepción de la pasarela tuvo lugar hace cuarenta años, siendo su motivación el suponer una vía de escape para los vecinos ante las crecidas de una rambla cercana, que dejaba incomunicada ambas zonas. El reacondicionamiento de la pertinente, hace que su función a día de hoy se vea reducida a la conexión de los barrios.

Actualmente la situación de la pasarela achaca el paso de los cuarenta años (acrecentado por el clima marítimo de la ciudad). De acuerdo al Excelentísimo Ayuntamiento de Almería

(en adelante, La Propiedad), la pasarela actual además de ser causa de problemas para los vehículos de servicios urbanos y seguridad, entraña problemas relacionados con la delincuencia. Dentro del planeamiento previsto por la Propiedad, el objetivo del planeamiento busca poner en valor los terrenos anexos al Instituto de Educación

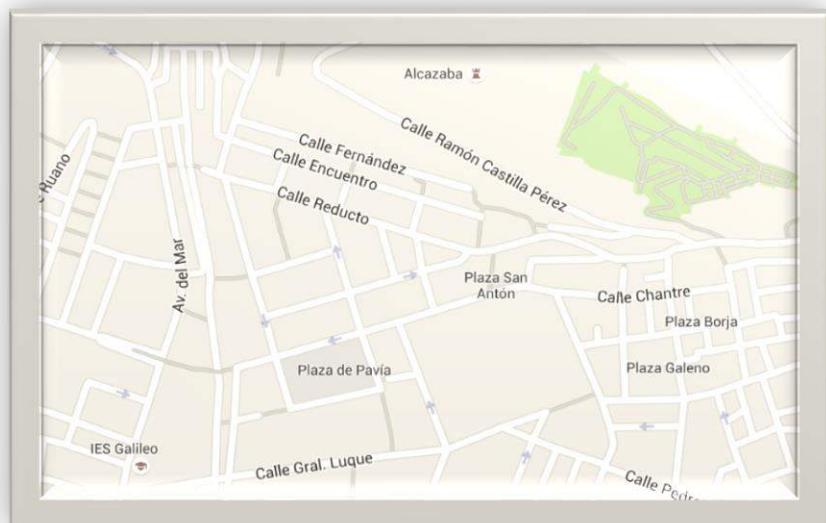


Ilustración 54: Callejero de Almería en el que quedan emplazados los puntos de interés que se buscan poner en valor: los terrenos en desuso sitos en Avda. del Mar, anexos al IES Galileo, el barrio deprimido de la Chanca y la Plaza de Pavía. Esta puesta en valor busca mejorar las zonas anexas a la Alcazaba (noreste)

Secundaria Galileo, cuyo estado ha sido deplorable en los últimos años, mediante la construcción de una plaza.

Conexión prevista mediante la ejecución del proyecto.

De esta manera, la construcción de la nueva pasarela objeto de este proyecto supondrá un elemento que dote a la plaza de nueva construcción, creando una visión de amplitud dentro de las congestionadas calles de la zona, constituyendo un nexo de unión entre la importante Plaza de Pavía y la Plaza prevista, dando lugar a una sinergia importante desde el punto de social, urbanístico y económico.



La nueva pasarela descongestionará tanto peatonal como visualmente la Avda. del Mar, permitirá un tráfico más fluido y la apertura de las calles Juan Goytisolo y Ancha al tránsito amplio ante la liberalización de espacios frente a los ocupados por la pasarela actual, seguirá siendo un punto privilegiado para vista de la Alcazaba de Almería y vendrá a resolver la problemática expuesta por los representantes de los barrios ante la falta de comunicación que pudiera suponer la supresión de la pasarela actual sin el pertinente restablecimiento del servicio de tránsito

Ilustración 55: Esquema de la renovación de la zona, con la pasarela conectando ambas plazas (la de pavía y la de nueva construcción)

La puesta en valor de estas zonas aporta asimismo una confluencia con zonas cercanas como la Plaza de Pavía, creando una sinergia importante entre plazas, aporta la vitalidad necesaria a dos zonas de especial importante de casco antiguo de la ciudad, más cercano a la singular Alcazaba.

Análisis de alternativas

Para cumplir con los objetivos predisuestos con anterioridad, se analizaron cuatro alternativas teniendo en cuenta dos variables conceptuales: que el trazado de la pasarela fuese recto o curvo y que la pasarela se concibiera como una pasarela mixta (viga de acero, losa de hormigón) o híbrida (viga de composite, losa de hormigón). El objeto de este proyecto es el desarrollo del diseño de una de las cuatro alternativas conceptuales propuestas: la opción de la pasarela híbrida con trazado helicoidal. Asimismo, en este estudio de alternativas orientativo se tienen en cuenta

Esta decisión corresponde al ámbito de proyecto elegido, el cual aparece recogido en el título del Trabajo Fin de Grado: "Diseño de una pasarela híbrida". El proyecto parte con la intención de realizar una alternativa que emplee las mejores características específicas (por unidad de peso) de los compuestos a una pasarela mixta de trazado curvo elaborada a nivel de anteproyecto por uno de los tutores de este trabajo, D. Javier Fernando Jiménez Alonso. En ese sentido el trazado se ha mantenido de acuerdo al del proyecto original y se ha buscado realizar, de acuerdo al ámbito del trabajo, un diseño que adopte dicho trazado.

Realizaremos a continuación una exposición de estas cuatro alternativas propuestas y de sus posibles pros y contras.

Alternativa 0: No actuación

Alternativa 1: Pasarela mixta con trazado recto

Alternativa 2: Pasarela híbrida con trazado recto

Alternativa 3: Pasarela mixta con trazado curvo

Alternativa 4: Pasarela híbrida con trazado curvo

Alternativa 0: No actuación

Actualmente, existe relativamente cerca una pasarela mixta de trazado recto cuyo estado es deficiente de acuerdo a la Propiedad por las razones que se citan a continuación:

-El estado de la pasarela es deficiente (armaduras corroídas vistas), que vulnera el E.L.S de fisuración. El ambiente marino agresivo propio de la zona influye negativamente en la durabilidad de la misma.

-Su trazado recto implica que, para mantener una pendiente confortable, necesite de una longitud considerable.

-Esta longitud deshabilita una serie de terrenos y estrecha enormemente la conexión a nivel con la Avenida del Mar.

-Estos pasajes angostos generados por la actual pasarela han servido de aliciente para fomentar atracos y otras actividades delictivas en una zona ya de por sí deprimida.

-Asimismo, las pilas de la actual pasarela condicionan el tráfico de vehículos en la Avenida del Mar, llegando a generar incluso accidentes de tráfico

-La pasarela actual condiciona la visibilidad y congestionada visualmente la avenida.

-La pasarela no cumple con las características propias de reclamo turístico como punto mirador para observar la panorámica del complejo monumental de la Alcazaba de Almería.

No obstante es cierto que:

-La construcción de una nueva pasarela y la demolición de la existente implica una serie de trabajos que alteran tanto el tráfico en la Avda. del Mar así como el tránsito peatonal

-La obra implica un coste que la propiedad busca optimizar y cuyo presupuesto puede resultar demasiado ambicioso para los objetivos asumidos

Alternativa 1: Pasarela mixta con trazado recto

El trazado recto de una nueva pasarela mixta implica poca variación con respecto a la situación actual, con lo cual se le achacan los mismos pros y contras que a la pasarela actual, añadiéndole los costes de demolición y de nueva construcción de la pasarela.

Alternativa 2: Pasarela híbrida con trazado recto

Ídem que la anterior, a lo que sumamos el mayor coste del compuesto, pero sus mejores capacidades específicas.

Alternativa 3: Pasarela mixta con trazado curvo

La pasarela mixta con trazado curvo fue la propuesta aportada en el proyecto original. De acuerdo a las asunciones realizadas dentro del marco de nuestro trabajo, tanto la pasarela mixta como la híbrida comparten trazado. La posición de las pilas sí presentan una sensible variación (que ha sido objeto de estudio, siendo las conclusiones

obtenidas expuestas en epígrafes posteriores) dado que la solución original preveía tres pilas.

Dos de las pilas estaban condicionadas en su posición por una vía de tráfico rodado y la tercera estaba situada en el centro de la hélice principal, sirviendo de mástil para una serie de tirantes que penden de ella y tiran de la viga, rigidizándola.

La solución mediante mástil y tirantes supone una alternativa costosa, por lo que el mayor coste de los compuestos puede salir compensado con la supresión de mástiles y atirantamientos. Además, como veremos más adelante, la entrada en juego de los tirantes provoca, como las cargas distribuidas del peso y de la sobrecarga de uso, una doble torsión sobre el tablero. La supresión de esta acción sería beneficiosa en aras de no incorporar más términos de torsión.

El objetivo de emplear el material compuesto consiste en prescindir de estos tirantes dados las mejores capacidades específicas (por unidad de peso) de estos materiales. Ello es por tanto un objetivo a cubrir que conseguimos mediante el diseño establecido.

Alternativa 4: Pasarela híbrida con trazado curvo

Esta alternativa es la elegida debido a que se cumplimenta la capacidad de generar un trazado que permita unas pendientes reducidas, una forma estética agradable y una reducción considerable de peso que redunda en una optimización de subestructuras y una mejora muy sustancial en cuanto a criterios de durabilidad.

Elección de trazado final

De acuerdo a los objetivos propuestos, la unión entre ambos barrios mediante una pasarela se decidió llevar a cabo mediante una pasarela cuyo trazado curvo, helicoidal, pasamos a continuación a explicar.

La pasarela proyectada constituye un trazado helicoidal rematado con un tramo casi recto de descansillo y de bajada.

Justificación del trazado de la pasarela

El trazado tanto en planta como en alzado de la pasarela en cuestión aparece determinado por condicionantes normativos, conceptuales y estéticos que pasamos a explicar a continuación.

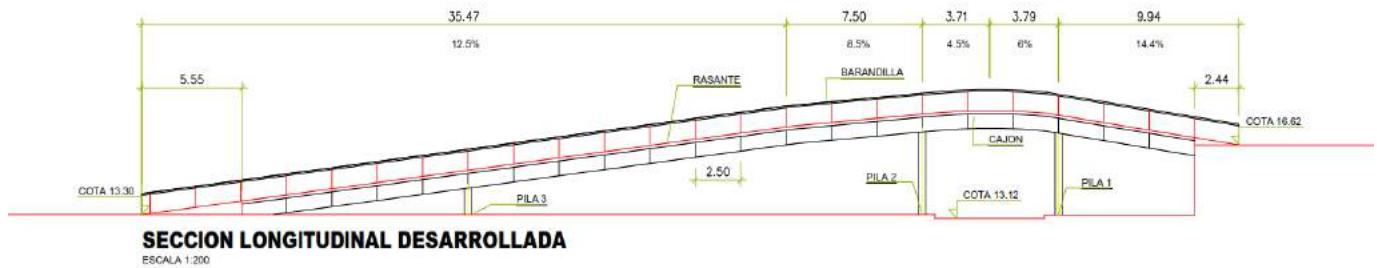


Ilustración 56: Esquema del alzado (desarrollado) de la pasarela sita en Avda. del mar, Almería

De acuerdo a la posición de las pilas, la pasarela se define estructuralmente como una viga continua de cuatro vanos. El trazado helicoidal de la sección, curvo, implica unas consideraciones estructurales que explican en gran medida la importancia del torsor en estas estructuras y que se explica en epígrafes posteriores.

Objetivos de proyecto

El proyecto supone, conceptualmente, la unión entre dos barrios entre los cuales existe un desnivel de 3.30 metros. Asimismo, la Propiedad busca poner en valor unos terrenos situados contiguamente al cambio de rasante y actualmente en desuso y mal estado próximos al IES Galileo, dando lugar a una plaza pública. Ello implica que el trazado de la pasarela debe desarrollarse íntegramente en esta parcela.

Asimismo, esta pasarela se considera por parte de la propiedad como un elemento que debe gozar un atractivo visual y paisajístico motivada por dos razones: la pasarela debe servir como elemento renovador de estos barrios deprimidos del casco histórico y encuadrar con reforma que aportan los nuevos equipamientos previstos en la plaza y, asimismo, continuar siendo un punto de interés turístico debido a que la posición que ocupan los barrios en los que se prevé la actuación y, concretamente, en las que se sitúa la pasarela objetivo del proyecto, son conocidos por ofrecer una de las visuales más completas y codiciadas del Monumento histórico y artístico de la Alcazaba y Murallas del Cerro de San Cristóbal (generalmente conocido como Alcazaba de Almería).

Condicionantes normativos

De acuerdo al Artículo 19 del Documento técnico sobre el Decreto Andaluz de Accesibilidad de abril de 2012 cuyo objetivo se refiere a Puentes y pasarelas se expone, se expone que estas estructuras deberán estar conectados con un itinerario peatonal

accesible y deberán cumplir los condicionantes generales expuestos en el artículo 15 de condicionantes generales que pasamos a relatar:

-Es necesario, para garantizar el giro, cambio de dirección y cruce de personas garantizar un ancho mínimo de 1.8 metros, reducible 1.5 metros en zonas urbanas consolidadas.

-Al ser peatonal, se desestima diferencia entre acerado y calzada y se propone una solución en la que se excluya resaltos y escalones aislados

-Las restricciones a cumplir en cuanto a pendientes de acuerdo a la norma son de máximos del 6% de pendiente longitudinal y del 2% de pendiente transversal de acuerdo al (Consejería para la Igualdad y el Bienestar Social, 2012). Sin embargo, en una entente con la Gerencia de Urbanismo se llegó a una solución de compromiso que permitió mayores pendientes para reducir la longitud (y por tanto coste) de la pasarela, considerándose que las pendientes eran admisibles.

Posición de las Pilas

Tal y como hemos expuesto anteriormente, la posición de las pilas ha sido objeto de estudio y se ha observado cuáles son los distintos factores que afectan a su colocación y, en función de ellos, cuál ha sido la solución de compromiso a la que se ha llegado. En el esquema siguiente se muestra la colocación propuesta para las pilas.



Ilustración 57: Esquema del posicionado de las pilas

Recordemos que en la solución propuesta existen tres pilas, siendo dos de ellas las consideradas como “pilas altas” (dotadas cada una de dos apoyos de neopreno y, por tanto, creando mecanismos para el reparto de la torsión) y una tercera pila, considerada como “pila corta”

Como dijimos anteriormente, hemos considerado fija la posición de las pilas de mayor tamaño, aquella sobre las que se apoya el descansillo tras las rampas de nuestra pasarela. Esta posición aparece condicionada por la vía de tráfico rodado, considerándose en todo caso necesaria la colocación de las dos pilas. Dicha posición ha sido idéntica a la prevista en el anteproyecto original.

La posición de la tercera pila ha sido objeto de estudio y ensayo debido a que se ha observado la fuerte interacción entre dos fenómenos:

- La ley de momentos flectores y la flecha provocada por las cargas perpendiculares a la losa (cargas de flexión)
- La torsión provocada por la asimetría y curvatura del trazado (véase una discusión de lo siguiente en el epígrafe: **Consideraciones estructurales derivadas del trazado: la viga curva**)

La elección de la posición de esta pila influye notablemente en el control de la flecha máxima. Sin embargo, es necesario alcanzar una solución de compromiso entre el control de la flecha y la torsión, cuyo valor es tan elevado que lleva a inducir tracciones en uno de los aparatos de apoyo. De esta manera, se buscó en la medida, de lo posible, colocar la tercera pila en la bisectriz que se forma en la bajada, pues es en este punto donde se minimiza esta tracción, ya que busca compensar “estáticamente” los vanos cuyo desequilibrio de resultantes provoca la torsión.

Consideraciones estructurales derivadas del trazado: la viga curva

De acuerdo a la planta prevista en proyecto, de trazado espiral no simétrico, podemos obtener una serie de conclusiones que tienen especial relevancia desde el punto de vista estructural, sobre las cuales existe un estudio detallado tanto (Margalef De Zabalo, 2008) como en (Manterola Armisén, 2006) y (Manterola Armisén, 2006)

- Por ser curva, la aparición de una curvatura en la viga induce la aparición de un acoplamiento entre el momento flector y el torsor, provocando la aparición de un momento torsor
- A parte del acoplamiento flector-torsor, debido a la curvatura las sobrecargas también poseen una excentricidad que también induce la de momentos torsores
- El hecho de que los trazados planteados sean no simétricos provoca, asimismo que se puedan mitigar efectos globales en la estructura.

Ecuaciones de equilibrio de la viga curva: acoplamiento flector-torsor

La importancia de la torsión en las vigas curvas se puede deducir de la forma que adquiere la ecuación de equilibrio para una viga curva, la cual pasamos a explicar, de manera sucinta.

Suponiendo una viga de trazado curvo tal y como se emplaza en la figura, sometida tanto a una carga vertical uniformemente distribuida de valor p y a un torsor también uniformemente de valor m_T

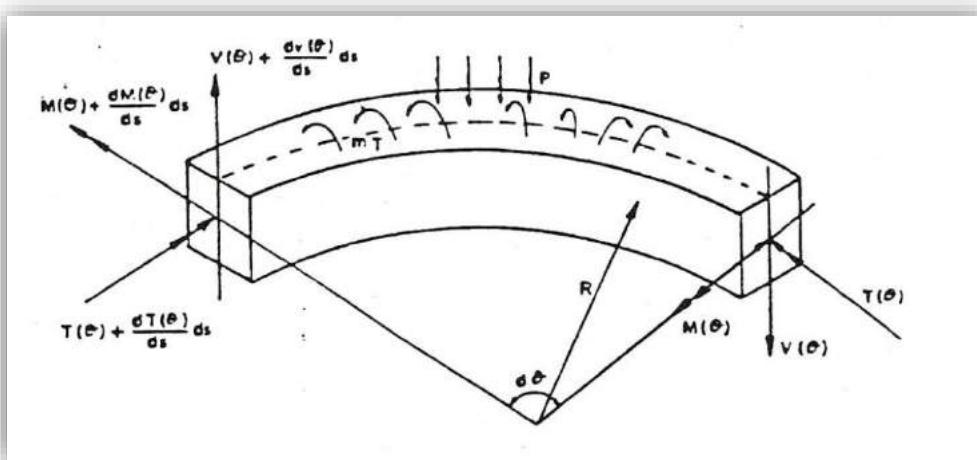


Ilustración 58: Esquema de la obtención de los esfuerzos de un elemento diferencial prismático de planta curva. Fuente (Margalef De Zabalo s.f.)

Aplicando equilibrio estático y operando obtenemos las siguientes ecuaciones, en los cuales es el R es el radio de curvatura, M el esfuerzo flector, T el torsor y V el cortante de acuerdo a la nomenclatura clásica de resistencia de materiales.

$$\frac{dT}{ds} = \frac{M}{R} + m_t$$

$$\frac{dM}{ds} = \frac{T}{R} - V$$

$$\frac{dV}{ds} = p$$

Explicitando pues el acoplamiento existente entre flector y torsor para una viga de radio finito (para radios infinitos, los términos de acoplamiento tienden a cero y quedan las ecuaciones propias de la viga recta).

Además queda patente que, pese a que no existe un momento torsor sobre la viga curva ($m_t = 0$) siempre aparece en la misma un esfuerzo torsor debido al acoplamiento. Debido al acoplamiento, este razonamiento es recíproco en cuanto a la aparición de flectores ante cargas únicamente torsoras.

Apelando a la estática básica y alejándonos de la aproximación teórica recogida en (Margaret De Zabalo, 2008) podemos obtener una explicación relativamente sencilla. Obteniendo las tensiones en la sección de la viga ante un momento flector, obtenemos dos zonas divididas por la fibra neutra: el paquete de compresiones y el paquete de tracciones. En una viga recta, a lo largo de la misma, las resultantes de ambos paquetes dan lugar a una resultante nula (si solo se somete la sección a un flector). Sin embargo, sí es cierto que si calculamos las sucesivas resultantes de los paquetes de compresión y tracción para una viga curva podemos observar que la resultante de las resultantes de los paquetes de tracción y la de los paquetes de compresión poseen cada una resultante no nula, y que ambas resultante provocan un momento (torsor) del mismo valor y sentido con respecto al centro de esfuerzos cortantes de la sección. Esto queda resumido en el siguiente esquema

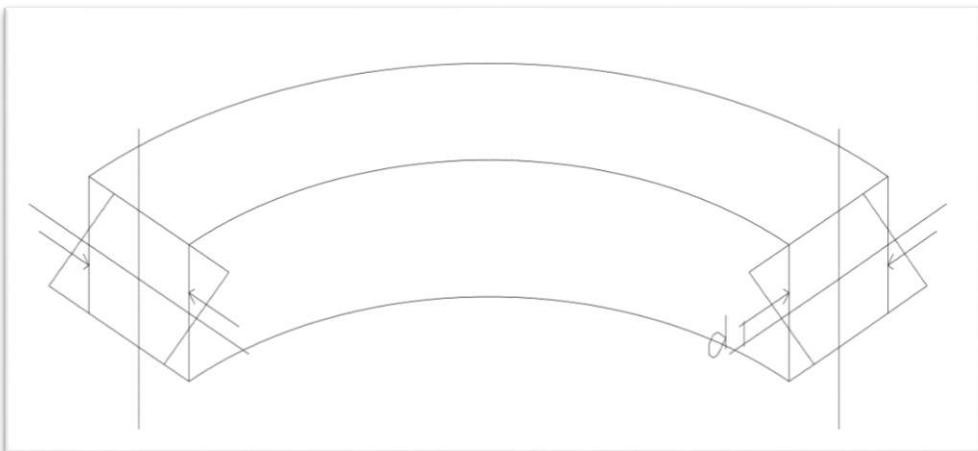


Ilustración 59: Explicación de la aparición de resultante no nula que genera el momento torsor ante solicitudes flectoras. (Margalet De Zabalo, 2008)

De acuerdo al criterio de signos adoptado con respecto al momento m_t se deduce que un momento flector produce un momento torsor volcador (del mismo sentido que el aplicado, m_t) y que un momento flector negativo provoca un momento volcador estabilizador. (Margalet De Zabalo, 2008)

Aplicando lo deducido para los esfuerzos, esto es extrapolable al cálculo de movimientos y flechas. De esta manera, los giros de torsión provocan movimientos verticales debido a la curvatura en planta, siendo estos descendentes si la carga torsora es volcadora y ascendente si esta es estabilizadora.

Para el caso de vigas continuas con apoyos intermedios, en el caso de cargas de torsoras volcadoras que provocarían desplazamientos descendentes, aparecen unas reacciones en sentido ascendente que tienden a contrarrestar estos movimientos. De esta manera, aparecen los momentos negativos propios de las vigas continuas, desplazando de esta manera hacia arriba la ley de flectores total. Este razonamiento es, evidentemente, aplicable a la viceversa, aplicándose así un momento torsor estabilizador con su correspondiente desplazamiento ascendente, que da lugar a la aparición de reacciones descendentes y a la bajada de la ley de momentos flectores.

Excentricidad de las cargas debido a la geometría curva

De acuerdo a lo explicado, existe un acoplamiento entre flector y torsor que hace que, ante una carga que en una viga recta produzca flexión, en el caso de la viga curva también produzca torsor, y viceversa. Sin embargo, el hecho de que la planta sea curva induce, a su vez, una excentricidad en la carga que provoca un momento torsor

sobre la misma. Realizaremos una explicación de este concepto siguiendo a (Margaret De Zabalo, 2008).

Tal y como se aprecia en la figura, la zona que aparece rayada posee un mayor área que la zona no rayada, debido a que a igualdad de ángulo la longitud de la curva es

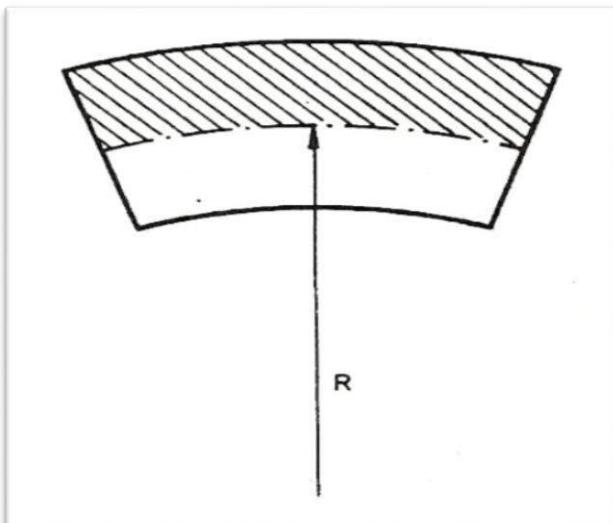


Ilustración 60: Explicación de carga torsora inducida por el trazado curvo. La zona rayada posee un mayor área que la que no se encuentra rayada (al ser mayor el radio de la curva). Esto hace que no se compensen los momentos con respecto al centro y aparezca un torsor

directamente proporcional al radio que la describe. De esta manera, si lleváramos la carga uniformemente distribuida sobre la superficie a un modelo viga, esta se debería descomponer en dos términos:

-una sobrecarga p , uniformemente distribuida por unidad de longitud

-un momento torsor, de carácter volcador, de valor $m_t = p \cdot e$, en el que e es la excentricidad de la carga, la distancia a la que actúa la sobrecarga con respecto al eje directriz de la curva y toma el valor

$$e = \frac{\rho_y^2}{R}$$

Siendo ρ_y el valor del radio de giro de la sección transversal, tomándose y como el eje vertical de la sección transversal (aquel que es perpendicular al eje directriz de la curva del trazado y toma la dirección vertical).

De esta manera, para una sobrecarga aplicada en todo el ancho de la viga, el momento torsor debido a la diferencia de áreas cargadas tomaría el valor siguiente para una viga equivalente de sección rectangular:

$$m_t = q \frac{B^2}{12 R}$$

Con B el ancho de la pasarela y q el valor de la sobrecarga aplicada.

Conclusiones

De la teoría expuesta, se puede extraer una serie de conclusiones interesantes para el caso de diseño que nos ocupa:

-La torsión trazados curvos es un aspecto a tener en cuenta debido a que en una estructura de un puente o pasarela que trabaja eminentemente a flexión, el acoplamiento existente entre flexión y torsión debe ser estudiado con detalle.

-La torsión producida por la diferencia de áreas cargadas debido al trazado curvo implica un efecto más a tener en cuenta de la importancia de la torsión en puentes de trazado curvo.

-La sección que se coloque debe soportar los esfuerzos de torsión y ser estructuralmente congruente con este precepto. De ahí que la sección en cajón sea elegida dado que entraña con uno de los cometidos que se le encomienda.

Elección de Materiales

Introducción

En este apartado expondremos los materiales empleados para configurar el laminado de nuestra pasarela así como los criterios tenidos en cuenta a la hora de tomar una decisión, sopesando pros y contras de otras soluciones posibles.

Como criterio económico, dado que normalmente las empresas comercializadoras de compuestos suelen ser grandes distribuidoras que venden toda la gama de productos garantizando la compatibilidad entre los mismos así como la afectación de mejores precios de escala, buscaremos emplear materiales ofertados todos por una misma casa en la medida de lo posible.

Por presencia y extensión en el panorama español, la casa elegida será HexCel y los productos elegidos así como las razones a decantarnos por los mismos son adjuntados. Ello no quiere decir que otras distribuidoras no hayan sido comparadas: el procedimiento seguido ha sido la de fijación de prioridades del proyecto y comparación entre productos similares ofertados.

Valores característicos

TYPICAL MECHANICAL VALUES ON EPOXY PREPREG LAMINATES

		FIBRES								
		E-GLASS		ARAMID		HIGH STRENGTH CARBON		INTERMEDIATE MODULUS CARBON		
		UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric	
 Volume content of fibres : ≈ 60 % (Carbon) ≈ 50 % (E-glass - Aramid)	σ_t III	MPa	1100	600	1100	500	2000	800	2400	900
	σ_t ≡	MPa	35	550	35	450	80	750	80	850
	E_t III	GPa	43	20	60	30	130	70	170	90
	E_t ≡	GPa	8	19	8	30	9	65	9	90
	Poisson's ratio ν_{lt}		0.28	0.13	0.34	0.2	0.25	0.05	0.27	0.05
	σ_c III	MPa	900	550	250	150	1300	700	1600	800
	σ_c ≡	MPa	150	500	150	150	250	650	250	750
	E_c III	GPa	42	17	75	31	115	60	150	80
	E_c ≡	GPa	10	16	5.5	30	10	55	11	75
	σ_f III	MPa	1200	700	550	400	1800	1000	1400	1200
	E_f III	GPa	42	20	40	25	120	65	140	75
	σ_{lt} ≈	MPa	60	55	45	40	95	80	95	80
	G_{lt}	GPa	4	4.2	2.1	4	4.4	5.5	4.4	5
	σ III	MPa	75	50	60	50	80	70	80	70

TYPICAL THERMAL PROPERTIES OF PREPREG LAMINATES

	Units	Glass		Aramid		High strength carbon	
		UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric
Coefficient of expansion	10^{-6} K^{-1}	11	14	- 0.4	- 5.2	0.3 - 0.7	2 - 3
Thermal conductivity	$\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$	0.4	0.16 - 0.33	0.4	0.21	1	0.86 - 1.44

Resinas Epoxy HexPly M34 de HexCel

La decisión de emplear resina epoxy viene condicionada por buscar un elemento que actúe como matriz cuyas características no infravaloren las propiedades aportadas por la fibra. Pese a que económicamente resultan de mayor coste, cuando se usa fibra de carbono suele ser la decisión más extendida. Una vez empleada en las partes más solicitadas en fibra de carbono, resulta de constructivamente más sencillo y homogéneo emplear epoxy en todas las piezas, y así rentabilizar la resina adquirida. Esto es congruente con los procedimientos constructivos escogidos, de los que se hablará más adelante y que son empleados por las casas montadoras como método habitual.

De esta manera, la resina epoxy ofrece las mejores propiedades mecánicas, así como -es un mejor comportamiento frente a la temperatura, factor importante debido a la ubicación del proyecto (Almería)

Son muchas las casas comerciales que ofertan en el mercado, distintos tipos de resinas epoxy, con distintas características, relacionadas tanto con las propiedades finales de la pieza estructural así como por las necesidades de presión y de aporte calorífico necesarias para un proceso de curado satisfactorio.

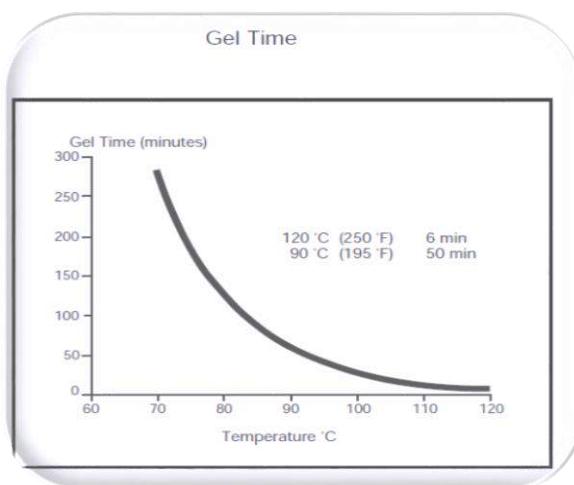
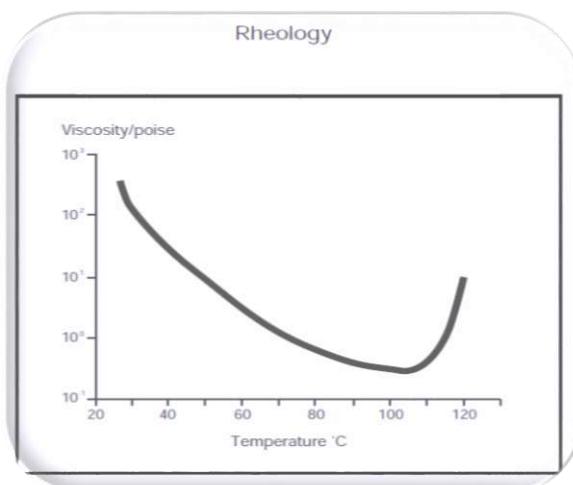
Debido al tamaño de las piezas que conforman la pasarela, como ya hemos explicado, es necesaria que la aplicación de presión y de curado sea realizada mediante métodos extensibles, tales como mantas térmicas y bolsas de vacío. Ello implica que la temperatura de curado alcanzable estará en torno a los 60-70 grados, por lo que el curado de la resina deberá ser a esta temperatura. Estos criterios los cumple la Resina Epoxy elegida, la M34. Por estas características expuestas en (HexCel, s.f.) así como por las propiedades que se alcanzan en el producto final, a esta resina se la encuadra como de "uso en Ingeniería Civil". Estas propiedades las pasamos a explicitar y que aparecen recogidas en (HexCel, s.f.)

- Libre de halógenos
- Autoadhesivo en núcleos de PVC
- Moldeado a baja presión (en torno a los 0.8-3 bar)
- Los prepregs untados con ella son fáciles de manejar y flexibles

- Se adaptan bien a laminados de gran espesor debido a la baja reacción exotérmica

Cured Matrix Properties cured at 75 °C (167 °F) - 8H

Test	Values	Method
Glass transition temperature	80 °C (176 °F)	
Cured resin density	1.26 g/cm ³	
Flexural	Str = 120 MPa (17.4 ksi) Mod = 3.8 GPa (551 ksi)	DMA



Reología de la matriz M34

Gel time de la matriz M34

Prepreg Storage Life

■ Shelf Life	@ 23 + 2 °C (73 °F)	10 days
■ Guaranteed Shelf Life	@ -18 °C (0 °F)	12 months

Hablar de coeficiente de dilatación térmica en resinas implica no considerar un valor único, dado que la dependencia de las propiedades del material con respecto a la temperatura y la presión a la que se someten es manifiesta.

Fibra de Vidrio E-Epoxy 01543 1000 TF970:

La fibra de vidrio E viene siendo la más empleada en Ingeniería Civil debido a ser una de las que presentan las mejores características de rigidez y resistencia así como una resistencia a la corrosión notable muy apreciada en ambientes químicamente agresivos.

Dentro de los productos de fibra de vidrio E disponibles en el mercado, hemos decidido emplear en nuestro proyecto un tejido unidireccional (warp 90%, weft 10%) de la compañía HexCel



Textile Reinforcement for High Performance Composite

HexForce® reinforcements are available in a range of weave styles – from woven fabrics to multiaxials and specialties that offers a range of globally certified aerospace / industrial products in carbon, glass and aramid and specialty fibers that we sell under the HexForce® trademark.

DESCRIPTION	July / 2015	
Type of yarns	Warp : EC9 68 X 2	Weft : EC7 22
Nominal weight	290 g/m ²	8.55 oz/sqy ²
Weave style	UD 4HS	
Width	1000 mm	39.4 in
Finish type	TF970	
Finish description		

CHARACTERISTICS

Nominal construction	Warp : 19 yarn/cm	48.6 yarn/in
	Weft : 11.8 picks/cm	30.2 picks/in
Weight distribution	Warp : 90 %	
	Weft : 10 %	
Thickness (*)	0.22 mm	0.009 in

Fibra de Carbono-AS4D

Se ha empleado una fibra de carbono común AS4D del fabricante HEXCEL.



HexTow® AS4D carbon fiber is a continuous, high strength, high strain, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties, and is suggested for use in prepegging, filament winding, braiding, and pultrusion.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength	700 ksi	4,825 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	35.0 MsI	241 GPa
Ultimate Elongation at Failure	1.8%	1.8%
Density	0.0647 lb/in ³	1.79 g/cm ³
Weight/Length 12K	42.8 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.765 g/m
Approximate Yield 12K	1,945 ft/lb	1.31 m/g
Tow Cross-Sectional Area 12K	6.63 x 10 ⁻⁴ in ²	0.43 mm ²
Filament Diameter	0.265 mil	6.7 microns
Carbon Content	94.0%	94.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	350 ksi	2,413 MPa	
0° Tensile Modulus	21.4 MsI	145 GPa	ASTM D3039
0° Tensile Strain	1.6%	1.6%	
0° Short Beam Shear Strength	18.5 ksi	128 MPa	ASTM D2344
0° Compressive Strength	260 ksi	1,793 MPa	ASTM Mod. D695
Fiber Volume	60%	60%	

Núcleo de PET G-PET

La elección de la espuma estructural de PET G-PET -200 está ligada a que posee una capacidad aceptable en función del compromiso estructural de baja entidad que se le presupone así como a su reducida densidad y coste en comparación con otros núcleos.



INSTRUCTIONS FOR USE

General working practices apply to these products, details of which can be obtained from the Gurit Guide to Composites or by contacting a Gurit representative (contact details provided at the end of this datasheet).

MECHANICAL PERFORMANCE

Type	Test Method	Units	Gurit® G-PET™ 80	Gurit® G-PET™ 90	Gurit® G-PET™ 110	Gurit® G-PET™ 135	Gurit® G-PET™ 200*
Short Edge Marking	-	-	Brown, Yellow	Brown, Orange	Brown, Blue	Brown, Grey	Brown, Black
Nominal Sheet Size	-	mm	1005/1220 x 2440	1005/1220 x 2440	1005/1220 x 2440	1005/1220 x 2440	1005/1220 x 2440
		inches	39.5/48 x 96	39.5/48 x 96	39.5/48 x 96	39.5/48 x 96	39.5/48 x 96
Density	ISO 845	kg/m³	80	94	114	135	200
		lb/ft³	5.0	5.9	7.1	8.4	12.5
Density Range	ISO 845	kg/m³	75-85	89-99	109-119	130-140	190-210
		lb/ft³	4.7-5.3	5.6-6.2	6.8-7.4	8.1-8.8	11.9-13.1
Compressive Strength	ASTM D1621 – 2010 (ISO 844)	MPa	0.96	1.27	1.71	2.17	3.56
		psi	139	184	248	315	516
Compressive Modulus	ASTM D1621 – 2010 (ISO 844)	MPa	48	60	77	95	146
		psi	6962	8702	11168	13779	21176
Compressive Modulus	ASTM D1621b - 1973	MPa	77	95	120	146	205
		psi	11168	13779	17405	21176	29733
Shear Strength	ASTM C273	MPa	0.53	0.70	0.94	1.19	1.81
		psi	77	102	136	173	263
Shear Modulus	ASTM C273	MPa	13	19	27	35	53
		psi	1885	2756	3916	5076	7687
Shear Elongation at break	ASTM C273	%	44	39	32	25	19
Tensile strength	ASTM D1623	MPa	1.49	1.66	1.91	2.16	2.48
		psi	216	241	277	313	360
Tensile modulus	ASTM D1623	MPa	89	112	143	177	241
		psi	12908	16244	20740	25672	34954
HDT	DIN 53424	°C	200	200	220	220	220
		°F	392	392	428	428	428

Estructuración del mercado de compuestos

Como veremos más adelante, las necesidades en cuanto maquinaria de producción de compuestos va desde procesos manuales a otros que emplean un aparataje más sofisticado y ligado a una cadena de producción de alta eficiencia, pero a su vez costosa. Asimismo, la aplicación de ciclos de temperatura y presión implica la existencia de autoclaves o de otra tipología de equipos que encarece enormemente el precio de la ejecución del proyecto si suponemos que con este se debe llevar a cabo el desembolso pertinente para hacernos con esos equipos.

Sin embargo, el desarrollo del mercado de los composites así como su cada vez mayor difusión en la ingeniería civil en general y del proyecto de pasarelas ligeras en particular, hace que hayan aparecido empresas que ofrecen soluciones para este tipo de proyectos. Evidentemente, el mercado no es tan amplio como el de otros materiales de construcción, pero su crecimiento se muestra al alza, siendo de ello muestra el alto número de pasarelas recogidas en los “Antecedentes” de este proyecto.

Estas empresas suelen ser staffs técnicos que se dedican a la producción en fábrica de proyectos de elementos estructurales concebidos en frp, con una filosofía similar a la que pueden presentar empresas de acero estructural en las que se pueden comercializar o perfiles normalizados (en acero laminados o conformados en frío, en compuesto pultrusionados) o a estructuras realizadas *ex profeso* para proyecto (formas arquitectónicas/ estructurales complejas y *ad hoc*).

Generalmente la diferencia entre estas empresas es que su condición a nivel nacional viene siendo de “montadoras”; es decir, a partir de materias primas (matrices y refuerzos) adquiridas a empresas distribuidoras ejecutan los laminados de acuerdo a proyectos propios o encargados y los someten a los procesos necesarios de curado. De esta manera, la ejecución en fábrica tiende de esta manera contratarse a estas empresas montadoras, que ya poseen la maquinaria de producción necesaria, cobrando por los servicios.

El conocimiento de la maquinaria necesaria y disponible en compuestos un nuevo reto para el ingeniero civil, que generalmente no está familiarizado con el material. Generalmente, el mayor concepto a tener en cuenta en que la media de las piezas propias de pasarelas presenta un tamaño muy superior al de las piezas empleadas en otros sectores, por lo que la presencia de, por ejemplo, autoclaves de estos tamaños no es algo ni abordable por todas las empresas ni económico rentable para aquellas que si lo podrían adquirir, con lo cual se camina al empleo de materiales que exijan menores temperaturas de curado y menores presiones de vacío. Asimismo, el método empleado para abordar aquellas formas complejas de las que se supone se

puede dotar a los compuestos y que se les exigen desde puntos de vista estéticos y/o de ahorro de material.

El espectro de procedencia de estas empresas montadoras tiende dividirse en dos grupos que ilustraremos mediante ejemplos propios por cercanía.

- Grandes empresas del sector de la construcción y las infraestructuras que se han diversificado y han integrado como parte de su oferta la ejecución de puentes carreteros y pasarelas de composites. El caso paradigmático de estos es el de **Acciona**. La antigua Entrecanales e Ibarra ha creado una división de compuestos que se ha mostrado muy productiva y en trayectoria ascendente en los últimos diez años, sobre todo desde la construcción del Puente de la Autovía del Cantábrico. Véase (Primi & Paulotto, 2011) para más señas
- Empresas especializadas en el sector del composite que se han diversificado mediante la apertura de nuevas divisiones Ingeniería Civil, en las que aplicar el conocimiento generado y la experiencia adquirida en otras ramas a la ejecución de proyectos de puentes y pasarelas. Cabe destacar a la empresa **Carbures**, originaria de la bahía de Cádiz, a cuya desempeño en sectores aeronáuticos y deportivos entre otros, ha sumado actualmente una división dedicada íntegramente a estos encargos

Actualmente, la producción de perfiles por pultrusión como elementos estructurales (no como vigas de puente sino como tensores o en arcos) si ha sido empleada a nivel nacional, en colaboración con empresas extranjeras, generalmente con la danesa Fiberline. La oferta de perfiles pultrusionados en España es reducida, aunque sí ha encontrado cada vez un mayor acomodo en terrenos más propios de la arquitectura.

A nivel nacional, la casa comercial mejor implantada de matrices, refuerzos y prepregs y otros productos es HexCel, cuya distribución se hace a partir de casas distribuidoras, siendo destacadas (sobre todo por su presencia en la web) **Resinas Castro** y a **Gazechim Ibérica**.

Cálculo de Propiedades de los materiales de Proyecto

El cálculo predictivo de las propiedades de los materiales compuestos es un campo de trabajo que a día de hoy existe todavía discusión acerca de cuál de los múltiples modelos es aquel que nos acerca con mayor precisión a las propiedades de los materiales.

Generalmente, los estudios al respecto arrojan dos conclusiones más o menos extrapolables en cuanto a los métodos predictivos de cálculo de propiedades en FRP (Gómez Pulido, 2011):

- Los métodos existentes para el cálculo de las propiedades elásticas de rigidez resultan aceptables y su predicción aproximada para nivel de proyecto
- Los métodos existentes para el cálculo de las propiedades resistentes (tensiones y deformaciones últimas) no aproximan de manera empleable las propiedades, por lo que se debe recurrir a ensayos.

Por tanto, nuestra forma de enfocar el problema de determinar las propiedades de los materiales especificados en proyecto serían las siguientes

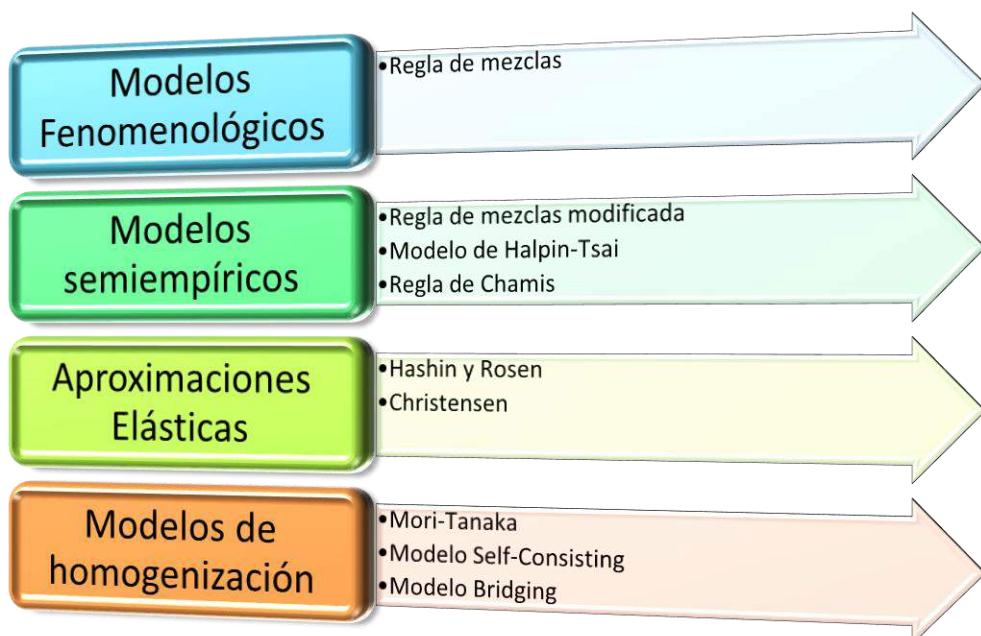
- Para el cálculo de las propiedades elásticas de los materiales emplearemos una serie de modelos contrastados en la guía de diseño Eurocomp (Clarke, 1996) y en bibliografía contrastada (Barbero, 2008)
- Usaremos para los valores provistos por los proveedores de los materiales, producto de baterías de ensayos y presentes en los catálogos y fichas de producto

Por tanto, de acuerdo a lo explicado,haremos especial énfasis en explicar los modelos del cálculo de propiedades elásticas para constatar una realidad aparente, y es que, salvo excepciones, todos tienden a presentar valores parecidos

Cálculo propiedades elásticas de materiales compuestos

En aras de calcular las constantes propias de los materiales compuestos a emplear realizaremos un cálculo de las mismas de acuerdo a diferentes formulaciones usadas tanto a nivel de proyecto como en la bibliografía específica consultada. Para acotar los valores característicos de las propiedades de los materiales de proyecto a emplear, compararemos los mismos con los valores aportados por las distintas casas comerciales, tanto de la fibra/matriz elegida como de los productos compuestos típicos de referencia aportados por las mismas.

Existe una gran variedad de modelos, entre los cuales queremos sacar a colación algunos de los más extendidos. Para más referencias, véase (Younes, et al., 2012). Generalmente los distintos tipos de modelos los podemos dividir en cuatro clases:



Generalmente, la bibliografía existente considera que las aproximaciones en cuanto a la rigidez de un material compuesto son aceptables mientras que las propuestas por resistencia tienden a no resultar aproximadas, por lo cual, en la medida de lo posible, se prefieren valores característicos aportados por los fabricantes, que provienen de mezclas empleadas en la práctica.

Regla de mezclas directa (modelo de Voigt) e indirecta (Reuss)

Estas estimaciones aparecen referidas en el Eurocomp Handbook y son consideradas por este como conservadoras, quedando siempre por encima los valores reales medidos a estas. En primera aproximación, y por su sencillez práctica, las emplearemos a nivel de proyecto.

Apréciese que de aquí en adelante se va a adoptar un criterio de direcciones en el que 1 es la dirección longitudinal, 2 la transversal y la 3 la perpendicular a ambas. Es cierto que en la bibliografía de medios continuos (París, 2000) estos subíndices se prefieren para las direcciones principales, cosa que dependerá de la constitución del laminado. Para ser consistentes con la bibliografía seguida en este punto (Blanco Álvarez, s.f.) Emplearemos los subíndices propuestos, suponiendo que la composición de la secuencia de láminas sea congruente con la formación de un material especialmente ortotropo.

Estimación del módulo elástico longitudinal

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Siendo

E_1 = módulo elástico longitudinal del compuesto

E_f = módulo elástico longitudinal de la fibra

E_m = módulo elástico longitudinal de la matriz

V_f = volumen de fibra (en tanto por uno)

Estimación del módulo elástico transversal

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f}$$

Siendo

E_2 = módulo elástico transversal del compuesto

Estimación módulos de Poisson

En el material podemos encontrar seis módulos de Poisson distintos de acuerdo a las tres direcciones en las que es susceptible de deformarse por la deformación acaecida en otra dirección. Esto aparecer explicable en la siguiente ilustración:

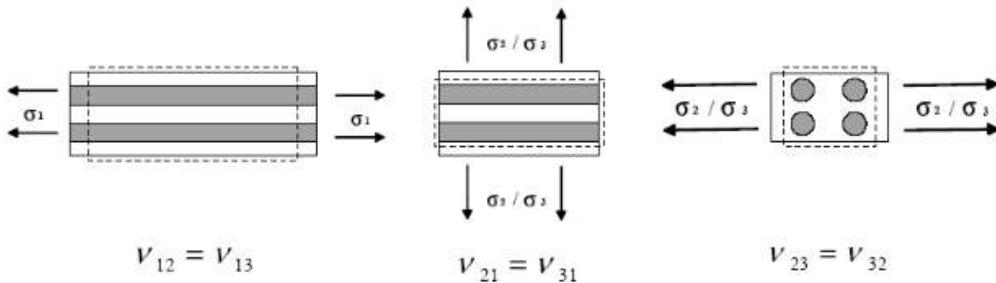


Ilustración 61: distintos módulos de Poisson en un ortótropo

Estimación del módulo de Poisson mayor, ν_{12}

Vuelve a ser una media ponderada de cada uno de los coeficientes de Poisson respectivos a fibra y matriz (Friberg & Olsson, 2014) (Blanco Alvarez, s.f.):

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f)$$

Estimación del módulo de Poisson menor, ν_{21}

Entre ν_{12} y ν_{21} existe una proporcionalidad inversa (Blanco Alvarez, s.f.), de modo que:

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$$

Estimación del módulo de Poisson menor, ν_{23}

Para la estimación de ν_{23} se emplea la siguiente fórmula:

$$\nu_{23} = 1 - \nu_{21} - \frac{E_2}{3K}$$

Tomando K, el módulo de compresibilidad o de Bulk, el siguiente valor:

$$K = \frac{K_f K_m}{K_f V_m + K_m V_f}$$

Con K_f y K_m los módulos de compresibilidad de la fibra y la matriz, respectivamente, y estimándose los valores de K_f y K_m de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$K_f = \frac{E_f}{3(1-2\nu_f)} \quad K_m = \frac{E_m}{3(1-2\nu_m)}$$

Estimación del módulo de cizalladura

Dado que consideramos nuestro material como ortotropo, la definición del módulo de cizalladura aparece determinada por la fórmula

$$G_{12} = \frac{G_m}{V_m + V_f \left(\frac{G_m}{G_f} \right)}$$

Generalmente, la resina epoxy, que es la que controla la rigidez transversal del compuesto, se puede considerar por sí sola como un material isótropo, con lo cual las propiedades del material se pueden tomar como tales y la rigidez transversal de la resina toma el valor típico del módulo de cizalladura para materiales isótropos

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}$$

Podemos realizar una consideración análoga de los refuerzos de fibra de carbono o de fibra de vidrio. Aunque esta suposición no es del todo realista, nos vale para obtener un valor del módulo de cizalladura, G , de la matriz:

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)}$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})}$$

Predicción simplificada del módulo de elasticidad con laminados apilados en distintas direcciones

Recogeremos aquí la fórmula simplificada de Krenchel:

$$E_1 = \eta_o V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

Siendo el valor de η_o

$$\eta_o = \sum_i e_i * \cos^4 \alpha_i$$

Regla de Halpin-Tsai

La regla de Halpin-Tsai consiste en una formulación semiempírica recogida en (Clarke, 1996) que proviene de la comparación de formulaciones anteriores (formulación de Brintup) con las soluciones obtenidas por la Teoría de la Elasticidad (Blanco Alvarez, s.f.).

Módulo elástico transversal

Para el módulo elástico transversal, E_2 , el valor según la regla de Halpin-Tsai sería:

$$E_2 = \frac{E_m(1 + \xi\eta)}{(1 - \eta V_f)}$$

Tomando η el valor

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi}$$

Y ξ el valor propio del factor de refuerzo aparece explicitado en (Clarke, 1996)

Módulo cizalladura G_{12}

El valor del módulo de cizalladura G_{12}

$$G_{12} = \frac{G^m(1 + \zeta\eta V_f)}{(1 - \eta V_f)}$$

Cálculo de propiedades bajo suposición de micromecánica periódica

Esta aproximación es la propuesta por (Barbero, 2008), por la cual estima los parámetros suponiendo una ordenación de microestructura periódica de material transversalmente isótropo (PMMI en inglés) aproximada (presente el material esta distribución o no).

Esta aproximación, más certera en las alas y en el fondo del cajón que en las almas, nos aporta valores prácticamente idénticos medios con respecto a la conservadora regla de mezclas y a la fórmula propuesta por EUROCOMP (Clarke, 1996) de Halpin-Tsai. En este sentido hemos tomado un criterio conservador y hemos empleado la aproximación expuesta en (Barbero, 2008)

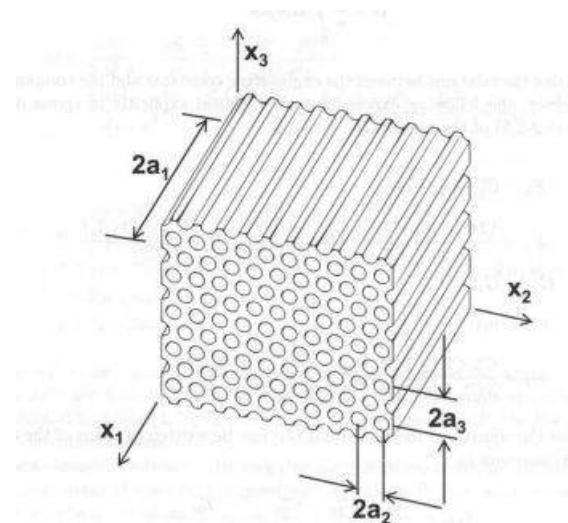


Ilustración 62: Aproximación en la que se basa el PMMI
(Barbero, 2008)

Cálculo de propiedades térmicas

A día de hoy existen diferentes estudios acerca del comportamiento de los compuestos en función de la temperatura que alcanzan, siendo de interés debido dos comportamientos enfrentados de interés:

- Los coeficientes de dilatación térmica de resina epoxy y fibra de vidrio son de un orden inferior al del hormigón y dos órdenes al del acero, pero el coeficiente de dilatación térmica de la fibra de carbono es negativo. Ello implica que el material tiende a contraerse cuando se somete a una variación de temperatura positiva.
- Numerosos estudios sugieren la variabilidad de las propiedades de las resinas epoxy con respecto a la temperatura, y se hace necesario un estudio experimental más exhaustivo de un problema que, a día de hoy no tiene un consenso acordado.

No obstante, a nivel de proyecto de ingeniería civil, se viene aceptando como suficiente la aproximación propuesta en la bibliografía de carácter general (Kollár & Springer, 2003) de aceptar un coeficiente de dilatación térmica que constituya una media ponderada de los coeficientes de dilatación térmica de la matriz y refuerzo de acuerdo a la siguiente expresión:

$$CTE_{compuesto} = \frac{(CTE_{matriz}V_m + CTE_{fibra}V_f)}{CTE_{matriz} + CTE_{fibra}}$$

Como solución de diseño, se ha decidido emplear los valores promedios propuestos por los fabricantes de cara a la introducción en el modelo de la pasarela.

	Units	Glass		Aramid		High strength carbon	
		UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric
Coefficient of expansion	$10^{-6} K^{-1}$	11	14	- 0.4	- 5.2	0.3 - 0.7	2 - 3
Thermal conductivity	$Wm^{-1} K^{-1}$	0.4	0.16 - 0.33	0.4	0.21	1	0.86 - 1.44

De esta manera, se puede observar que el compuesto de fibra de carbono es por norma general más térmicamente estable que otros materiales convencionales empleados en Ingeniería Civil como pudieran ser hormigón o acero. El compuesto de fibra de vidrio se mueve en valores similares a los de acero u hormigón.

MATERIAL	$\alpha_T (x10^{-6} ^\circ C^{-1})$
Acero inoxidable	16
Acero estructural, hierro dulce o fundición ⁽¹⁾	12
Hormigón ⁽²⁾	10

Ilustración 63: Valores propios de los coeficientes de dilatación de materiales convencionales empleados en construcción (Ministerio de Fomento-Dirección General de Carreteras, 2011)

Valores calculados

M34/AS4

PMM micromechanics (elastic matrix)										
Constantes Elásticas materiales del compuesto										
Matrix		Em (GPa)	vm							
Epoxy		3	0.35							
				Constantes Ingenieriles						
Fiber		Ef (GPa)	vf	E1	E2	v12	v23	G12	G23	
AS4		231	0.22	139.82	12.03	0.25	0.42	4.31	4.24	
Mediante regla de Mezclas Directa (Reuss) e Inversa (Voigt)										
Constantes Elásticas materiales del compuesto			Em(GPa)	vm						
Matrix					Constantes Ingenieriles					
Epoxy M34 (HexCel)		3	0.35		E1 (GPa)	E2 (GPa)	v12	v23	G12(GPa)	G23(GPa)
Fiber		Ef (GPa)	vf	139.80	7.36	0.26	0.68	2.73	2.19	
AS4 (HexCel)		231	0.22					Se limita a 0.5		
Proporción de Fibras		Vf								
		0.6								

Mediante regla de Halpin-Tsai								
Constantes Elásticas materiales del compuesto		GPa	GPa					
Matrix	Em	vm	Engineering Constants					
Epoxy M34 (HexCel)	3	0.35	E1	E2	v12	v23	G12	G23
			139.8	20.7485	0.272	0.125567	5.662009	9.216913
Fiber	Ef [GPa]	vf						
AS4 (HexCel)	231	0.22						
Proporción de Fibras	Vf							
	0.6							

M34/01543 1000 TF970

PMMI micromechanics, isotropic fiber, elastic matrix

Constantes Elásticas materiales del compuesto	GPa	GPa	Vf	0.6				
Matrix	Em	vm						
M34-Epoxy	3	0.35	Engineering Constants					
			E1	E2	v12	v23	G12	G23
Fiber	Ef	vf	44.42	10.78	0.26	0.40	3.93	3.84
01543 1000 TF970	72	0.22						

PMMI micromechanics, isotropic fiber, elastic matrix

Constantes Elásticas materiales del compuesto	GPa	GPa	Vf	0.6					
Matrix	Em	vm							
M34-Epoxy	3	0.35	Engineering Constants						
			E1	E2	v12	v23	G12	G23	
Fiber	Ef	vf	44.40	7.06	0.27	0.64	2.63	2.15	
01543 1000 TF970	72	0.22							

Mediante regla de Halpin-Tsai

Constantes Elásticas materiales del compuesto	GPa	GPa	Vf	0.6					
Matrix	Em	vm							
M34-Epoxy	3	0.35	Engineering Constants						
			E1	E2	v12	v23	G12	G23	
Fiber	Ef	vf	44.40	17.70	0.27	0.25	4.88	7.07	
01543 1000 TF970	72	0.22							

Hemos decidido seleccionar las propiedades aportadas por el método previsto por (Barbero, 2008) ya que todos los valores que ofrece son medios, cercanos a lo previsto por los catálogos comerciales y ninguno de los valores previstos de coeficientes de Poisson toma valores improprios

Selección del Proceso de Fabricación.

De acuerdo a los procesos vistos anteriormente, expondremos las características que se deben cumplir y la conclusión que de ellas se desprende para la elección del método.

- Se necesita un medio que ofrezca una proporción de fibra y unas características mecánicas elevadas para el uso previsto, que optimice el elevado precio que supone el compuesto.
- Se necesita un medio que sea capaz de producir grandes piezas y que el curado de las mismas sea fuera de autoclave, ya que una autoclave de esas dimensiones supone un alto coste económico.
- Se necesita un medio que sea económicamente competitivo y que esté asentado entre los productores y fabricadores
- Es necesario un medio que sea capaz de producir la forma de la sección transversal propuesta
- La capacidad de reproducción del proceso es reducido dado que las piezas en las que se divide la pasarela son 5 y no de las mismas dimensiones y formas (necesidad de moldes diferentes), con lo que las piezas son realizadas *ex profeso* para este proyecto.

Según los condicionantes impuestos, llegamos a la conclusión que la técnica VARTM, es decir, Moldeo Transferencia de Resina asistido por bolsa de vacío cumple los ítems valorados. De esta manera se transferirá la resina a las láminas de refuerzo y será está curada mediante la aplicación de presión con la bolsa de vacío y de calor con mantas térmicas. Este hecho influye notablemente en la elección de la resina, que debe curar a

temperaturas relativamente altas (propias de tecnologías “*fuera de autoclave*”).

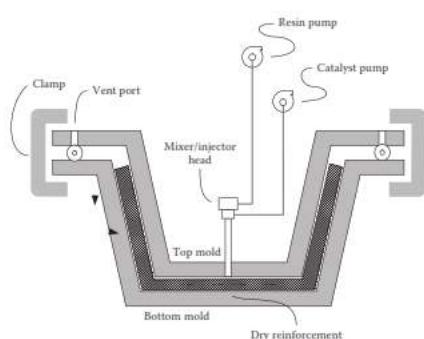


Ilustración 65: Esquema RTM

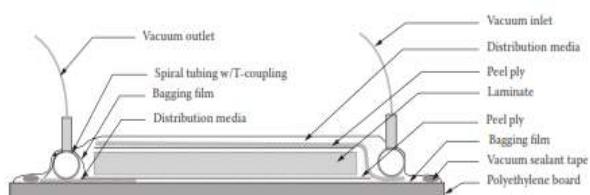


Ilustración 64: Esquema de aplicación de bolsa de vacío

Used manufacturing method	Number of bridges
Pultrusion	56
VARTM	37
Hand lay-up	18
Other	10
Total	121

Tabla 8: Número de puentes construidos en FRP en función del método de producción del compuesto, actualizado al año 2009 (Friberg & Olsson, 2014)

Descripción del proceso constructivo

Introducción

En este apartado se realiza una descripción del proceso constructivo elegido para la ejecución de la pasarela proyectada. Téngase en cuenta que, cuando nos referimos a un proceso constructivo, nos referimos a la forma en la que se disponen los distintos elementos en el lugar de destino del proyecto. La discusión acerca del proceso de fabricación de las distintas piezas que conforman la viga de la pasarela se discutió anteriormente en [Selección del Proceso de Fabricación.](#)



Ilustración 66: Fases principales de la construcción de un puente o pasarela en FRP (Primi & Paulotto, 2011)

Transporte

La pasarela se divide en una serie de dovelas, estando la formación de las mismas supeditada a la búsqueda de las zonas donde el momento flector es cercano a cero, siendo en estas zonas donde se prevé la unión remachada que conecta las distintas dovelas

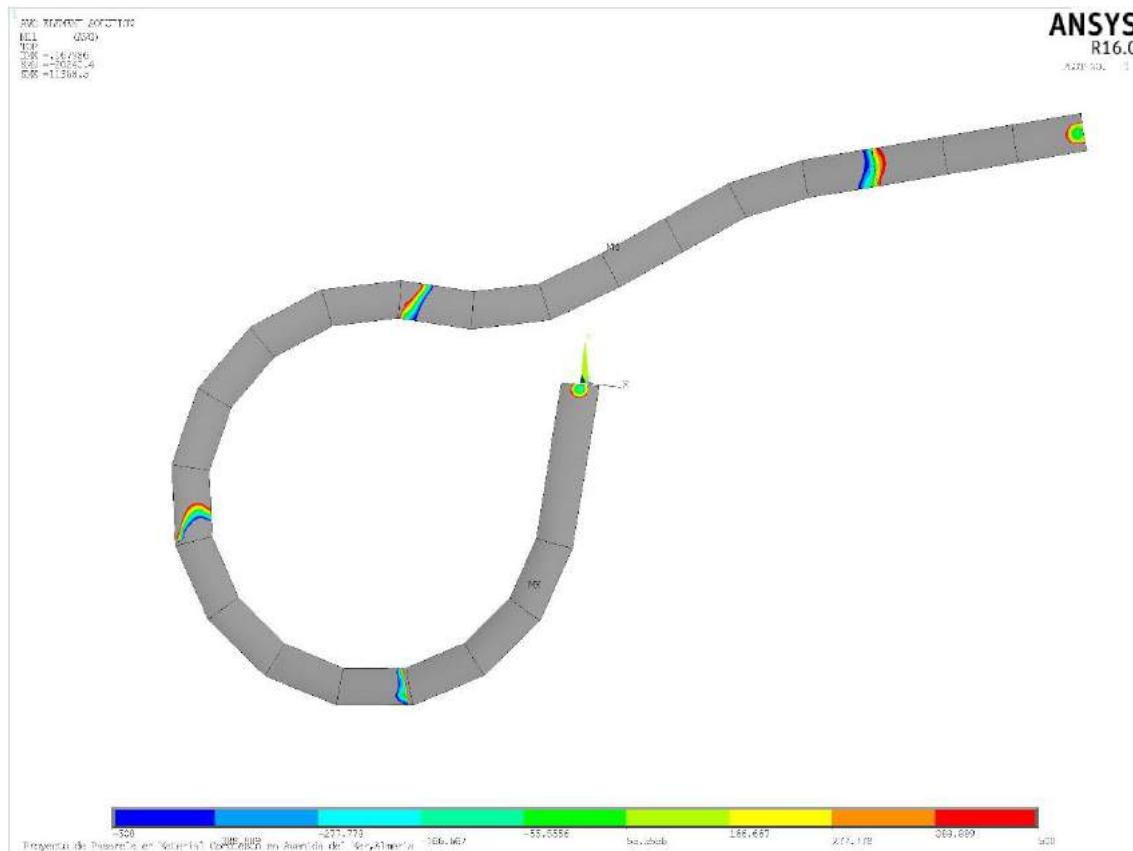


Ilustración 67: Zonas en las que se colocarán las uniones remachadas entre dovelas, de acuerdo a que presentan momento nulo

Cimbrado

Debido al elevado precio del compuesto, se considera desperdiciar la capacidad resistente del mismo el hecho de emplearlo como cimbra del hormigón. De esta manera, se emplean estructuras auxiliares para el cimbrado de la misma.

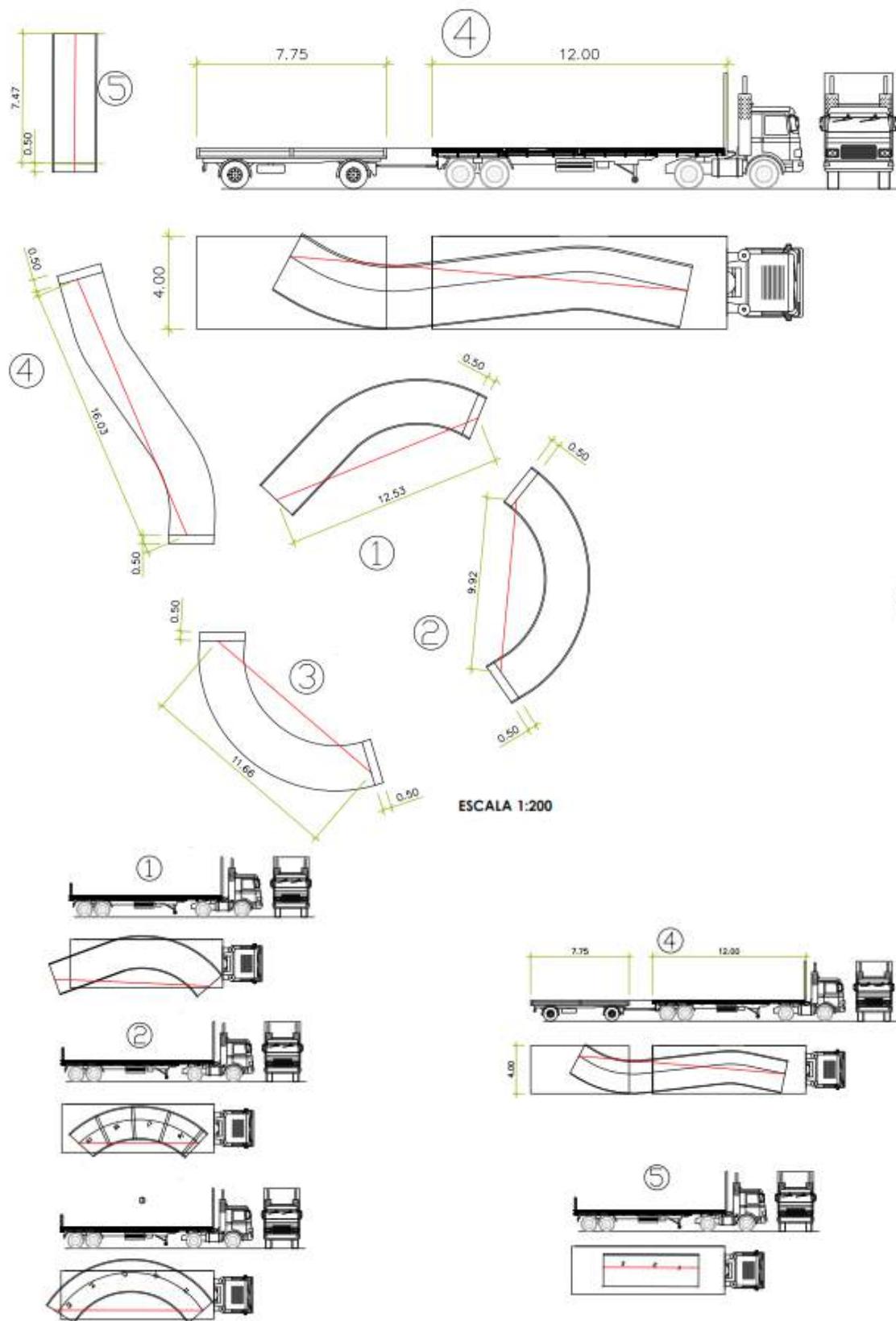


Ilustración 68: Esquema de la organización del transporte a obra

Justificación de la sección transversal

Introducción

En este apartado se realiza una explicación de los criterios de diseño tomados para la elección de la sección transversal. Recordemos que la pasarela de proyecto presenta una sección transversal formada por dos elementos claramente diferenciados: la viga de FRP y la losa de hormigón armado. Asimismo se explica cómo se ha acometido el diseño de los diafragmas propuestos.

De esta manera, dividiremos este apartado en tres subapartados, aportando las diferentes decisiones tomadas en la elección de ambos elementos.

Sección en cajón en U

La sección transversal elegida consiste en una sección en cajón abierto (tipo U), dotada de dos alas que se unen al resto de la sección, conformándose una curva donde el cajón inferior y las dos almas aparecen confundidas.

Desde el punto de vista de los materiales, como profundizaremos más adelante, las almas aparecen elaboradas mediante FRP de fibra de vidrio/epoxy y las alas y la parte inferior del cajón en FRP de fibra de carbono/epoxy. Dada la diferencia de precio entre fibra de carbono y fibra de vidrio, se tomará siempre en diseño como criterio intentar minimizar la fibra de carbono empleada.

En cuanto a la curva, la misma aparece conformada por un ajuste cúbico (curva tipo spline) que aparece determinado por cuatro puntos:

- Unión ala-alma (1)
- Punto intermedio, situado a 0.6 veces el canto, (2)
- Punto posición de los apoyos (3)
- Punto central de control de canto (4)

Estos puntos aparecen explicitados en el siguiente esquema:

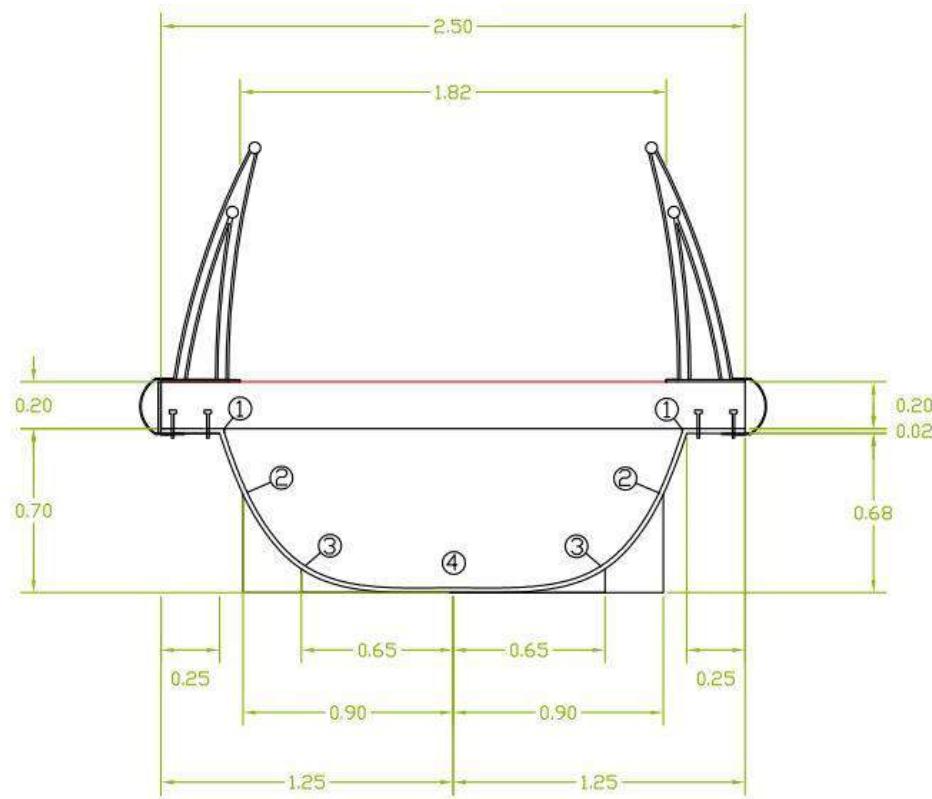


Ilustración 69: Esquema de la sección transversal de la pasarela, con las distancias y los puntos de diseño explicitados anteriormente

La adopción de esta geometría transversal viene basada en los siguientes criterios:

-La capacidad abierta que nos da la producción en compuestos nos permite adoptar formas más libres y de mayor complejidad que con otros materiales. Ello nos permite tanto buscar perfiles de carácter más estético así como pensados idóneamente para la función que se les presupone.

-El coste del material nos remite, en la medida de lo posible, en un ahorro de material que exige una optimización de la forma de la sección transversal.

-De esta manera hay que llegar a una solución de compromiso entre realizar una sección que implique mecanismos de flexión para soporta la mayoría de las cargas y una forma lo suficientemente aerodinámica que minimice el efecto de las fuerzas del viento aplicadas transversalmente a la sección.

-Para conseguir ello se ha buscado una sección transversal que consiga una curvatura que la haga aerodinámica y favorezca mecanismos de membrana, consiguiendo ello mediante un punto intermedio situado a 0.6 veces el canto. Esta elección se basa en que es necesario colocar un punto intermedio para generar curvatura y normalmente es este punto en el que se coloca la carga lineal repartida de todo el viento transversal en modelos viga.

-Con este criterio buscamos una sección que trabaje aproximadamente igual a flexión positiva y negativa y que se comporte razonablemente bien ante flexiones positivas y negativas.

-Si bien es cierto que se ha buscado siempre una curvatura que facilite el procedimiento de fabricación así como presentar una estética agradable, la forma presenta siempre un esquema estructural propio de cajón que da brazo al cajón inferior, intentando minimizar la parte de sección necesaria en carbono.

Diafragmas

Los refuerzos colocados viene a servir de relleno de la sección transversal propuesta, consiguiéndose así macizar la estructura cada dos metros y medio (2.5) de longitud medida en desarrollo para favorecer que las láminas que conformen la estructura se deformen de manera conjunta y se reduzca la longitud de pandeo de placa.

De esta manera, la forma que toma el refuerzo es la de la sección transversal de la estructura. La ligereza de los materiales empleados implica que no sean necesarios aligeramientos de estos rigidizadores.

Transversalmente, la sección del diafragma es rectangular, siendo el laminado una estructura tipo sándwich cuya composición se explica en apartados posteriores.

Criterios de Diseño del Laminado

Criterios de aplicación general

De acuerdo al análisis de conclusiones extraída de la teoría de laminados, podemos extrapolar una serie de principios que hemos tenido en cuenta en el diseño del laminado y las orientaciones de las fibras pertinentes. Estas conclusiones aparecen en parte en el capítulo 11 “Reglas de Buenas Prácticas” de (Kasapoglou, 2010)

1. Un laminado simétrico evita el acoplamiento entre los efectos de membrana y de flexión propios de placas, lo cual tiene efectos muy beneficios y evita problemas derivados del proceso de curado. Matemáticamente, esto supone que la submatriz B (acoplamiento flexión-membrana) es nula
2. Un laminado equilibrado evita el acoplamiento entre axil y cortante. Se entiende por equilibrado que por cada lámina con orientación de fibras $+θ$ existe otra de orientación $-θ$ (siendo el ángulo $θ$ un ángulo distinto de 0 o 90° , ya que estos garantizan la ortotropía y el hecho de colocar laminados que no autoequilibren estos no producen acoplamiento de axil y cortante en el plano de la lámina) Matemáticamente, el no acoplamiento se evidencia en que los términos C16 y C26 son nulos.
3. Regla del porcentaje mínimo (en (Kasapoglou, 2010) este tanto por ciento es del 10%). Se debe asegurar que al menos el 10% de las fibras deben aparecer orientadas en las siguientes direcciones, consideradas como características tensionalmente: $0^{\circ}, 45^{\circ}, -45^{\circ}, 90^{\circ}$. El objetivo de esta medida es dejar siempre un resguardo de la fibra del laminado que sea capaz de acometer posibles cargas secundarias no evaluadas en proyecto que, en caso de darse, pudieran conllevar una rotura prematura de la estructura. Generalmente, en las aplicaciones de ingeniería civil, este porcentaje mínimo viene siendo algo más conservador y se viene prefiriendo actualmente un 30% de porcentaje mínimo, que es el que elegimos como criterio.
4. En la medida de lo posible, se debe evitar que se produzca acoplamiento entre flexión y torsión. Existen diversas formas de conseguir que ello se produzca:
 - a. Propuesta de un laminado antisimétrico. Esta opción suele ser generalmente descartable debido a que ello entraría en contradicción con lo expuesto en el punto 1, y por tanto llevaría a la aparición de acoplamiento membrana-flexión que no recomendable.
 - b. Usar fibras/tejidos solo en dirección 0 y 90° . Esto desprotegería, tal y como se ha dicho en el punto 3, al laminado ante la aparición de cargas en estas direcciones, con lo que no suele ser aconsejable.

- c. Dado que normalmente no se suele llevar a cabo ni a) ni b), se suele optar por hacer que este término de acoplamiento sea lo mínimo posible, llegando pues a una solución de compromiso que reduzca el acoplamiento flexión-torsión al mínimo posible, respetando los puntos anteriores. Esto se consigue agrupando, en la medida de lo posible los plies por orientaciones equilibradas (o dicho de otra manera, colocando juntos por pares capas de $+θ$ y $-θ$)
5. Minimizar el número de plies con la misma orientación que se encuentren “pegados unos a otros”. El principal objetivo de esta medida es la de evitar que, en caso de que se produzca la grieta, esta corra y se expanda rápidamente. Por norma general se recomienda evitar 0.5-0.6mm iguales (esto suele suponer entre 4 o 5 plies de 0.12-0.15mm o 7/8 para 0.07mm)
 6. La colocación de láminas de a $+45/-45$ en las capas externas ayudan a evitar delaminados y pequeñas roturas (microcracks)
 7. Para mejorar el comportamiento a flexión longitudinal, colocar los plies a 0° (en dirección perpendicular al eje de flexión) lo más lejos posible de la fibra neutra de la sección transversal (se le aporta más brazo mecánico al material que mejor soporta el esfuerzo y que sufrirá la mayor tensión). Por tanto, para aquellas secciones en las que la flexión sea determinante sería necesario emplear una distribución de fibras que sigan esta disposición
 8. Para mejorar el comportamiento a pandeo de placa (por cortante) se colocan plies cuyas fibras se encuentren a $+45/-45^\circ$ (coincidiendo con las direcciones principales para estados de tensión tangencial pura).
 9. El empleo de tejidos a 45° en las capas externas es preferible al de fibras para evitar daños producidos por impactos, al evitar la rotura y mantener unida aquella que ya se haya separado.
 10. Asimismo, en aeronáutica también se considera mucho el término “skin” para aquellas que aparecen bajo la primera capa externa. Para estas también se prefieren laminados cuya orientación preferente sea a $+45/-45$.
 11. En cuanto a los “ply-drops” (eliminación de determinadas capas en aquellas zonas donde no se consideren necesarias), suelen ser preceptivos los siguientes conceptos:
 - a. Se prefiere que los ply-drops no sean externos, no se produzcan en las caras exteriores del laminado, sino en las interiores, con el objetivo de que el exterior presente el menor número de discontinuidades posibles que deriven en zonas de debilidad ante impactos y/o posible entrada de humedad.
 - b. En caso de que se necesiten ejecutar más de un ply-drop en la misma zona, es más recomendable que este sea simétrico, para alterar mínimamente y por igual ambas zonas.

- c. Se deben evitar ply-drops que sean superiores a 0.5mm en el mismo punto, para evitar crear tensiones interlaminares debidos a grandes discontinuidades en el espesor
 - d. La distancia entre ply-drops sucesivos no debe ser superior a 15 veces el espesor del ply-drop. Este valor de 15 por (Kasapoglou, 2010) es un valor considerado medio, de acuerdo a lo que proponen otros autores (Barbero, 2008), que establecen un rango a relación ply-drop/distancia entre ply-drops debe estar en torno a 1:10, 1:20
12. Como detalle relacionado con los procedimientos de producción pertinentes, se recomienda evitar fibras a 90º en esquinas cerradas complicando tanto el uso de herramientas (sobre todo convexas) así como promoviendo que se formen bolsas de resina sin refuerzo (ello se evita también en gran parte no dando lugar a la aparición de esquinas problemáticas mediante el empleo de formas curvas)

De esta manera, dado que en un material compuesto podemos elegir la orientación de las fibras (siendo esta una de las decisiones importantes a tomar por parte del proyectista) plantearemos un diseño de laminado que sea estructuralmente congruente con la labor que desempeña cada parte del cajón, distinguiendo entre tres partes claramente diferenciadas: alas superiores, almas, y fondo de cajón

Diseño de laminado propuesto

Tal y como hemos dicho, plantearemos diferentes diseños del laminado para cada una de los elementos estructurales de los que se compone la viga en cajón en función de su solicitud estructural principal. Como norma general, plantearemos tal y como hemos dicho anteriormente, un criterio de distribución de la orientación de las fibras en el que se dispongan en la dirección en la que va a ser cargado el elemento un 70% de las fibras dispuestas y el 30% restante se distribuya entre el resto de direcciones preponderantes (0,45,-45 o 90º).

Conforme a los criterios anteriormente expuestos, no se plantearán laminados en los que existan bloques de láminas de más de 0.5 mm de espesor. De esta manera, dado que los refuerzos empleados presentan un espesor de 0.07mm, con lo cual, en una misma dirección no se apilarán conjuntos de más de 7 láminas (0.49mm), intercalándose por tanto láminas de menor espesor entre estos grupos.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, plantearemos un diseño que tenga en cuenta las tres funciones estructurales asociadas a cada uno de los tres elementos que componen el cajón.

Estas tres funciones son asimilables a las mismas que pudiera tener una sección en cajón de una viga mixta/metálica. Para simplicidad de explicación podemos decir que

las funciones estructurales se dividen en dos, que son las mismas observables en un perfil en I:

-Las alas, que absorben predominantemente los esfuerzos longitudinales de flexión

-El alma, que absorbe los esfuerzos cortantes

De acuerdo a ello, definiremos tres tipos de laminados en función de si predominan los esfuerzos longitudinales o los esfuerzos de cortante.

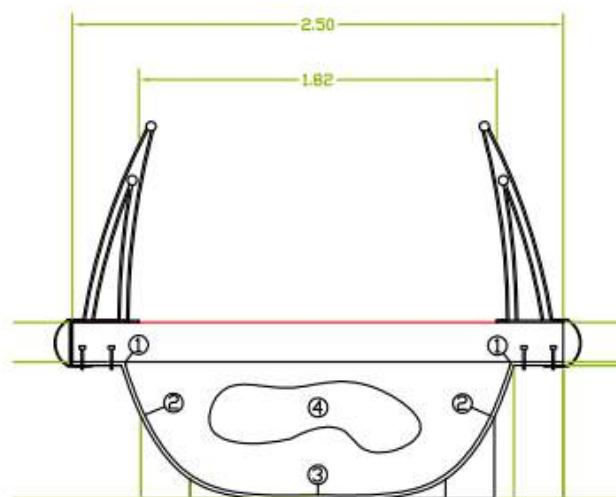
Laminado de las alas

En las alas tenemos un caso de flexión longitudinal provocada por las sobrecargas que actúan perpendicularmente a la losa así como la flexión transversal. Ello hace que el criterio seguido para el diseño del laminado sea colocar el 70% del laminado en la dirección longitudinal de la viga, repartiendo el 30% restante en las otras direcciones, dado que del estudio de los esfuerzos podemos comprobar que la flexión longitudinal resulta más importante que la transversal.

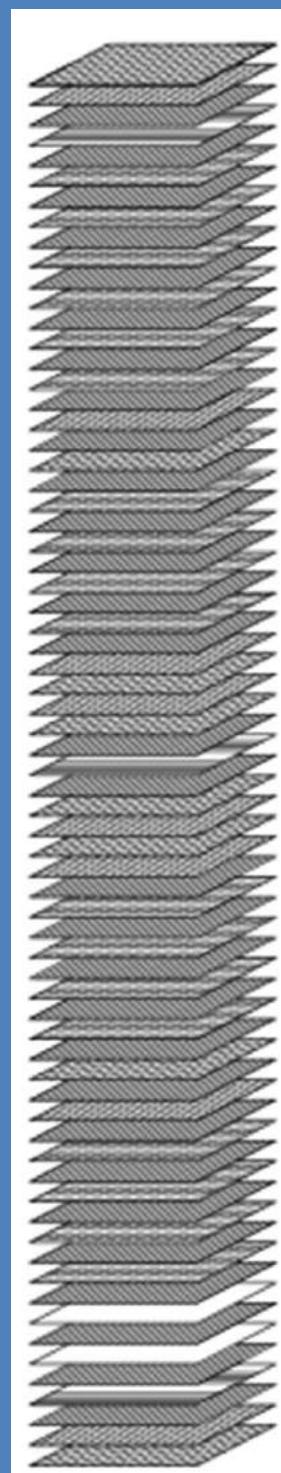
Este reparto del 30%, se divide entre un 20% de las que se disponen a 90° con respecto a la longitudinal y un 10% restante entre 45 y -45° .

El material empleado en las alas es compuesto de matriz epoxy M34 y refuerzo AS4 de fibra de carbono, ambos distribuidos por la casa HexCel., dado que consideramos las alas como zonas de compromiso estructural alto y, por tanto, las dotamos de las mejores características de rigidez y resistencia

El laminado de las alas está marcado con el número 1



ESQUEMA LAMINADO ALAS



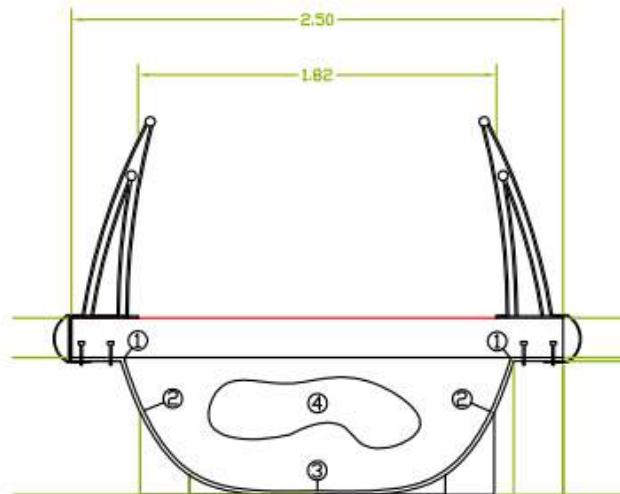
Laminado de las almas

De acuerdo a la función estructural que cumplen las almas del cajón, estos deben encontrarse dispuestos para resistir los esfuerzos de cortante. De esta manera, la orientación predominante en el laminado de las almas es la de +45 y -45°, dado que las tensiones principales de una pieza sometida a unas condiciones de tensión tangencial pura se orientan con esta inclinación.

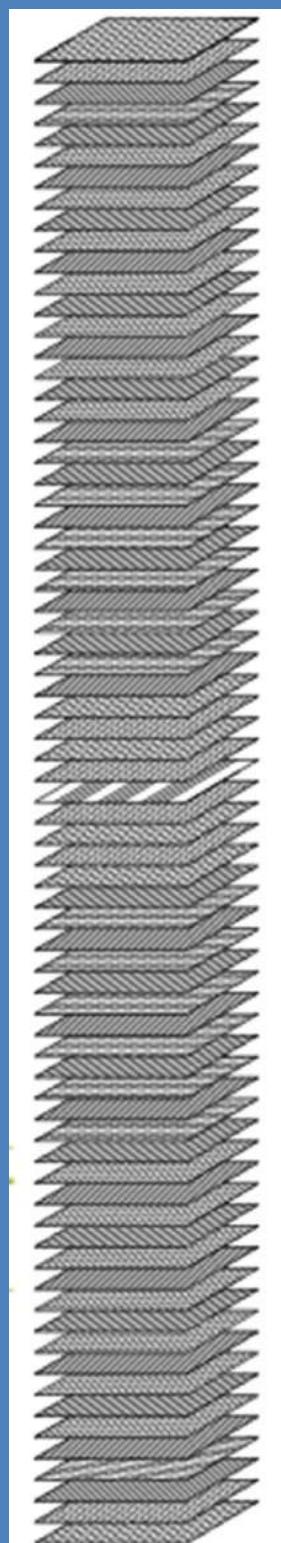
De esta manera el 35% de las fibras aparecen orientadas a +45, otro 35% a -45 (cumpliéndose así el 70% principal) y se orientan el 30% restante a partes iguales (15%) a 0º y 90º.

Las almas se consideran están constituidas de fibra de vidrio tipo E, ya que se consideran zonas de bajo compromiso estructural y podemos permitirnos, en aras de abaratar coste, un material de características estructurales más modestas, pero que cumplan con su cometido.

El laminado de las almas está marcado con el número 2



ESQUEMA LAMINADO ALMAS



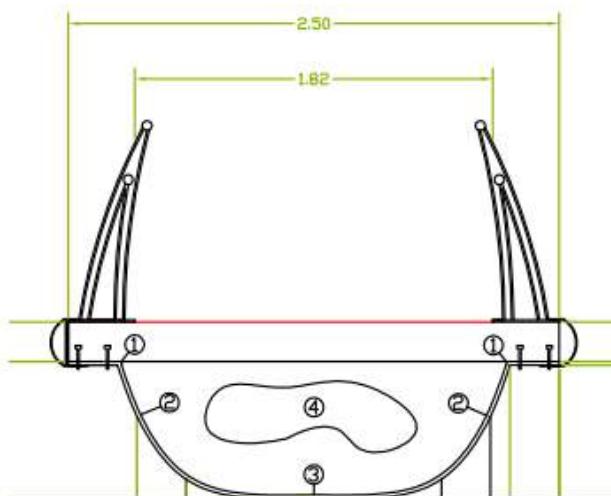
Laminado del fondo del cajón

La parte inferior del cajón es una pieza estructural sometida a unos esfuerzos importantes debido a que es la que recoge fundamentalmente los esfuerzos de flexión longitudinal de la estructura.

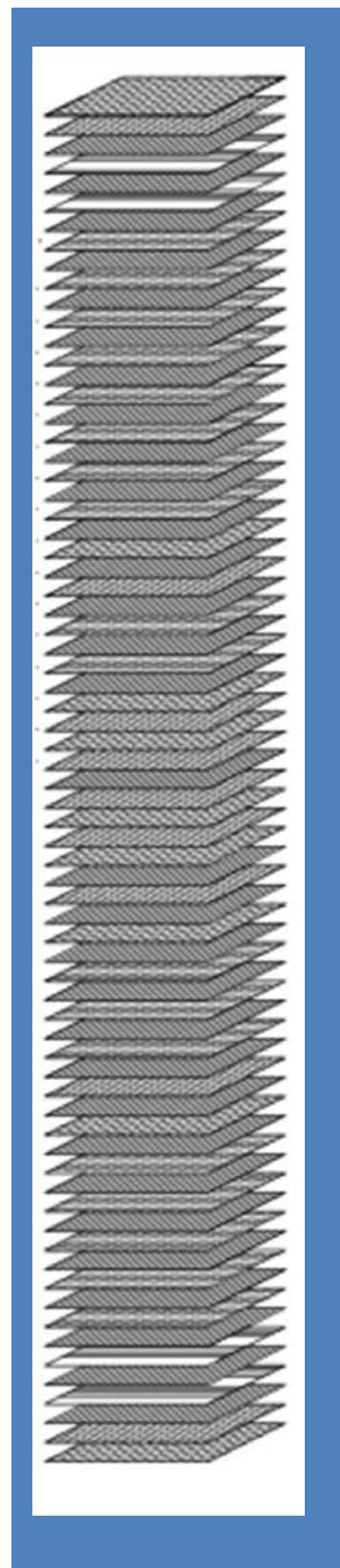
Así la distribución de la orientación de las fibras de refuerzo será idéntica a las dispuestas en el ala, pero en este caso repartiendo el 30% restante las fibras en direcciones de no carga primaria en proporciones iguales entre 45,-45 y 90°.

El material empleado, dado que consideramos este elemento como uno de alto compromiso estructural, será un compuesto con matriz epoxy M34 y refuerzo AS4 de fibra de carbono, ambos distribuidos por la casa HexCel.

El laminado del fondo de cajón está marcado con el número 3.



LAMINADO FONDO CAJÓN



Laminado de los diafragmas

Los diafragmas son elementos dispuestos en la estructura con tres cometidos claramente definidos:

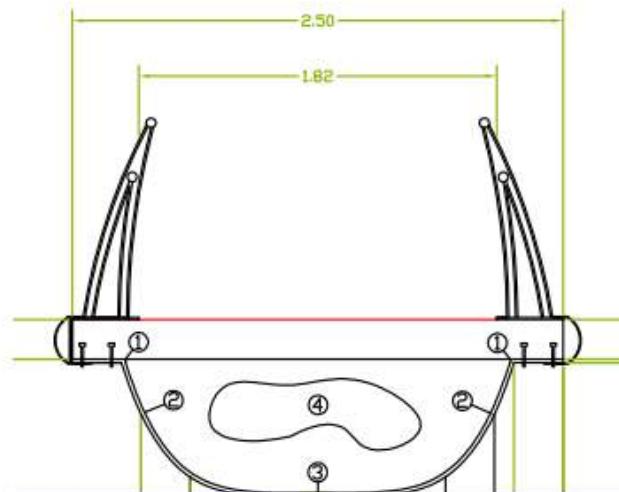
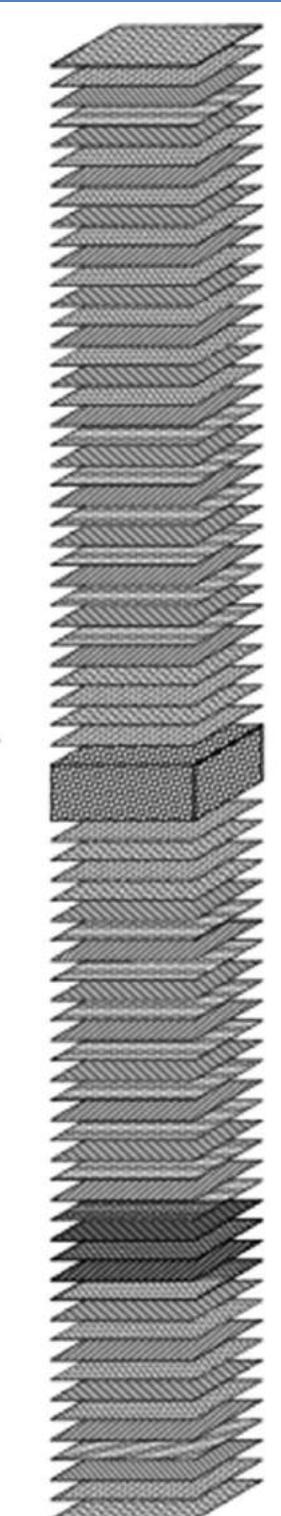
-servir como rigidizador, disminuyendo la longitud de pandeo de placa de las láminas que componen y aumentando, por tanto, la rigidez de la estructura y, con ello, mejorar el comportamiento ante el E.L.U. de Inestabilidad.

-favorecer que las láminas que conforman la sección transversal se deformen conjuntamente

- servir como mecanismo de transmisión de cortante de las cargas aplicadas a la losa.

El laminado del fondo de cajón está marcado con el número 4.

LAMINADO DIAFRAGMAS

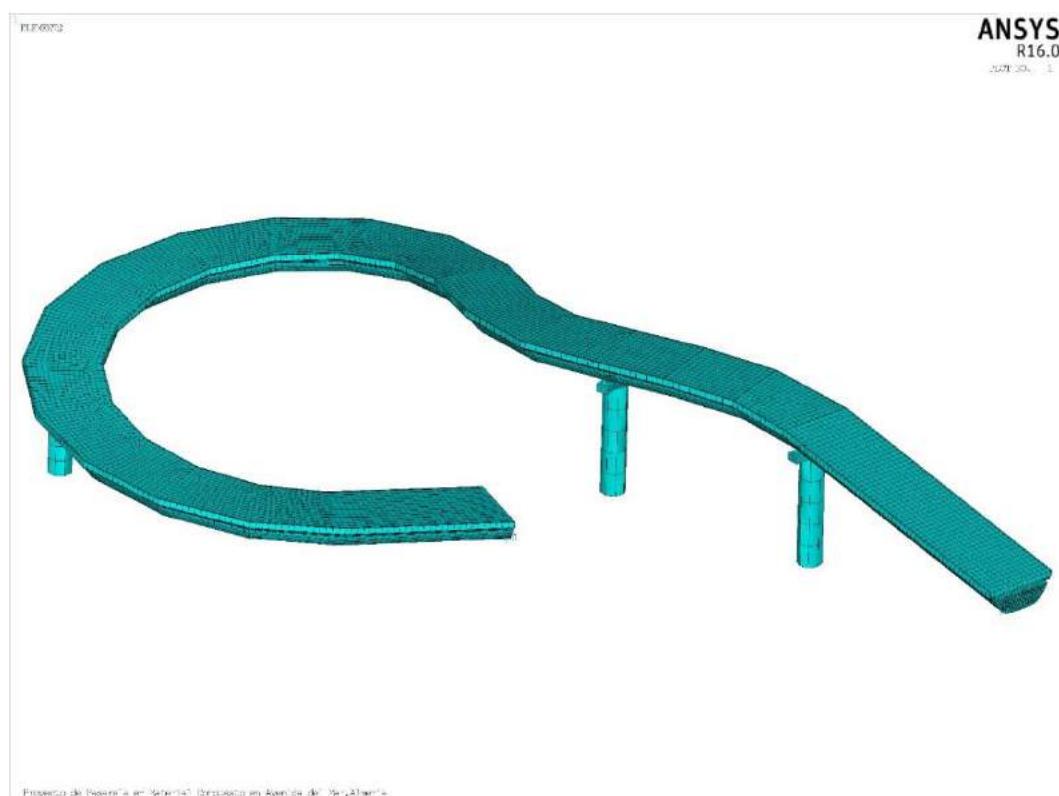


Justificación del Modelo

Introducción

Para el diseño estructural de la pasarela del proyecto hemos realizado un modelo de elementos finitos mediante un programa comercial ampliamente difundido como es el programa ANSYS, en su versión 16, empleándose para ello lenguaje de programación MAPDL del propio software. (MAPDL por sus siglas en inglés: Mechanical Ansys Parametric Design Language).

En este apartado se realiza una discusión de aquellas consideraciones realizadas en cuanto al software empleado y al modelado con él realizado de la estructura proyectada, explicando las asunciones tomadas, las simplificaciones pertinentes y el grado de representatividad buscado y alcanzado



Proyecto de Pasarela en General (Impresión en Avance de Verano)

Ilustración 70: Panorámica del modelo en elementos finitos (3D) realizado mediante el software comercial ANSYS16

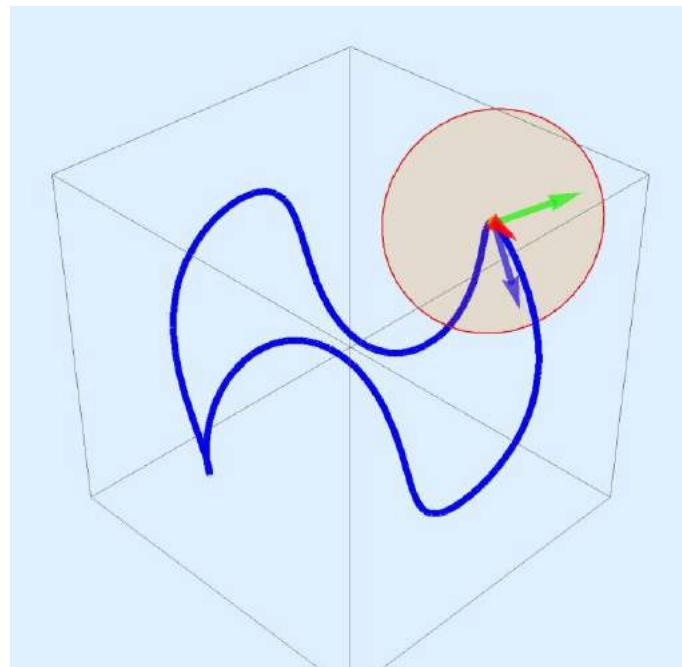
Software empleado

El software empleado de cálculo, tal y como hemos explicado anteriormente, es el ANSYS 16. La elección de este código comercial de elementos finitos de propósito general obedece a una serie de criterios los cuales pasamos a enumerar. Para comprobar los cálculos realizados así como para realizar representaciones 3D del laminado hemos empleado complementariamente el software Autodesk Helius.

- Sus elementos laminados permiten una modelización efectiva de la secuencia de laminados propuesta así como calcular las tensiones en cada lámina. ANSYS presenta elementos laminados que realizan automáticamente la matriz de comportamiento del material recibiendo como input la secuencia de apilado de láminas. Estos elementos (concretamente el SHELL281) son los que hemos empleado en su modelado
- Actualmente, el software disponible para el diseño de compuestos tiende a centrarse en la optimización del laminado, sometiendo a laminados tipo a estados de cargas simples a flexión, tracción, etc. Este es, por ejemplo, el caso de Autodesk Helius. Este software se ha empleado para realizar comprobaciones simplificadas con las que acreditar nuestro modelo (tanto para realizar comprobaciones a la estructura sándwich de los diafragmas como para cotejar los cálculos de criterios de fallo realizados por ANSYS)
- Sin embargo, es cierto que estos programas nos pueden servir para realizar comprobaciones puntuales, pero no es programa de elementos finitos que nos permita calcular esfuerzos ni tensiones para los casos de cargas propios a los que se encuentran sometidos los elementos que conforman nuestra estructura.
- De esta manera, podemos observar que programas como ANSYS o ABAQUS pueden servir como punto intermedio entre los programas únicamente destinados a realizar comprobaciones y los programas de elementos infinitos ya que presentan elementos laminados que realizan los cálculos de las matrices de comportamiento de los laminados e integran criterios de fallo empleados en la actualidad (de los cuales se hablan con mayor profundidad en posteriores apartados) como pueden ser los criterios de Máxima Tensión y Deformación, criterios de Puck, Tsai-Wu, Hashin, LaRc03 y LaRc04.
- ANSYS es un software de elementos finitos ampliamente difundido y usado, tanto en la industria como en entornos educativos y universitarios. Tal es el caso de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

Modelado de la geometría.

El diseño de una geometría compleja lleva aparejada un modelado de la misma de forma también compleja. No obstante, mediante la metodología seguida, se puede realizar un modelado eficaz de la misma sin complicaciones excesivas. El proceso seguido para la asimilación de la geometría es la misma. Esta idea parte de la definición del Triedro de Frenet (Rodríguez Danta & Bellver Cebreros, 2010)



1.- Obtención de las coordenadas de los puntos del trazado de la pasarela mediante el programa AutoCAD de Autodesk. Ello se puede realizar de una manera

rápida mediante la rutina .lisp PO2TXT que se puede encontrar en (ConstruAprende, 2010). Para uso, basta con marcar en AutoCAD con la orden PUNTO los puntos que queramos trasladar y después ejecutar la orden PO2TXT. De esta manera obtenemos un fichero .txt en el que nos aparecen las coordenadas. Las mismas pueden ser fácilmente tratadas en EXCEL para trasladarlas a un sistema local si las coordenadas del plano están en UTM, por ejemplo.

2.-Creación de sistemas de coordenadas locales en cada punto de definición del trazado de la pasarela. Estos sistemas de referencia locales estarán orientados hacia el siguiente punto del trazado de la pasarela y serán coplanarios con la sección transversal de la pasarela por el punto del trazado. Para ello suele ser necesario crear puntos auxiliares (para los cuales se recomienda realizar el mismo proceso que en 1.).



Fuente: AutoCAD 2010, ANSYS R16.0

Ilustración 73: Sistemas de Coordenadas Locales creados para la creación de la geometría y mallado de elementos

3.-Introducción de los puntos del diseño en ANSYS

4.-Creación de los sistemas de referencia locales en ANSYS.

5.-Creación de los puntos de la primera sección transversal y exportado a ANSYS.

6.-Mediante un bucle *DO que vaya saltando de un sistema de referencia local (CSYS) a otro podemos mantener el mismo código de la sección transversal, ya que su posición varía con el sistema de referencia local, manteniéndose de esta manera (en el sistema de referencia local) de la misma forma.

7.-Unión de los Keypoints mediante líneas y/áreas.



Ilustración 74 Líneas que constituyen la geometría del modelo

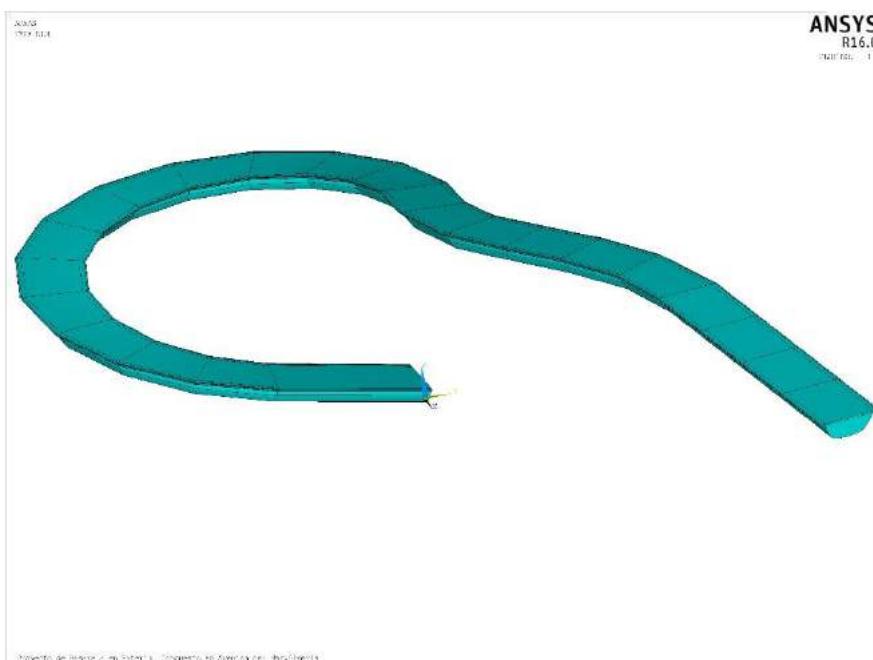


Ilustración 75: Áreas que constituyen la geometría del modelo

Elementos a emplear. Discusión

En este epígrafe realizamos una discusión acerca de los tipos de elementos, sus capacidades y restricciones y el grado de representatividad buscado y alcanzado en la modelización de los distintos elementos que componen la pasarela.

Elementos Tipo Placa

Dentro del software de elementos finitos a emplear para el cálculo estático, dinámico y de pandeo de nuestra pasarela, ANSYS, existen numerosos elementos empleados para representar el comportamiento estructural de una placa. De acuerdo a la geometría prevista para nuestra pasarela, deberemos seleccionar aquellos elementos que cumplan una serie de requisitos que exponemos sucintamente a continuación:

- Deben ser elementos a priori que consideren la deformación por cortante dado que canto de una magnitud considerable (aquellos que tengan en cuenta la losa superior de hormigón) pueden ser necesarios
- Deben ser elementos cuyo comportamiento sea positivo a la hora de modelar placas con curvatura inicial elevada debido a los condicionantes de aprovechamiento del material tanto en manufactura (desmoldado) como ante cargas (aerodinámica), así como condicionantes estéticos.
- Mediante el modelado debemos ser capaces de calcular los esfuerzos pertinentes, así como las posibles tensiones laminares e interlaminares que puedan llevar a un fallo en función de los distintos criterios propuestos.

Teniendo en cuenta lo explicitado anteriormente, realizamos una breve exposición de los elementos referenciados por bibliografía de consulta empleada (Barbero, 2008) (Madenci & Guven, 2006) y los manuales de la versión 15.0 del programa, en su capítulo dedicado a compuestos (ANSYS Inc., 2014).

En primera aproximación conviene realizar una diferenciación entre aquellos elementos que crean la matriz de comportamiento del material mediante introducción directa (a lo que se tiende a llamar A-B-D-H input) o si la calcula internamente en función de propiedades de lámina, orientaciones/direcciones preferentes de las fibras de refuerzo y teoría de laminados (Laminate Stack Sequence, LSS). Un elemento u otro nos llevarán a establecer un mayor o menor grado de precisión en función de la realidad que se represente

La consideración anterior es de vital importancia, todo aquel elemento que no aparezca definido por su LSS no puede ser pertinente del cálculo de tensiones y de aplicación de un criterio de fallo. Ello no implica, no obstante, que al laminado propuesto

se le puedan calcular unas propiedades equivalentes que introducir como ley de comportamiento o la asimilación de esta ley a una consideración ortótropa con las que seamos capaces de calcular unos esfuerzos que resultarán similares a los obtenidos mediante un elemento similar que se defina por secuencia de laminado. Tal y como se explicó anteriormente, se preferirá emplear elementos definidos por secuencia de laminado, sin que ello nos lleve a descartarlos prematuramente, para poder enjuiciar correctamente sus propiedades.

Para ello, haremos especial hincapié en aquellos recogidos en (Barbero, 2008). Asimismo también tendremos en cuenta que en las versiones actuales de ANSYS (estamos empleando la 16) existen algunos de estos elementos que han sido eliminados y sustituidos masivamente por el SHELL181 y el SHELL281

Elementos Placa No Laminados

Dentro de los elementos placa no laminados, encontramos los siguientes:

- SHELL43 (Barbero, 2008)
 - Elemento placa de cuatro nodos
 - Susceptible de modelización de comportamiento plástico del material, pero NO de grandes deformaciones
 - Teoría de Primer Orden (Reissner-Mindlin, deformación por cortante)
 - En caso de que sea necesario un análisis no lineal se recomienda el SHELL181 por su mejor formulación y representatividad de grandes deformaciones
- SHELL63 (Barbero, 2008)
 - Elemento Placa de Cuatro Nodos
 - Teoría de placas de Kirchhoff-Placa Delgada (no considera la deformación por cortante)
 - Susceptible de modelización comportamiento plástico del material, pero NO de grandes deformaciones
 - Según (Barbero, 2008) se recomienda el empleo del Shell93 en lugar de este
- SHELL93 (Barbero, 2008)
 - Elemento Placa de Ocho Nodos
 - Formulación Idónea de Placas Curvas, debido a que las funciones de deformación son cuadráticas en ambas direcciones del plano medio del elemento
 - Teoría de Primer Orden-Placa Gruesa o de Reissner-Mindlin (considera deformación por cortante)
 - Susceptible de modelización de comportamiento plástico del material y de grandes deformaciones

De acuerdo a lo expuesto, el mejor elemento para hacer una modelización reducida y aproximada, mediante la que poder calcular los esfuerzos para determinados laminados y atendiendo a nuestras necesidades sería el Shell93

Elementos de Placa Laminados

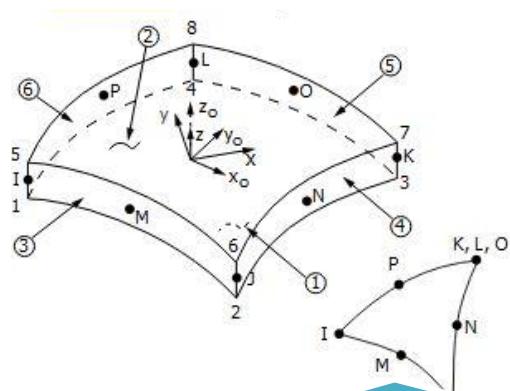
Aquí encontraremos diferencias no solo en la formulación de los elementos y las hipótesis que asumen, sino también en cómo se estructuran los inputs

- SHELL91 (Barbero, 2008)
 - Elemento Placa de Ocho Nodos
 - Teoría de Primer Orden o de Reissner-Mindlin (tiene en cuenta la deformación por cortante). Por tanto, se modelan correctamente láminas gruesas y/o estructuras sándwich
 - Susceptible de modelización de comportamiento plástico del material y de grandes deformaciones
 - INPUT: Elemento definido por LSS (hasta 100 láminas, mediante Real Constants)
 - Comparación con otros elementos
 - Necesita más tiempo de cálculo que SHELL99
 - Es más robusto que SHELL99 para análisis No-Lineal
- SHELL99 (Barbero, 2008)
 - Elemento Placa de 8 Nodos
 - Teoría Clásica de Placa Delgada o de Kirchoff-Love (No considera deformación por cortante)
 - No considera Modelados de comportamiento no lineal
 - Presenta “offset” de nodos en el centro, en la parte superior y en la inferior.
 - INPUT: Se pueden introducir hasta 250 capas mediante Real Constants. En caso de que se necesiten más capas, se puede introducir una matriz A-B-D-H (matriz constitutiva del material, siempre y cuando se active la KEYOPT(2)=2)
 - Comparación con otros elementos: viceversa de lo dicho para el SHELL91
- SHELL181 (Barbero, 2008)
 - Elemento placa de Cuatro Nodos
 - Teoría de Primer Orden o de Reissner-Mindlin (tiene en cuenta la deformación por cortante). Por tanto, se modelan correctamente láminas gruesas y/o estructuras sándwich
 - Susceptible de modelización de comportamiento plástico del material y de grandes deformaciones

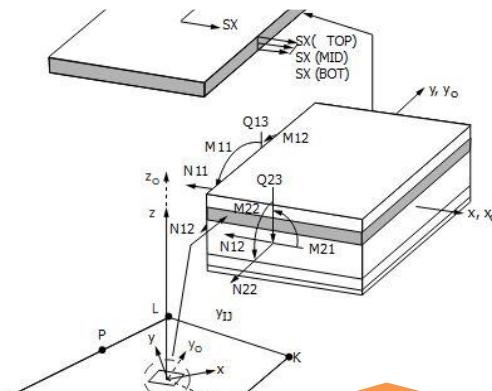
- El elemento se adapta razonablemente bien a análisis lineales y no-lineales y presenta capacidad para modelar grandes deformaciones
- INPUT: LSS mediante Secciones (No Real Constants). Se permiten hasta 250 capas.
- ANSYS recomienda el uso de KEYOPT(3)=2 para los análisis de material compuesto (Activando esta opción se permite procesar el gradiente de tensiones)
- SHELL281 (ANSYS Inc., 2014)
 - Elemento placa de Ocho Nodos
 - Cálculo más aproximado y enfocado a geometrías con curvatura inicial
 - Teoría de Primer Orden o de Reissner-Mindlin (tiene en cuenta la deformación por cortante). Por tanto, se modelan correctamente láminas gruesas y/o estructuras sándwich
 - Susceptible de modelización de comportamiento plástico del material y de grandes deformaciones
 - El elemento se adapta razonablemente bien a análisis lineales y no-lineales y presenta capacidad para modelar grandes deformaciones
 - INPUT: LSS mediante Secciones (No Real Constants). Se permiten hasta 250 capas.

Elementos Placa Elegido

El elemento empleado para los cálculos finales fue el SHELL281



Definición elemento

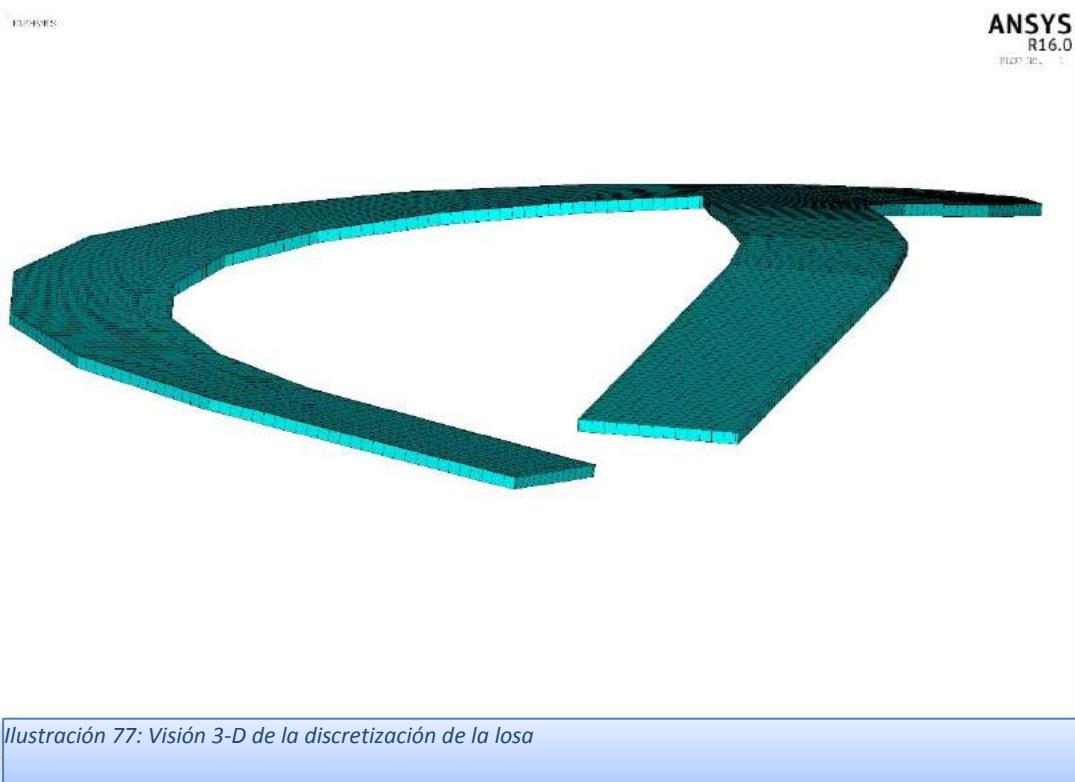
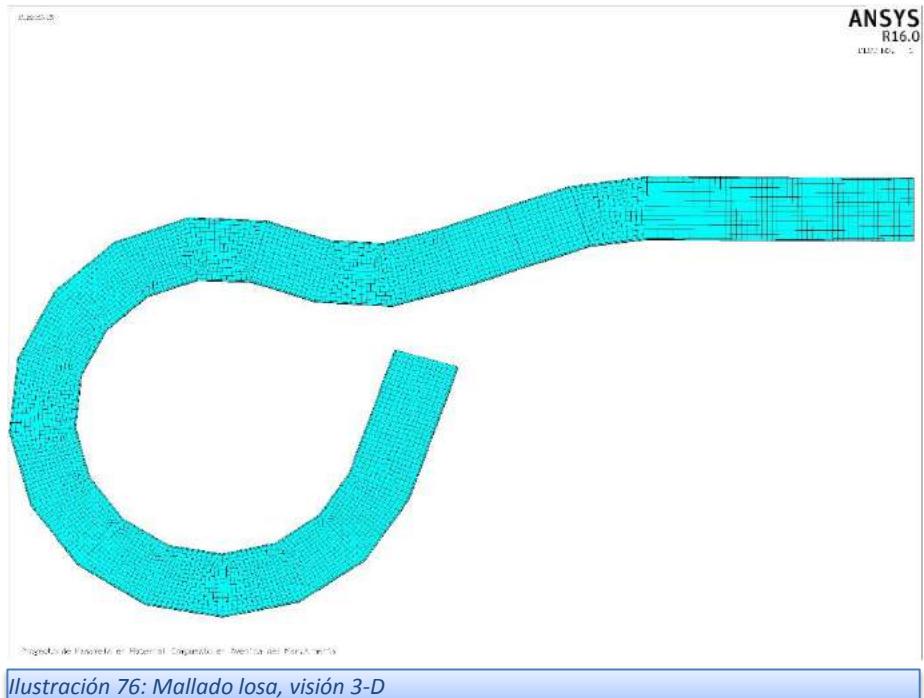


Output de esfuerzos
y tensiones

Mallado Losa de hormigón

A continuación explicaremos el modelado de los diferentes elementos placa que conforman la pasarela.

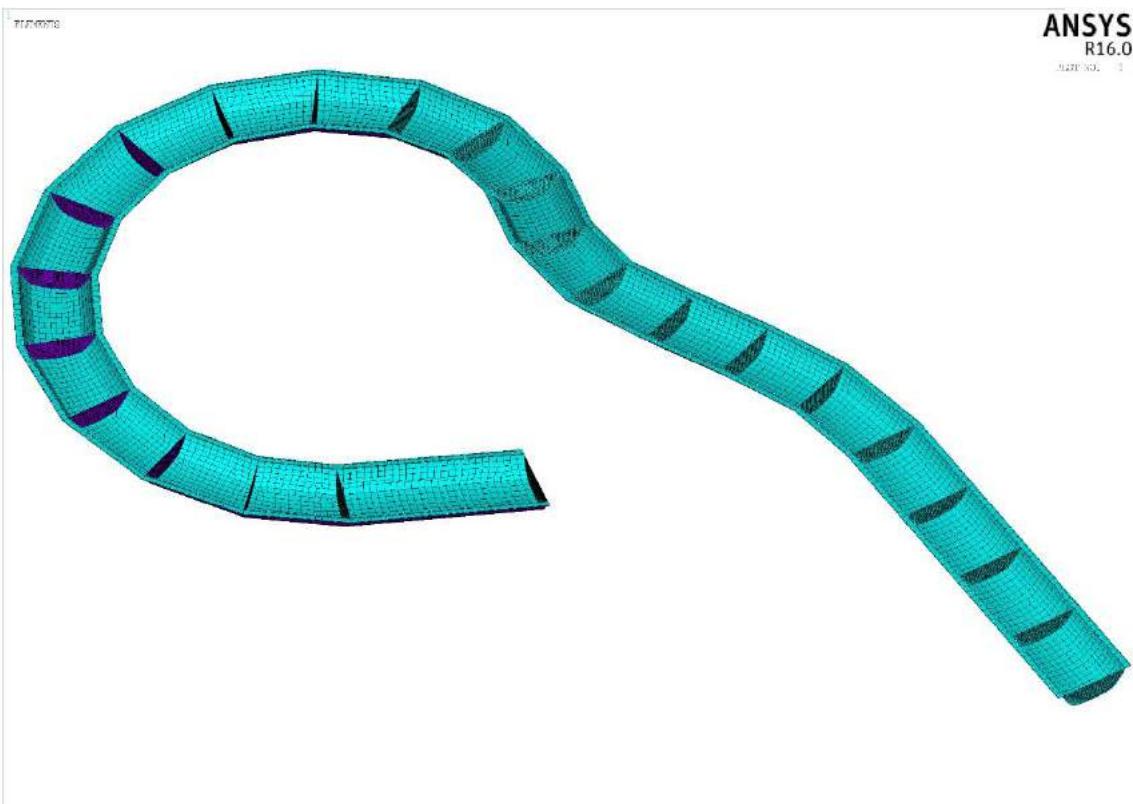
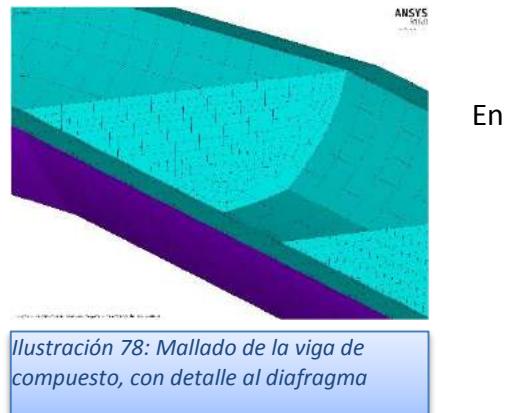
La losa de hormigón se ha realizado mediante el mallado de cada una de las 23 áreas que definen la losa geométricamente en el modelo. El tamaño de elementos empleados es uniforme y de valor 0.2m y el tipo de elemento es SHELL281, unicapa.



Modelado Viga de Material Compuesto

De la misma manera que hicimos con la losa, el modelado de la viga corresponde con un mallado de tamaño de elemento 0.2m del elemento SHELL281 multicapa, introduciéndose una a una las láminas de compuesto (admitiéndose que los paquetes de 7 láminas de 0.07mm son láminas de espesor 0.49mm).

En cuanto a los diafragmas colocados, estos rigidizadores se disponen, como se ha dicho anteriormente, a 2.5 metros de distancia. Los mismos se han resaltado el mallado (tamaño 0.05) para precisar los valores en la unión.



Elementos de conexión entre losa y viga: pernos conectadores. Discusión

Para los pernos conectores son necesarios elementos que sean capaces de controlar el comportamiento propio de los mismos. Para ello debemos tener en cuenta que los pernos son elementos de corta longitud dispuestos en las alas de la viga en cuestión para garantizar la unión (ya sea de manera dúctil o frágil) entre la losa y la viga, siendo pues dimensionados para soportar el esfuerzo rasante entre ambos.

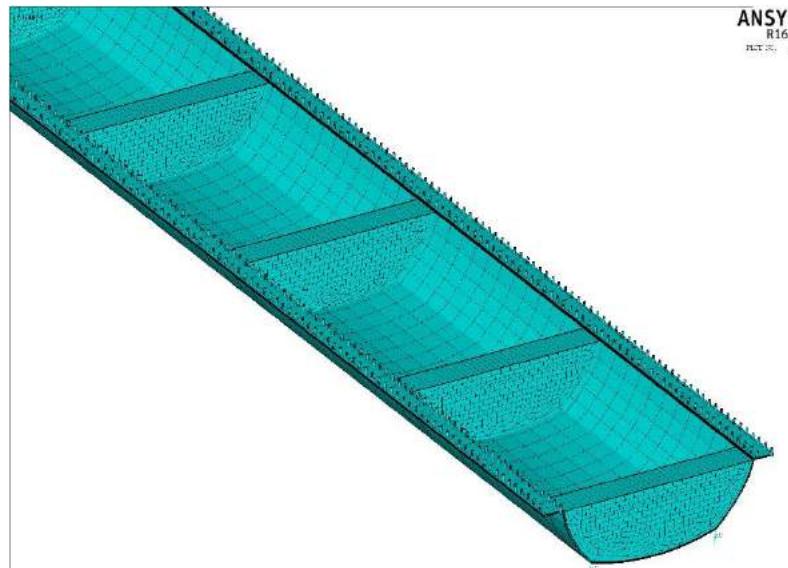


Ilustración 80: Detalle modelado de los pernos con BEAM188

Según lo anteriormente explicado, son los pernos conectores elementos que deben ser capaces de resistir cortante, por lo tanto, a un elemento de estas características se le deben presuponer tanto que se modelen razonablemente bien las deformaciones como los esfuerzos cortantes. Son posibles candidatos para la modelización de esta unión.

- COMBIN14: elemento de combinación muelle/amortiguador

Los elementos COMBIN14 son elementos asimilables a los elastic links de otros paquetes de elementos finitos existentes. Consisten en un elemento unidimensional que aporta rigidez solo en la dirección en la que se define (de acuerdo a lo especificado en los KEYOPT's empleados)

- COMBI39: elemento de unión con entrada de ley de comportamiento.

Los elementos COMBIN39 constituyen un avance respecto a los COMBIN14, dado que estos permiten introducir la curva esfuerzo-desplazamiento y con ello el comportamiento no-lineal a medida que fallan los pernos. Generalmente, estas leyes esfuerzo-desplazamiento se introducen dentro de los programas de elementos finitos de manera simplificada, dado que los cálculos no lineales requieren de la actualización de la matriz de rigidez en cada iteración, lo cual es computacionalmente muy costoso.

Las leyes carga-desplazamiento en pernos en diseño suelen poseer curvas que siguen la forma

$$P(S) = P_u(1 - e^{-\beta|s|})^\alpha$$

Siendo P_u la carga última del perno y el resto de parámetros coeficientes propuestos por diversos autores.

Existen estudios que buscan simplificar estas leyes carga-deslizamiento, transformándolas, dándoles un carácter trilineal, más sencillo de manipular computacionalmente y adquiriendo las mismas un carácter conservador.

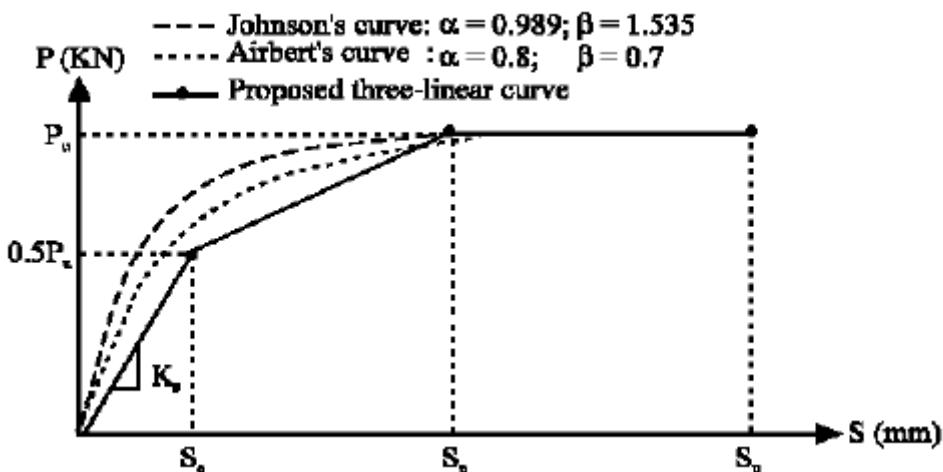


Ilustración 81: Ejemplo de simplificación de curva carga desplazamiento para pernos conectores (Titoum, et al., 2008)

No obstante, el empleo de estos elementos sigue siendo computacionalmente costoso y su mayor aproximación a la realidad no es rentable para el modelado que se espera de la viga en su conjunto, en la que se prevén que el fallo provenga de la viga de compuesto.

- **BEAM 188**

El elemento BEAM 188 es un elemento tipo viga basado en la Teoría de Timoshenko que tiene en cuenta la deformación por cortante. En este sentido, la modelización mediante el elemento BEAM 188 puede resultar muy aproximada, ya que modela el elemento como una “viga” de las dimensiones que posee en la realidad, lo cual es suficientemente aproximado y computacionalmente no costoso. Asimismo, el modelado supone, por simplicidad, la viga de sección constante,

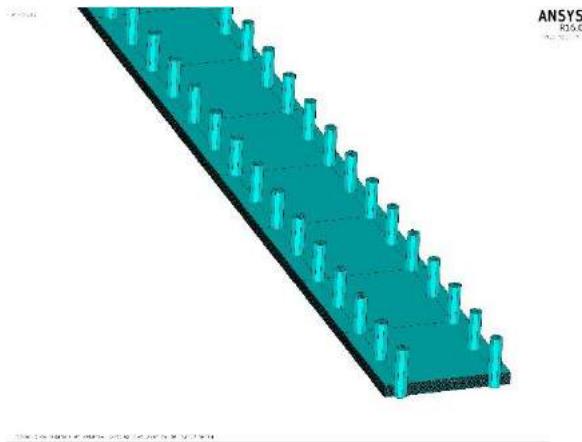


Ilustración 82: Modelado de los pernos conectores

Tipo de elemento elegido para perno conectador

Finalmente, el elemento elegido para el modelado de los pernos conectores ha sido el BEAM 188 dado que ofrece una aproximación suficiente de la solución real modelando un elemento de sus mismas dimensiones y mostrándose computacionalmente menos costoso. El modelado se realiza seleccionando las líneas dispuestas para ello en la geometría del modelo y creando elementos por tolerancia (comando **EINTF**)

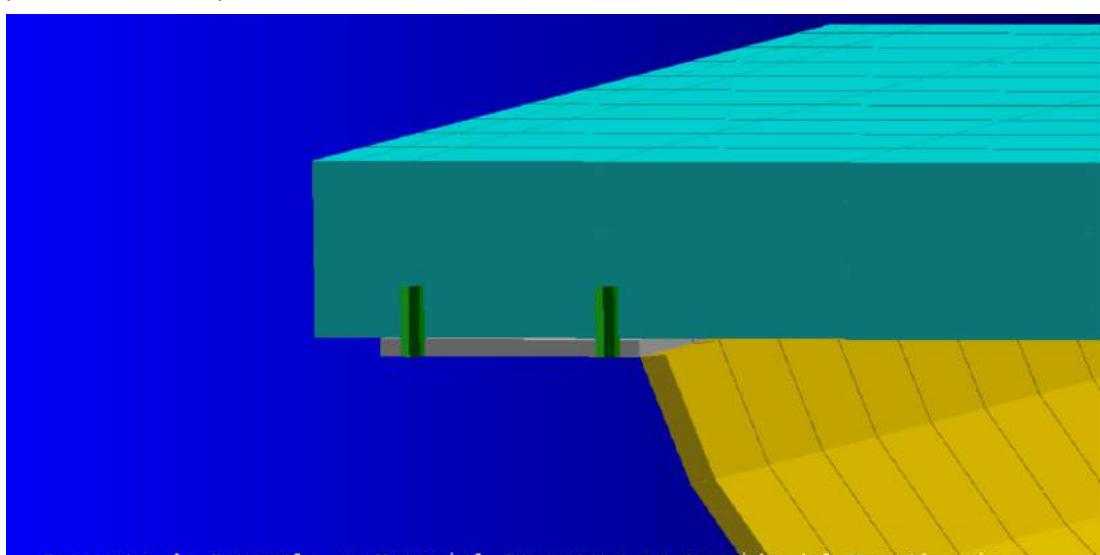


Ilustración 83: Detalle del modelado de los pernos conectores. En él se puede observar el “gap” existente entre ala de compuesto losa y conectores

Elementos de conexión entre viga y pila: aparatos de apoyo

La elección de aquellos elementos para el modelado de los aparatos de apoyo debe ser congruente con el elemento estructural que tienen que representar y que, al mismo tiempo, no represente un gasto computacional y una complicación excesiva del problema que no represente una ganancia de precisión y/o representatividad del cálculo. En este sentido, los apoyos de neopreno son placas de neopreno zunchados con láminas de acero. Para representar de una manera semejante a la realidad la interacción entre viga-neopreno-pila sería necesario:

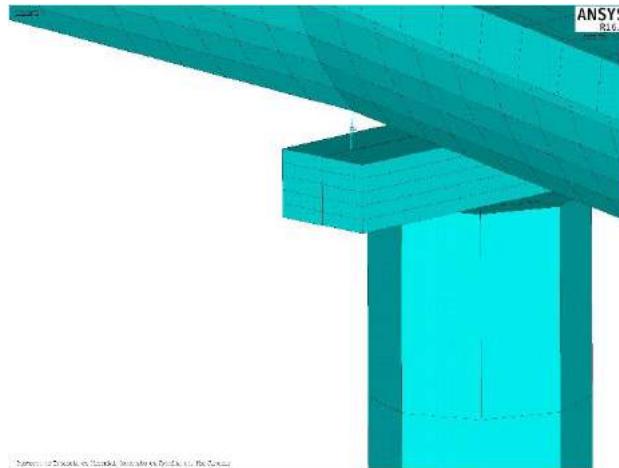
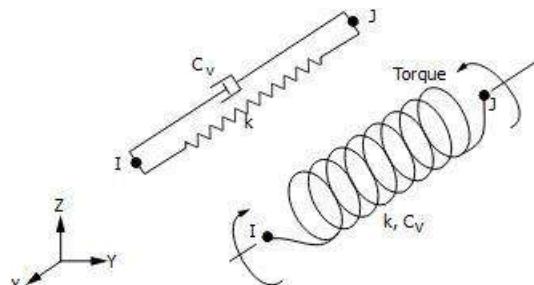


Ilustración 84: Detalle de la conexión mediante un "elastic link", un elemento COMBIN14

- Un material elastoplástico que modele el comportamiento del neopreno
- Un problema de contacto entre viga-neoprenos y neoprenos-pila

Esta modelización del problema implica una complicación tanto formal como computacional, que como hemos dicho, no parece necesaria dado que el diseño y los valores de rigidez del neopreno aparecen cubiertos para los cálculos pertinentes por la normativa citada, con lo que el estudio del material y del elemento se supone implícito en las guías de diseño. De esta manera, el empleo de tres elementos muelle COMBIN14, en los que cada uno presente rigidez en cada una de las tres direcciones del sistema de referencia local (X, Y, Z) de la formación de la geometría, siendo la vertical de mayor rigidez en las coplanares con el elemento.

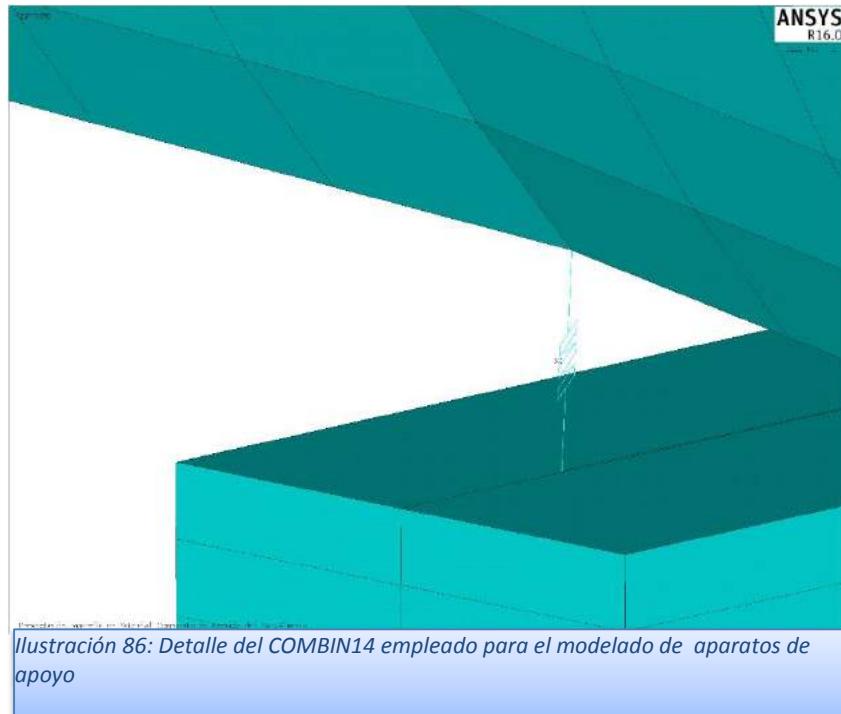


2-D elements must lie in a $z = \text{constant}$ plane

Ilustración 85: El elemento elegido para la modelización de aparatos de apoyo es el COMBIN14

Los elementos COMBIN14 (combinación muelle/amortiguador) son pues el tipo de elemento escogido para la modelización de la unión entre pilas y viga de la pasarela mediante los apoyos de neopreno zunchado. Para ello, como ya hemos dicho, se modela cada neopreno con tres elementos unidireccionales:

- Uno de los elementos une verticalmente pila y viga. A este se le asocia la rigidez vertical propia del neopreno



- Los otros dos elementos modela la deformación transversal del neopreno. Por tanto, se les asocia a cada uno las rigideces en dirección x e y propias del neopreno calculado.

Elemento elegido

Finalmente el elemento elegido para el modelado de apoyos es el COMBIN14, dado que nos ofrece la capacidad de modelar los apoyos como “elastic link”, uniones elásticas, que es el comportamiento aproximado de los mismos.

Elementos para modelado de pilas

El modelado de las pilas debe ser capaz de representar el efecto que sobre la viga híbrida transmiten la flexión de las pilas. De esta manera, con el modelado de las pilas no buscamos realizar una representación en detalle de la misma, sino una simplificada

que nos permita trasladar al modelo el efecto antes mencionado y obtener los esfuerzos de una manera simplificada, dado que la elección del armado para la misma se adecuará a lo previsto en la normativa de hormigón vigente (la EHE-08) sin considerar estudios a un nivel de detalle similar al de la viga híbrida, cuyo ámbito normativo es mucho más laxo y, por tanto, el nivel de detalle a aportar por el proyectista debe ser más exhaustivo.

Para modelizar las pilas se han planteado tres opciones, a saber:

- Modelado de la pila mediante elemento triangulares SOLID185. Este procedimiento permite representar la pila con la precisión definida en proyecto, ya que se elabora un volumen que después es mallado. Sin embargo, computacionalmente resulta costoso y no nos aporta, a priori, una información mucho más precisa de la que, para el uso que prevemos de la misma, pudiéramos necesitar.
- Modelado de la pila mediante un elemento BEAM188 de sección variable. Si bien es cierto que la pila presenta claramente dos zonas (una de pilar y otra de capitel), ambas partes aparecen tan claramente diferenciadas que emplear un elemento BEAM de sección variable se muestra poco representativo.
- Emplear un modelo viga dividido en dos tipos de elementos en función del tramo: una para el tronco del pilar y otro para el capitel. Mientras que la sección del pilar es similar a la que presenta en la realidad (circular), la del capitel es una sección rectangular cuya inercia resulta equivalente con respecto a la que presenta el capitel diseñado para el proyecto.

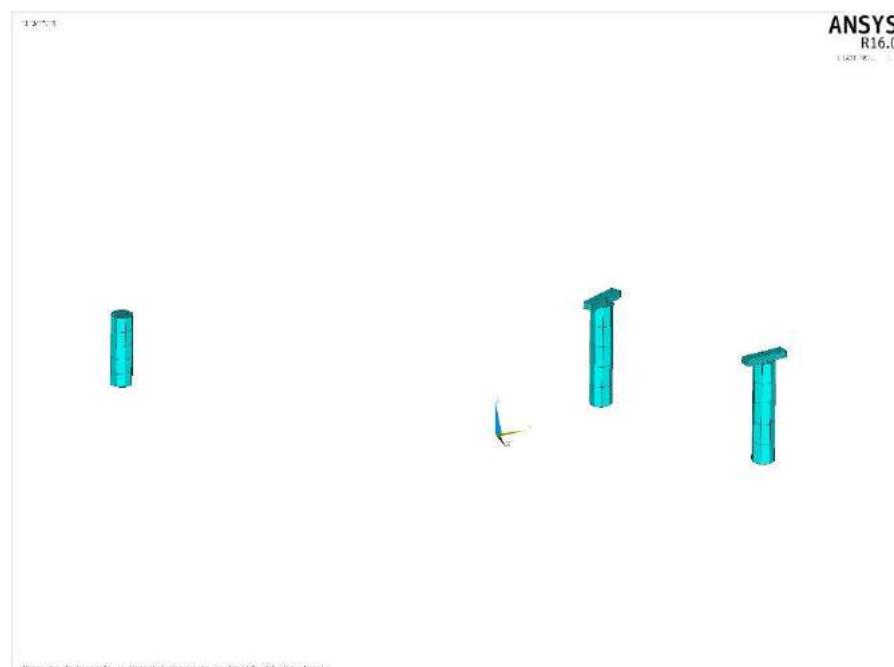


Ilustración 87: Posición y modelado de las pilas en ANSYS

Elemento elegido

Finalmente la opción empleada para el modelado de las pilas ha sido la última opción expuesta: la de modelar la pila mediante elementos viga (BEAM188) de sección distinta en función de si nos encontramos en la cabeza de la pila o en su tronco. La decisión ha sido tomada ya que nos permite, con un coste computacional relativamente bajo nos permite obtener los esfuerzos de armados de la misma (axiles, cortantes, deflectores). Se ha considerado suficiente la aproximación de los esfuerzos de diseño con 5 elementos.

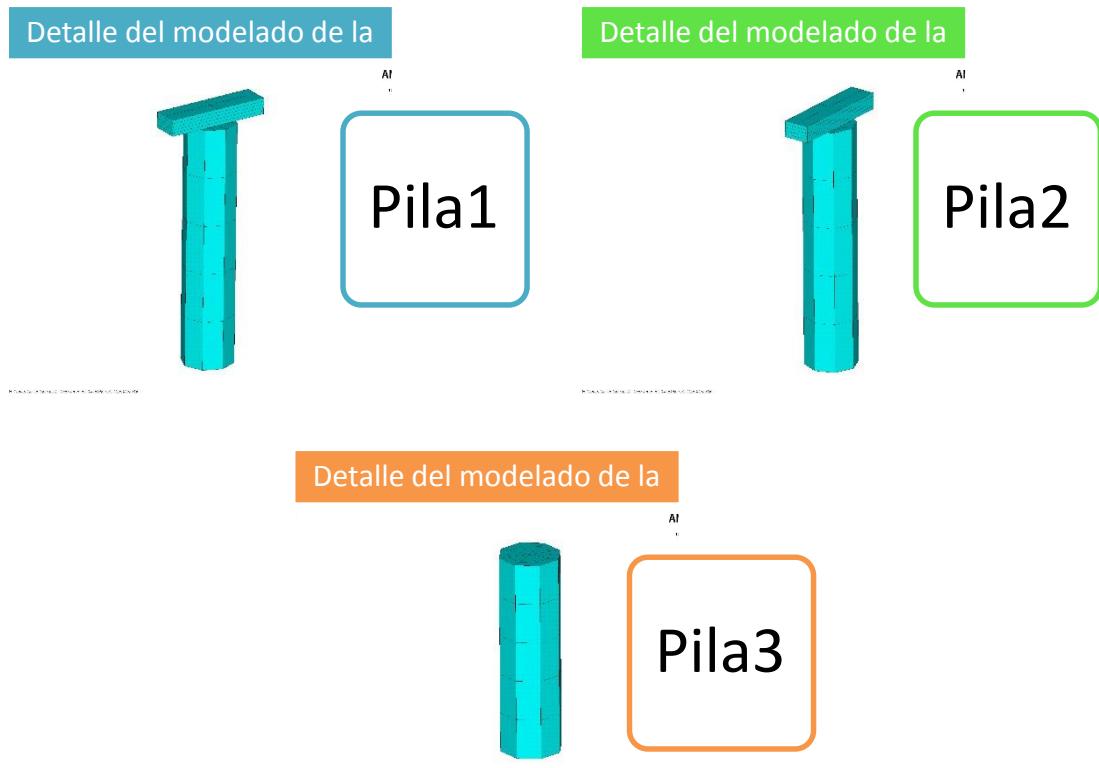


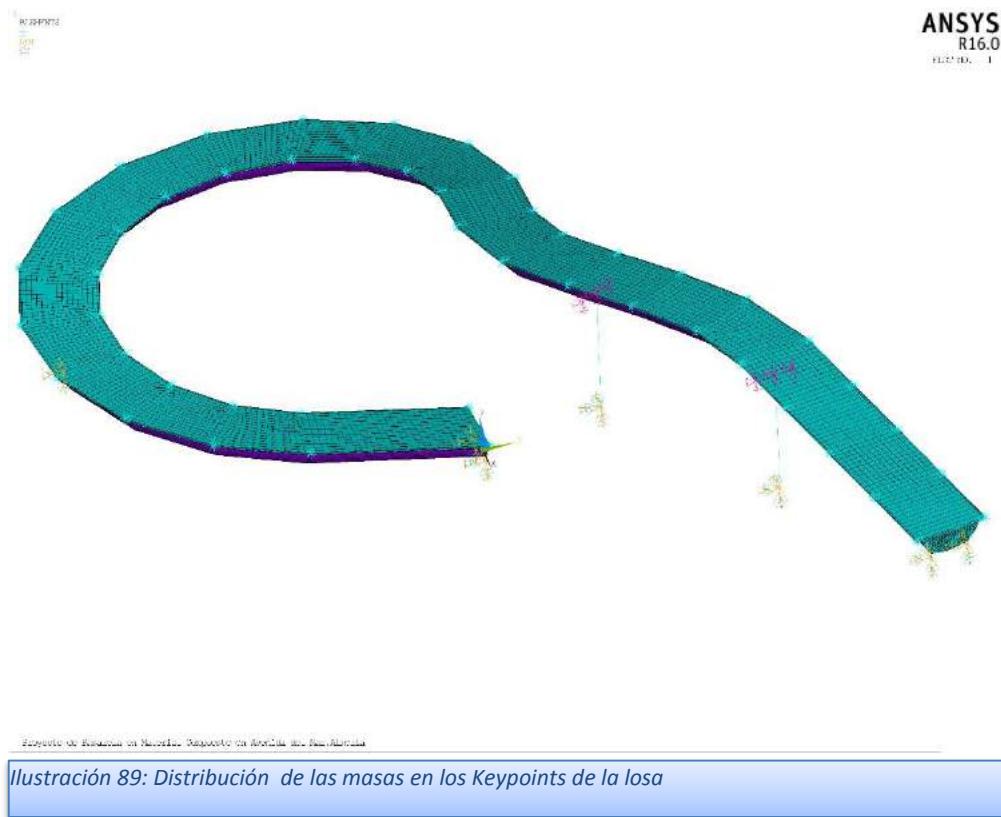
Ilustración 88: Detalle de modelado de las pilas

Elementos para modelado de masa no estructural

Para el reparto de la masa no estructural para cálculos estáticos y modales se ha realizado un reparto equitativo de la misma entre los keypoints que conforman la geometría de la losa superior. De esta manera se han tenido en cuenta dos pesos:

- Las masas del pavimento de la pasarela, estimada en $50 \frac{kg}{m^2}$
- Los masas asociadas a los peatones para realizar el primer cálculo modal previo, estimadas en $70 \frac{kg}{m^2}$

De esta manera, se calculan las masas totales asociadas al área de la losa de hormigón y se reparten de manera equitativa en los keypoints.



Aparatos de apoyo

Introducción

Para el cálculo de los aparatos de apoyo se han tenido en cuenta las siguientes normativas:

- UNE-EN 1337-1: Reglas Generales
 - UNE-EN 1337-3: Apoyos Elastoméricos
 - UNE-EN 15129-11: Dispositivos antisísmicos
 - (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1982)
-
- La selección concreta del aparato se realizó a partir del catálogo del catálogo de la empresa MeKaNo 4, conocida por sus siglas MK4, (MK4, 2015).

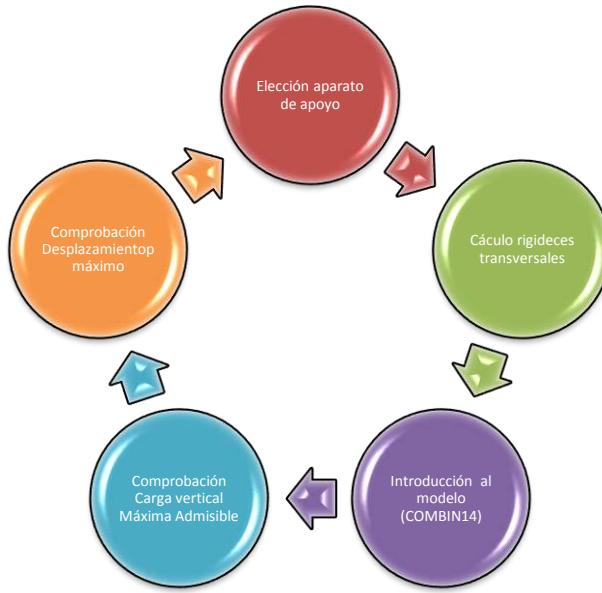
Diseño de Aparatos de Apoyo

Los aparatos de apoyo escogido serán aparatos de apoyo elastoméricos de acero zunchedado de la casa MK4. A continuación se realizará una explicación del procedimiento de diseño establecido

Tal y como se ha dicho, dentro de los aparatos de apoyo debemos distinguir entre los aparatos de apoyo propios de las llamadas “pilas altas” y los aparatos de apoyo de los estribos y el aparato de apoyo de la “pila corta”.

Como ya dijimos, estructuralmente, la colocación de dos apoyos implica una transmisión del momento torsor que, recordemos, es de una magnitud importante debido a la asimetría que presenta el trazado de la pasarela. Asimismo, en la medida de lo posible se busca el evitar que aparezcan tracciones en los apoyos, y en caso de que aparezcan, que estas tengan lugar en los estribos. Es por ello que la distribución de los apoyos termina implica que se coloquen dos apoyos en pilas y estribos y, para controlar la transmisión, se coloque un único apoyo en la tercera pila o “pila corta”. De esta manera, se realiza un control de la torsión mediante la colocación de un mecanismo de flexión.

El procedimiento de diseño de los aparatos de apoyo se define pues como un procedimiento iterativo en el cual se siguen los siguientes pasos:



1.-Selección de un aparato de apoyo inicial. Dimensiones en planta, espesor y grosor efectivo de acuerdo al catálogo de la empresa MeKaNo 4 (MK4). Como primera aproximación, el dimensionado se realiza suponiendo un aparato de apoyo tipo A de acuerdo a la normativa (tipo B, antiguo tipo 1 en el catálogo de MK4)

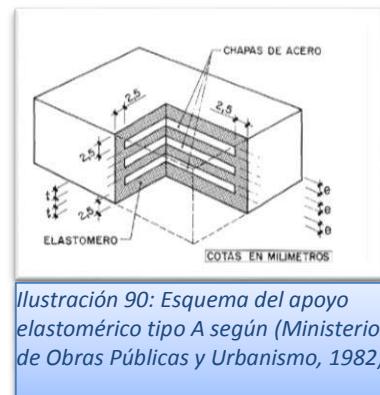
2.-Cálculo de las rigideces transversales y verticales del apoyo de acuerdo a los criterios establecidos en UNE-EN 1337-3.

3.-Introducción de las rigideces en los elementos del modelo. Recordemos como vimos anteriormente, que los neoprenos son modelados mediante tres elementos por neopreno, siendo cada uno de estos elementos un elemento tipo muelle unidimensional (COMBIN14, con las KEYOPT's pertinentes) que aporta rigidez entre dos nodos en las direcciones especificadas para el elemento (X, Y, Z).

4.- Comprobación de cumplimiento de la carga máxima admisible vertical de acuerdo a los valores especificados en el catálogo de la empresa MeKaNo 4 (MK4).

5.- Comprobación del desplazamiento de cizalladura de acuerdo a los desplazamientos transversales máximos admisibles especificados en el catálogo de la empresa MeKaNo 4 (MK4).

6.- Se repite el proceso hasta alcanzar el aparato de apoyo óptimo. Además se busca, en la medida de lo posible, homogeneizar la adquisición de los mismos, para que entre ellos sean lo más homogéneos posible. En caso de que se detecten posibles



tracciones se emplazaría a la selección de un apoyo tipo C2 (soporta ligeras tracciones, desmontable) según el catálogo de (MK4, 2015)

Esfuerzos de dimensionado

A continuación se adjunta una tabla con los esfuerzos y desplazamientos envolventes de diseño previstos para los apoyos

Posición Apoyo	Envolvente de Tracciones (kN)	Envolvente de Compresiones (kN)	Envolvente Desplazamientos Dirección Longitudinal (mm)	Envolvente Desplazamientos Dirección Transversal (mm)
Apoyo Interior Pila 1	43.34	0	-9.57	3.09
Apoyo Exterior Pila 1	0	-189.87	-8.87	3.15
Apoyo Interior Pila 2	0	-79.24	-4.13	3.06
Apoyo Exterior Pila 2	0	-834.73	-3.75	3.05
Apoyo Pila Corta	0	-22.11	-7.59	-1.57
Apoyo Estribo Superior Izquierdo	0	-102.95	-6.67	-1.74
Apoyo Estribo Superior Derecho	14.617	-17.21	1.55	-5.12
Apoyo Inferior Superior Izquierdo	0	-289.2	0.83	-4
Apoyo Inferior Superior Derecho	0	-809.17	14.2	-29.06

Tabla 9: Esfuerzos de dimensionado empleados para la selección de apoyos. Provienen del cálculo de envolventes mediante macro propia

Tipo	A		
Minima dimensión en planta (a)	250	mm	
Máxima dimensión en planta (b)	400	mm	
Area en planta del neopreno (A)	0.1000	m ²	
nº de capas interiores de elastómero (n)	7		
nº de capas de cálculo (n*)	7		
Espesor de capas de elast (t)	8.0	mm	
Espesor de chapas de acero (e)	3.0	mm	
Altura neta del neopreno (L_{neop})	0.061	m	
Relación de aspecto (b/a)	1.60		
Coeficiente K_1	1.64		
Coeficiente K_2	74.10		

Tabla 10: Propiedades de los neoprenos de apoyo

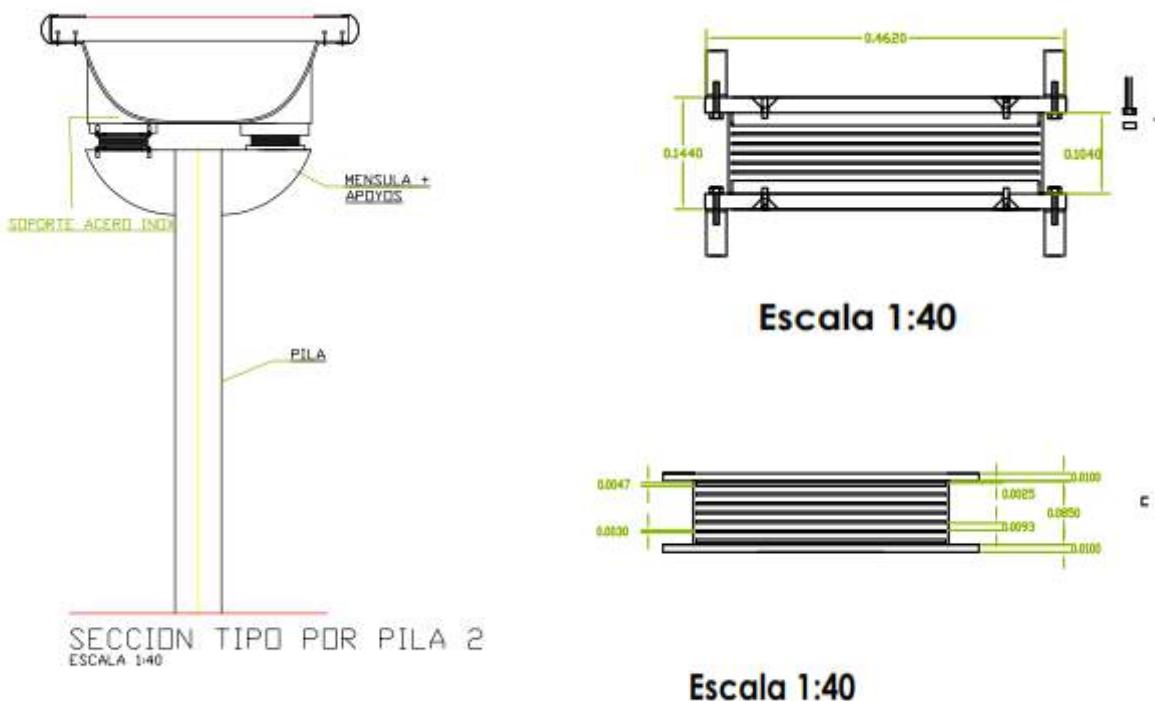


Ilustración 91: Detalles de los aparatos de apoyo empleados

Losa de hormigón

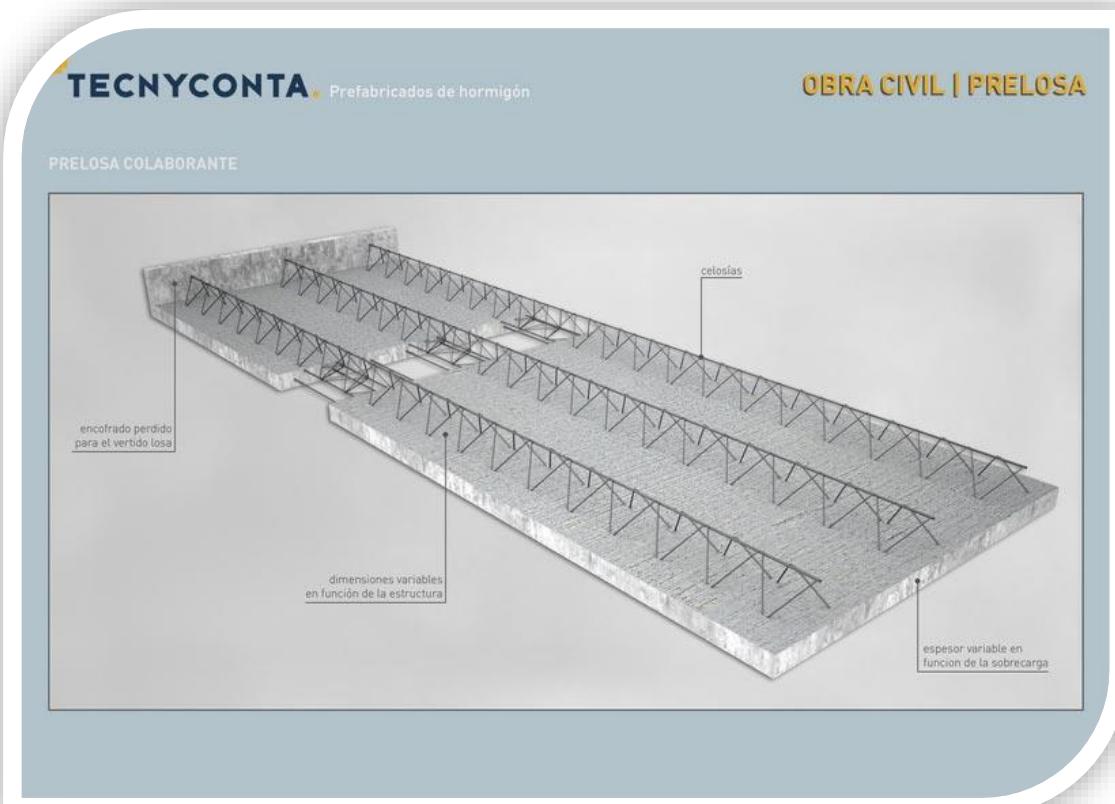
La losa de hormigón pertenece a 2.5 metros y un espesor constante de 0.2 metros. Esto hace que la losa sea, a todos los efectos considerada como elemento estructural para el puente mixto (híbrido en nuestro caso) de acuerdo a los criterios previstos en la normativa RPX-95.

Constructivamente, la losa de hormigón está compuesta por una prelosa que sirve de soporte y de encofrado perdido para la constitución de la losa completa que se alcanza con el posterior vertido y fraguado del hormigón.

El armado de la losa de hormigón se ha realizado mediante el conocido de Wood-Armer para armado de losas de hormigón mediante el cálculo de esfuerzos tipo placa con elementos finitos.

Prelosa

La prelosa elegida es una prelosa colaborante del prefabricador Tecnyconta. La prelosa actúa como encofrado perdido para el vertido total de la losa así como de elemento estructural por sí mismo, debido a que tras la colocación de la prelosa y el vertido del hormigón de la losa queda un elemento estructural de 20 cm (5cm de la prelosa y 15 cm de la losa).



La celosía presente en la prelosa colaborante se emplea para

- la unión eficaz entre hormigón vertido y prelosa prefabricada control del mínimo rasante entre hormigón vertido y hormigón prefabricado.
- El control de la flecha durante el hormigonado

Hormigón

El hormigón considerado en proyecto es un hormigón de tipificación HA-30-PL-20-IIIa.

- Hormigón Armado
- Resistencia característica de 30 MPa.
- Consistencia Plástica
- Tamaño máximo del árido 20mm
- Clase de exposición IIIa: exposición a cloruros de tipo marino sin contacto directo, el elemento no se encuentra en contacto directo con el agua marina en ningún momento, pero la cercanía de la misma hace prever posibilidad de ataques.

Acero Pasivo

El acero pasivo empleado es el acero B-500-S, que cumpla los criterios propios exigidos por la normativa EHE-08 en el apartado correspondiente.

Criterios de Armado

En el armado se han tenido en cuenta que para el armado longitudinal (parrillas longitudinales y transversales) se ha realizado un cálculo del momento equivalente de armado a flexión simple mediante el criterio de Wood-Armer, que combina los efectos de flector longitudinal, transversal y de torsión.

Para ello se ha realizado una macro en ANSYS que implementa el criterio de Wood-Armer y obtiene la envolvente de armados para todas las combinaciones de carga consideradas. El procedimiento llevado a cabo ha sido el siguiente:



Ilustración 93: Esquema del procedimiento seguido para el cálculo del armado de la losa

1.- Cálculo de esfuerzos mediante elementos finitos para cada combinación de cargas especificada (los elementos obtenidos son por unidad de longitud, de ahí que el ancho de la losa a introducir posteriormente en el prontuario informático de la EHE-08 sean losas cuyo ancho sea 1m)

2.- Cálculo de los momentos de armado correspondientes de acuerdo al criterio de Wood-Armer para el armado superior e inferior.

3.- Cómputo de las envolventes de los momentos de Wood-Armer para los armados superiores e inferiores, respectivamente.

5.- Armado a flexión simple de acuerdo a los momentos de flexión equivalente de Wood Armer para los armados inferiores y superiores, cumpliéndose los criterios normativos presentes en la normativa de referencia de hormigón armado EHE-08.

6.- En el caso de que el valor de momento equivalente sea cero, se colocará la cuantía mínima de armadura para una losa, tipificada en la EHE como un 1.8 por mil del área de la sección transversal de la losa, colocada por ambos lados.

Criterio de Wood Armer

Para el caso común válido en diseño en la que el armado planteado consista en refuerzos que se dispongan de forma ortogonal (dirección longitudinal y transversal) y que la dirección a la que se refieren los esfuerzos sea la misma en la que se dispone el armado, el criterio de Wood-Armer presenta la forma que sigue y que aparece recogida en diversas publicaciones (Wood, 1978) , (Bhatt, et al., 2006).

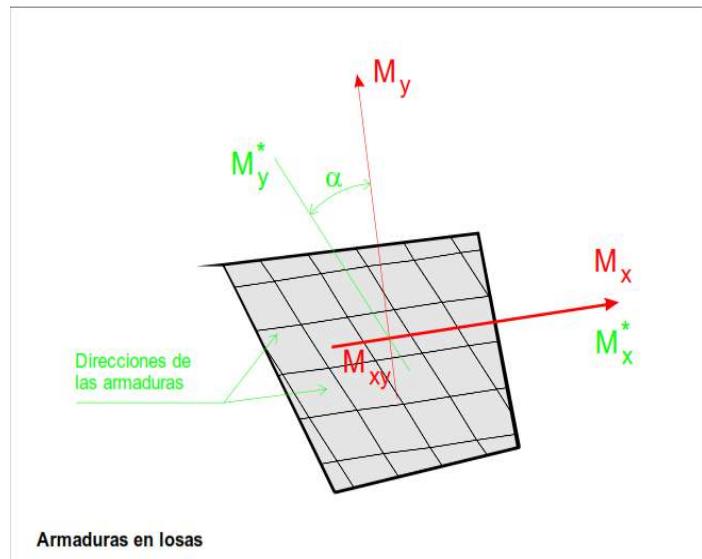


Ilustración 94: Dirección de las armaduras, de definición de los esfuerzos y ángulo de desfase entre ambos, alfa. (Salete Casino, 2007)

Para armado inferior y de acuerdo al criterio de signos empleado en el cálculo en el código de elementos finitos:

Armado Inferior

$$M_x^* = M_x - |M_{xy}|, \text{ para } M_x^* < 0$$

$$M_y^* = M_y - |M_{xy}|, \text{ para } M_y^* < 0$$

Si alguno de los momentos equivalentes fuera mayor que cero sus valores serían:

$$\text{Si } M_y^* > 0; M_x^* = M_x - \left| \frac{M_{xy}^2}{M_y} \right| \text{ y } M_y^* = 0$$

$$\text{Si } M_x^* > 0; M_y^* = M_y - \left| \frac{M_{xy}^2}{M_x} \right| \text{ y } M_x^* = 0$$

Si ambos momentos equivalentes son mayores que cero, el valor de ambos momentos equivalentes es cero.

Armado Superior

$$M_x^* = M_x + |M_{xy}|, \text{ para } M_x^* < 0$$

$$M_y^* = M_y + |M_{xy}|, \text{ para } M_y^* < 0$$

Si alguno de los momentos equivalentes fuera menor que cero sus valores serían:

$$\text{Si } M_y^* < 0; M_x^* = M_x + \left| \frac{M_{xy}^2}{M_y} \right| \text{ y } M_y^* = 0$$

$$\text{Si } M_x^* < 0; M_y^* = M_y + \left| \frac{M_{xy}^2}{M_x} \right| \text{ y } M_x^* = 0$$

Si ambos momentos equivalentes son mayores que cero, el valor de ambos momentos equivalentes es cero.

Envolventes esfuerzos de Wood-Armer

Recogemos los esfuerzos equivalentes de Wood-Armer con los que se ha entrado al prontuario informático del hormigón armado EHE-08 para el cálculo del número y distribución de los redondos.

Momentos Equivalentes de Armado según criterio de Wood-Armer				
Área	Momento X Equivalente de Armado Inferior (kN*m/m)	Momento X Equivalente de Armado Superior (kN*m/m)	Momento Y Equivalente de Armado Inferior (kN*m/m)	Momento Y Equivalente de Armado Superior (kN*m/m)
1	-24.95	0	-14.44	0
2	-28.22	0	-14.3	0
3	-31.87	25.79	-18.68	1.89
4	0	80.88	-20.18	1.46
5	0	136.28	-30.55	6.45
6	0	159.31	-37.2	22.02
7	0	288.36	0	72.8
8	0	328.21	-2.13	106.26
9	0	176.84	-41.75	31.43
10	0	87.48	-37.58	19.21
11	-65.9	0	-30.41	2.4
12	-69.42	0	-15.2	0
13	-84.88	0	-26.84	0
14	-86.91	0	-49.5	4.62
15	-65.88	83.26	-65.3	19.36
16	0	135.77	-44.51	18.24
17	0	214.01	0	54.28
18	0	227.06	0	76.59
19	-143.53	0	-87.68	12.44
20	-184.06	0	-84.45	0
21	-190.08	0	-60.81	0
22	-154.63	0	-21.79	0
23	-105.56	0	-6.08	19.95

Tabla 11: Momentos equivalentes de Armado según criterio de Wood-Armer. El cálculo del criterio de Wood-Armer fue realizado mediante programación propia, así como el cálculo de la envolvente de los momentos equivalentes que salen de este criterio.

Envolventes esfuerzos de cortantes y cortante de diseño

Se ha realizado una macro propia que obtiene la envolvente de cortantes para las combinaciones consideradas y para cada una de los 23 tramos de losas que definen todo el trazado a nivel de cálculo y después se ha realizado el cómputo de ambos cortantes (por composición vectorial de ambos)

Área	V_d
1	-56.81
2	14.39
3	-13.69
4	-55.02
5	75.86
6	49.89
7	-194.31
8	-190.11
9	-69.46
10	-40.88
11	-31.85
12	-34.06
13	-37.44
14	-42.38
15	44.84
16	75.6
17	163.77
18	174.81
19	73.06
20	-56.43
21	-61.71
22	-44.32
23	-127.04

Tabla 12: Cortante de diseño adoptado

Pilas

Introducción

En este apartado se explicitan los cálculos realizados para el dimensionado de los tres pilares previstos en proyecto. De esta manera se muestran los tanteos elaborados para el predimensionado (de acuerdo a las dimensiones de los aparatos de apoyo y de la esbeltez geométrica y/o mecánica), los cálculos realizados y las comprobaciones pertinentes de compresión compuesta, cortante e inestabilidad.

La normativa de referencia para las comprobaciones expuestas es la EHE-08 y las mismas han sido realizadas mediante el Prontuario Informático de la EHE-08 adjunto a la normativa de referencia. Los valores de los esfuerzos han sido obtenidos del modelo completo de la pasarela en ANSYS 16, en el cual fueron incluidas las pilas, para así modelar el efecto de la flexión de las mismas sobre la viga.

De esta manera el proceso se configura como iterativo que optimizar, partiendo de un valor predimensionado para cada pila, introduciéndolo en el modelo, obteniendo sus esfuerzos y realizando el cálculo del armado necesario y las comprobaciones pertinentes

Dimensiones pila

Armado pila

En cuanto al armado de las pilas realizaremos una proposición conservadora en la que, a la hora de seleccionar los momentos que solicitan a las pilas, emplearemos la combinación de menor axil y mayores flectores en valor absoluto, que es la que aporta unas mayores necesidades de armado y por tanto, se supone la más desfavorable. Es cierto que el hecho de tomar los mayores valores absolutos podría incurrir en el hecho de aplicar, como hemos dicho, un criterio en exceso conservador ya que obvia tanto la concomitancia de los valores de ambas flexiones como el hecho de que al tener en cuenta su sentido una pudiera ser favorable con respecto a la otra. No obstante, es un criterio que está del lado de la seguridad.

Armado base de pila

Armado Longitudinal

De acuerdo a las sección transversal propuesta y a la envolvente de acciones calculada mediante macro propia se ha la armadura longitudinal a colocar en las pilas considerando dos tramos, para realizar un corte de barras. De esta manera hemos calculado la armadura necesaria en la base del pilar y en su cabeza para las tres pilas.

El armado resultante aparece recogido en la siguiente tabla y se explicita en los esquemas a continuación.

Armado Transversal

Para el armado transversal se ha realizado un cálculo del área equivalente rectangular a tener cuenta como contributiva del hormigón para el cálculo de acuerdo a los preceptos impuestos en la EHE-08 (b_o)

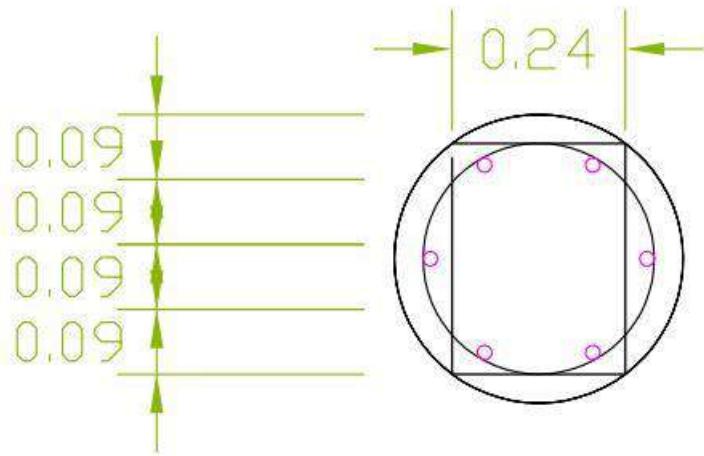


Ilustración 95: Esquema del cálculo del ancho eficaz a cortante para secciones no rectangulares aplicado a nuestro caso

Consideración de esbeltez. ELU Inestabilidad de soportes.

En el dimensionado de las pilas se han considerado el cálculo de inestabilidad mediante el prontuario informático del hormigón armado. De acuerdo a la sección (40cm de diámetro) y la altura (4m las pilas altas, 1.25 la pila baja, aproximadamente) de las pilas, se llega a la conclusión de que los efectos de segundo orden son despreciables dado que la esbeltez mecánica es menor que la esbeltez inferior

Resumen de armado pilas

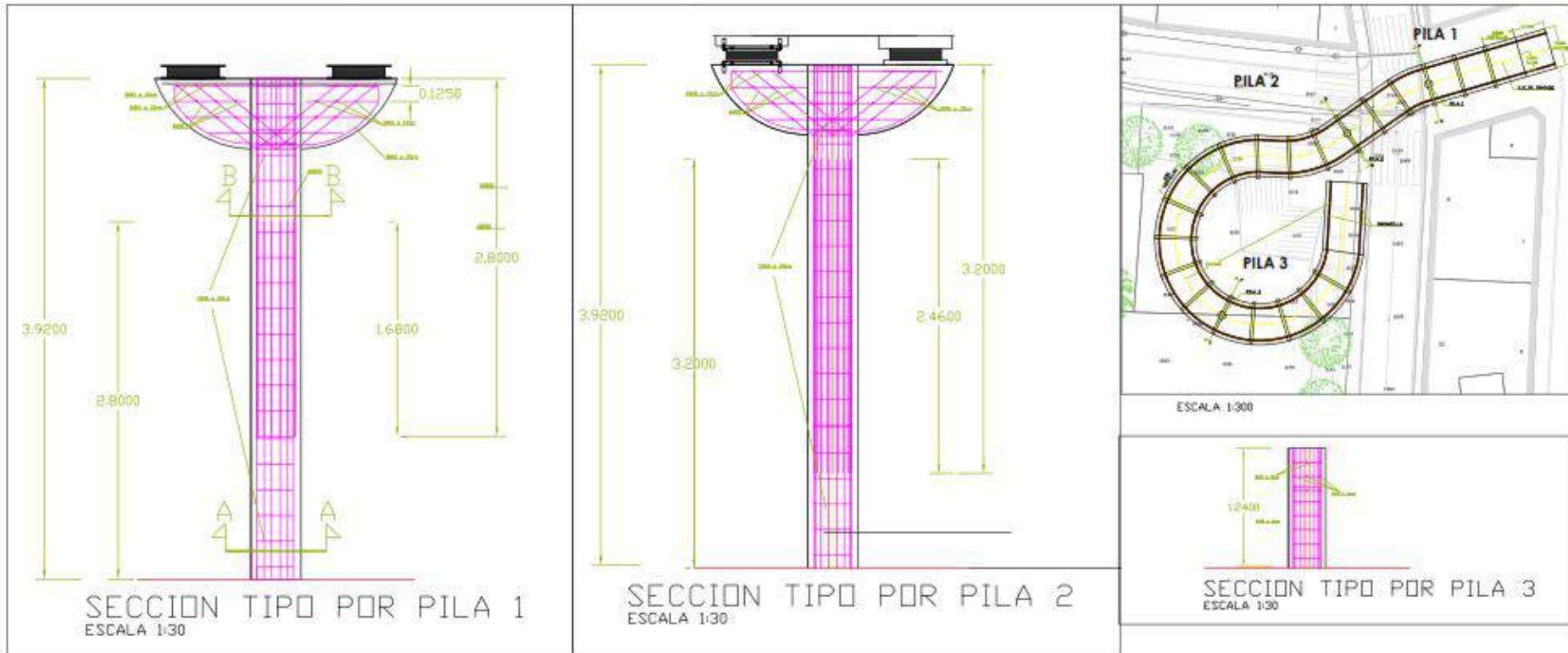
PILA Y POSICIÓN	Armado Longitudinal	Armado Transversal
Pila 1-Sección A-A'	14φ20	Cercos Circulares φ10a20cm
Pila 1-Sección B-B'	10φ20	Cercos Circulares φ10a20cm
Pila 2-Sección A-A'	14φ25	Cercos Circulares φ10a20cm
Pila 2-Sección B-B'	20φ25	Cercos Circulares φ10a20cm
Pila 3-Sección A-A'	18φ20	Cercos Circulares φ10a15cm
Pila 3-Sección B-B'	18φ20	Cercos Circulares φ10a15cm

Tabla 13: Propuesta armado Transversal Pila 1

Envolventes esfuerzos de cálculo y esquemas de armado

ENVOLVENTES DE ESFUERZOS DE PILA											
Nº PILA S	AXIL NODO I (kN)	AXIL NODO J (kN)	CORTANTE Y NODO I (kN)	CORTANTE Y NODO J (kN)	CORTANTE Z NODO I (kN)	CORTANTE Z NODO J (kN)	FLECTOR Y NODO I (kN)	FLECTOR Y NODO J (kN)	FLECTOR Z NODO I (kN)	FLECTOR Z NODO J (kN)	
1	-166	-117.18	-48.9	-48.8	25	24.67	177.52	30.96	-152	-150.6	
2	-714.65	-665.83	-31.65	-31.49	62.75	62.53	110.62	15.9	-303.61	-420.03	
3	-601.32	-567.73	-30.15	-30.15	-110.55	-110.4	77.55	15.32	-284.09	-56.07	

Tabla 14: Envolvente de esfuerzos de las pilas



Tuned Mass Damper (TMD)

Introducción

Para el diseño del amortiguador de masa (más conocido por sus siglas en inglés, TMD: Tuned Mass Damper) se ha empleado:

- Bibliografía especializada (Jiménez Alonso & Sáez Pérez, 2015), (Heinemeyer, et al., 2009) y (Jiménez Alonso, s.f.)
- Catálogo de TMD's de la casa Maurer Söhne (Maurer Söhne, 2011).

Diseño TMD según criterio de Den Hartog

El criterio de diseño de Den Hartog es un procedimiento simplificado ampliamente referenciado en la bibliografía existente y que puede ser resumido en una serie de pasos que pasamos a enumerar y explicar (Jiménez Alonso & Sáez Pérez, 2015):

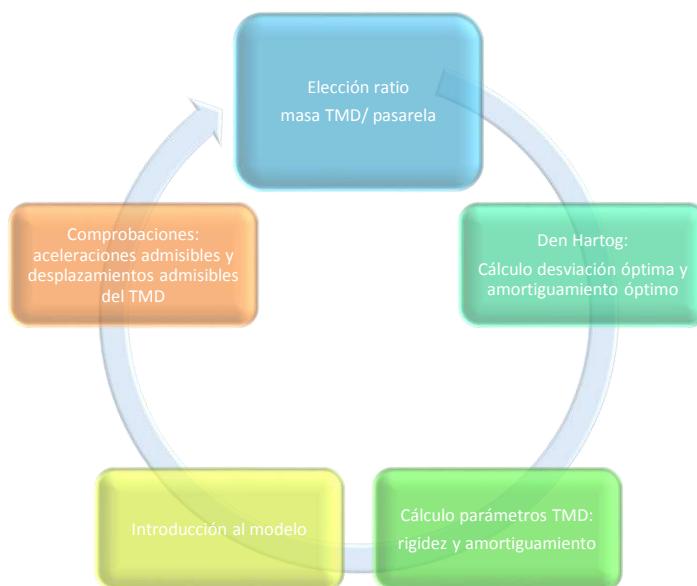


Ilustración 96: Esquema del procedimiento para el cálculo del TMD de acuerdo a la teoría del profesor Den Hartog (Jiménez Alonso & Sáez Pérez, 2015)

1. Se elige la masa del TMD, en función de la proporción entre la masa del TMD y la masa del modo de la pasarela que se busca amortiguar, que se tiende a designar con la letra griega μ (siendo sus valores característicos propios del intervalo [0.01 y 0.05])

$$\mu = \frac{m_d}{m_f}$$

2. Se calculan, de acuerdo a la formulación de Den Hartog, los parámetros característicos de:

- La desviación óptima de la frecuencia, δ_{opt} , que toma el valor:

$$\delta_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} = \frac{f_d}{f_m}$$

$$➤ \text{Amortiguamiento óptimo, } \zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}}$$

3. Calculamos las constantes del TMD: rigidez y amortiguamiento.

$$➤ \text{Rigidez: } k_d = m_d \cdot (2\pi \cdot \delta_{opt} \cdot f_f)^2$$

$$➤ \text{Coeficiente de amortiguación: } c_d = 2 \cdot m_d \cdot 2\pi \cdot \delta_{opt} \cdot f_f \cdot \zeta_{opt}$$

4. Introducción al modelo y comprobación de aceleraciones admisibles y de máximo desplazamiento admisible por el TMD.

5. Búsqueda de menor ratio de masa, para buscar el TMD más económico.

Este sería el procedimiento de cálculo de TMD de acuerdo a la formulación de Den Hartog. De esta forma, buscamos la menor proporción de masa μ que nos permita amortiguar el modo en discordia, consiguiendo que su aceleración se encuentre por debajo de la que establece la norma como admisible.

Asimismo, también se debe tener en cuenta que es necesario garantizar que los desplazamientos del TMD están acotados de acuerdo a un límite físico generalmente especificado por la casa comercial.

Procedimiento selección de TMD

El procedimiento de elección del TMD está íntimamente ligado con el análisis dinámico de nuestra pasarela dado que su introducción busca el control de las aceleraciones propias inducidas por las cargas de los peatones. De esta manera, de

acuerdo al estudio transitorio realizado y aplicando el procedimiento apuntado en el apartado anterior podemos determinar el amortiguador.

Del estudio modal previo obtenemos que las frecuencias que se encuentran en rango crítico del primer armónico son las dos primeras frecuencias naturales, las cuales marcamos en negrita.

Nº Frecuencia	Frecuencia (Hz)	Modo de vibración
1	1.2626	Vertical
2	1.585	Vertical
3	2.3383	Horizontal
4	2.6074	Vertical
5	4.0748	Torsional
6	5.6353	Torsional
7	6.1713	Vertical
8	6.975	Vertical
9	8.6807	Torsional
10	10.055	Vertical

Sin embargo, debido a la ligereza de nuestra pasarela y a la cercanía de la exclusión del rango crítico de la primera frecuencia natural, es de esperar que la colocación de TMD solo por el mero hecho de aportar masa haga que está deje de entrar en frecuencia, como podemos observar en la siguiente tabla, correspondiente al cálculo modal una vez incluido el mismo.

Nº Frecuencia	Frecuencia (Hz)	Modo de vibración
1	1.2048	Vertical
2	1.6731	Vertical
3	2.419	Horizontal
4	2.5838	Vertical
5	2.9992	Torsional
6	3.784	Torsional
7	5.5297	Vertical
8	6.0899	Vertical
9	7.9411	Torsional
10	9.7963	Vertical

De esta manera, de acuerdo a los cálculos modales realizados, es la segunda frecuencia natural la que se encuentra en un rango que podemos considerar crítico y es por ello ésta la razón con la que se trabaja en el cálculo del TMD con esta frecuencia para los análisis transitorios siguientes.

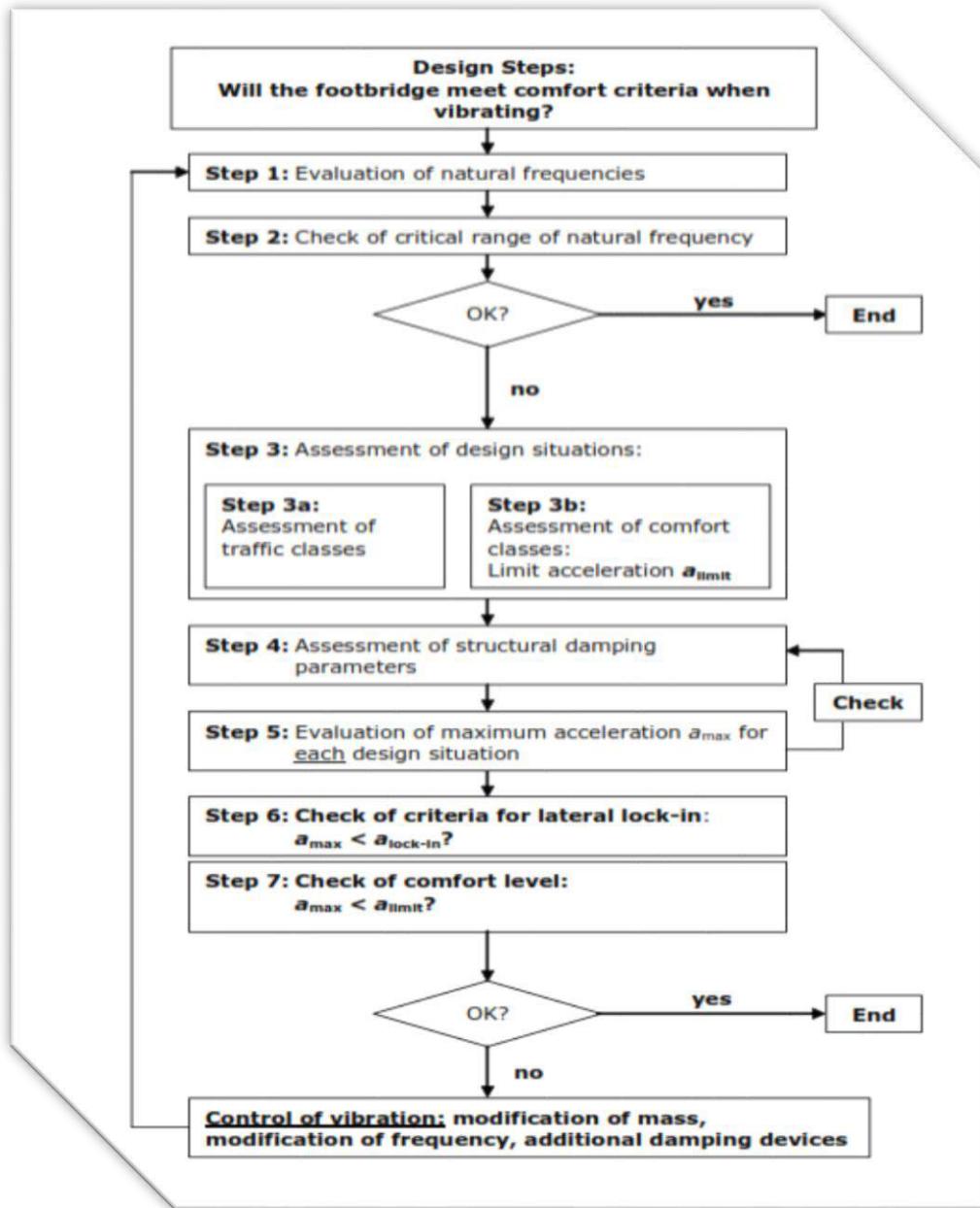


Ilustración 97: Diagrama de flujo con los que pasos especificados en (Heinemeyer, et al., 2009) para el diseño ante vibraciones para puentes y pasarelas ligeros

TMD elegido

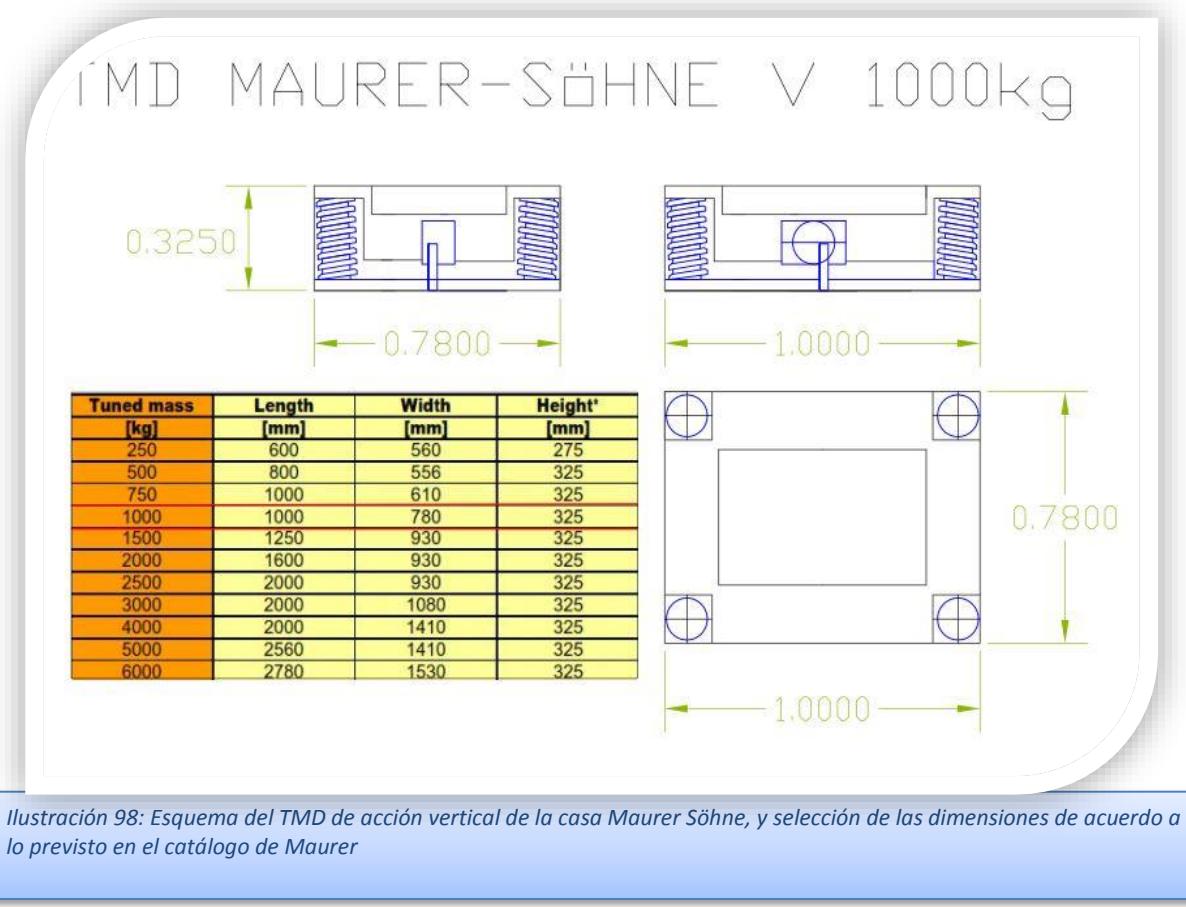


Ilustración 98: Esquema del TMD de acción vertical de la casa Maurer Söhne, y selección de las dimensiones de acuerdo a lo previsto en el catálogo de Maurer

El TMD elegido es un amortiguador de la casa Maurer Söhne, de 1000kg de masa. La elección viene determinada por los cálculos transitorios realizados. La elección de un aparato de estas características viene ligado a las altas necesidades de confort dispuestas por la Propiedad. Todo ello aparece dispuesto en el apartado de Comprobación de E.L.S. de Vibraciones.

Juntas

Realizaremos un cálculo estimativo de dimensionado de las juntas de acuerdo a los cálculos simplificados y conservadores expuestos en el catálogo de juntas de la empresa Composán (Composán, 2010). Las acciones que provocan movimientos de apertura o cierre de juntas considerados son:

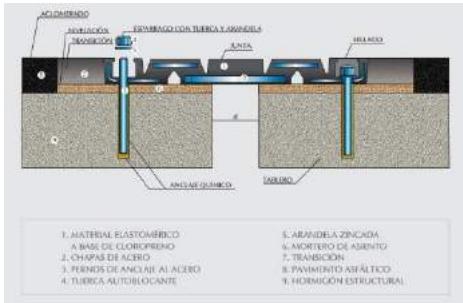


Ilustración 99: Esquema de Junta JNA, según catálogo de (Composán, 2010)

Retracción del hormigón

Fluencia del hormigón

Dilatación/contracción térmica

Las cargas de frenado y arranque no tienen cabida en este diseño previo dado que la pasarela es peatonal, luego no existen cargas de tráfico.

Retracción del hormigón

Se estima que la retracción del hormigón posee aproximativamente un valor de 0.25mm por metro, afectado por un parámetro corrector que pondera el tiempo transcurrido desde el hormigonado de la pieza hasta la instalación de la junta. Este valor de 0.25mm por metro se considera un resultado aproximativo y conservador, suponiendo valores medios de los parámetros correspondientes a:

Grado de humedad del ambiente

Espesor de la pieza

Composición del hormigón

Resistencia característica

Cantidad de armaduras y diámetros usados

De esta manera, el valor de la retracción del hormigón tomaría el valor:

$$\Delta l_R^- = 0.25 * L * K_{TR}, \quad \text{con } K_{TR} = \left(1 - \frac{T}{30}\right),$$

con T meses transcurridos entre hormigonado e instalación de la junta

Supuesto que este lapso de tiempo es, aproximadamente y de forma conservadora, de 2 meses, el valor de

$$K_{TR} = \left(1 - \frac{2}{30}\right) = 0.93$$

$$\Delta l_R^- = \frac{0.25mm}{m} * L (m) * 0.93 = 0.25 * 60.4 * 0.93 = 14.04mm$$

Fluencia del hormigón

Tomamos un valor aproximado de 0.20mm por metro, con las mismas asunciones realizadas para la retracción. De esta manera, el valor del cierre de junta por fluencia del hormigón es:

$$\Delta l_F^- = \frac{0.2mm}{m} * L * K_{TF} = \left(1 - \frac{T}{120}\right), \quad \text{con } T \text{ ídem. que anterior}$$

$$K_{TF} = \left(1 - \frac{T}{120}\right) = 0.983$$

$$\Delta l_F^- = 0.2 * L * K_{TF} = 0.2 * 60.4 * 0.983 = 11.87\text{mm}$$

Dilatación/contracción térmica

La aproximación propuesta en (Composán, 2010) para las deformaciones por la carga térmica resulta poco rica en comparación con la que podemos aportar nosotros de acuerdo al modelado realizado, el cual afectaremos por el coeficiente propio K_H , explicitado en la tabla que a continuación se incluye y aportada en (Composán, 2010).

Factor Corrector del Espesor: K_H					
Losas Macizas		Losas Aligeradas		Losas en Cajón	
Espesor	K_H	Espesor	K_H	Espesor	K_H
0,30 m	1,15	0,60 m	1,09	1,67 m	1,06
0,60 m	1,00	0,90 m	1,05	2,22 m	1,00
0,90 m	0,97	1,20 m	1,02	2,78 m	0,97
1,20 m	0,95	1,50 m	1,00	3,33 m	0,95

Tabla 15: Factor de corrección de la dilatación/contracción térmica en función del tipo de losa (Composán, 2010)

Tomaremos el valor propio para una losa de 0.3m, pese a que la nuestra es de 0.2m, con lo que el valor de K_H será:

$$K_H = 1.15$$

Con lo que el valor de la contracción o de la dilatación tomará el valor:

$$\Delta l_T^+ = \Delta l_{T\text{cálculo}}^+ * K_H$$

$$\Delta l_T^- = \Delta l_{T\text{cálculo}}^- * K_H$$

De acuerdo a los escenarios de cálculo y a los valores calculados explicitados en **Modelización de la carga térmica en ANSYS**, el valor máximo de la envolvente de desplazamientos es:

$\Delta l_{T\text{cálculo}}^+$	2.81E-04m = 0.281mm
$\Delta l_{T\text{cálculo}}^-$	-2.45E-04m = 0.245mm

De esta manera, aplicando la fórmula simplificada aportada anteriormente, los valores a aportar en diseño serán:

$$\Delta l_T^+ = \Delta l_{T\text{cálculo}}^+ * K_H = 0.323\text{mm}$$

$$\Delta l_T^- = \Delta l_{T\text{cálculo}}^- * K_H = 0.282\text{ mm}$$

Así, la carrera de la junta (que será el doble de la apertura/cierre máximo) será, en cierre y en apertura:

Cierre de la junta

$$\begin{aligned} \sum \Delta l^- &= \Delta l_R^- + \Delta l_F^- + \Delta l_T^- + \Delta l_N^- = 14.04\text{mm} + 11.87\text{mm} + 0.282\text{mm} \\ &= 26.192\text{mm} \end{aligned}$$

Apertura de la junta

$$\sum \Delta l^+ = +\Delta l_T^+ = 0.323\text{mm} =$$

Carrera Junta	26.515mm
---------------	----------

Junta elegida

Del catálogo de Composán se ha elegido, de acuerdo, a la carrera de junta calculada, la JNA-42, junta de neopreno anclada (JNA).

Modelo de Junta	Movimiento Admitido	Cotas (mm)														
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	P	
JNA-42	42 mm	35	240	237	35	35	190	166	333	54	12	28	2000	6	380	70
JNA-52	52 mm	40	275	264	48	48	220	152	305	50	12	28	1829	8	435	80
JNA-70	70 mm	45	356	343	69	52	280	152	305	57	19	38	1829	10	516	80
JNA-80	80 mm	52	433	428	100	74	342	152	305	60	22	54	1829	8	633	70

Nota: estas dimensiones son únicamente a modo orientativo, reservándose Composan la libertad de modificar alguna de ellas en función de las condiciones de la obra.

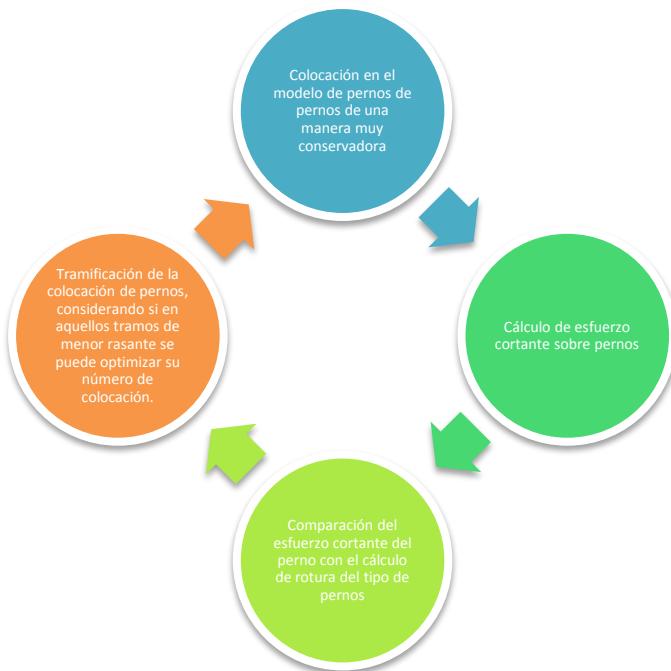
Ilustración 100: Catálogo de Juntas de Neopreno Armado

Pernos

Introducción

Para el cálculo de los pernos conectores hemos realizado los siguientes pasos:

- 1.- Colocación en el modelo de pernos de pernos de una manera muy conservadora (pernos a 10cm del 15)
- 2.-Cálculo de esfuerzo cortante sobre pernos
- 3.-Comparación del esfuerzo cortante del perno con el cálculo de rotura del tipo de pernos
4. Tramificación de la colocación de pernos, considerando si en aquellos tramos de menor rasante se puede optimizar su número de colocación.



Pernos escogidos

Los pernos escogidos son pernos del $\phi = 16mm$

$$P_u = 57,6 \text{ kN}$$

		Diámetro [mm]	Longitud, L [mm]	Diámetro de la cabeza D [mm]	Altura cabeza H [mm]
(5 / 8") 15,9	$+ 0,00$ $- 0,25$	75±1,6 100±1,6 125±1,6 150±1,6 175±1,6	31,7±0,4	7,1	
(3 / 4") 19,0	$+ 0,00$ $- 0,38$	75±1,6 100±1,6 125±1,6 150±1,6 175±1,6	31,7±0,4	9,5	
(7 / 8") 22,1	$+ 0,00$ $- 0,38$	75±1,6 100±1,6 125±1,6 150±1,6 175±1,6	34,9±0,4	9,5	

$D > 1,5 d$
 $H > 0,4 d$

siendo:

- D diámetro de la cabeza
- H altura de la cabeza
- d diámetro del vástago del perno

La altura total del perno, una vez soldado, está también normalizada. Se suministran pernos con alturas de 75, 100, 150 y 175 mm.

Ilustración 101: Criterios de dimensionado del perno según RPX-95

Se calcula los esfuerzos en los pernos y se comprueba que la distribución está del lado de la seguridad ya que existen pernos poco solicitados

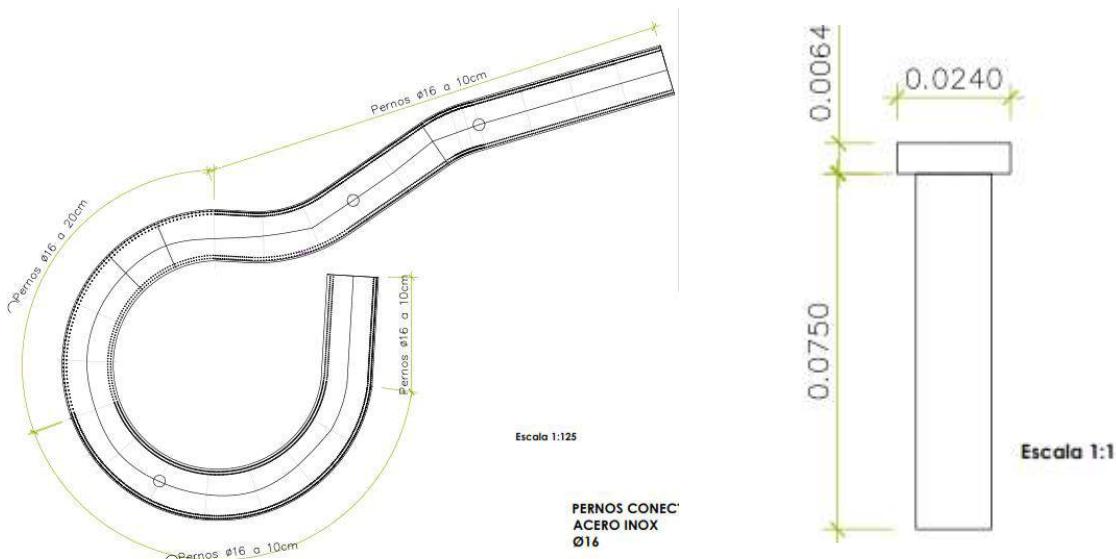


Ilustración 102:Distribución de Pernos y detalle de Pernos

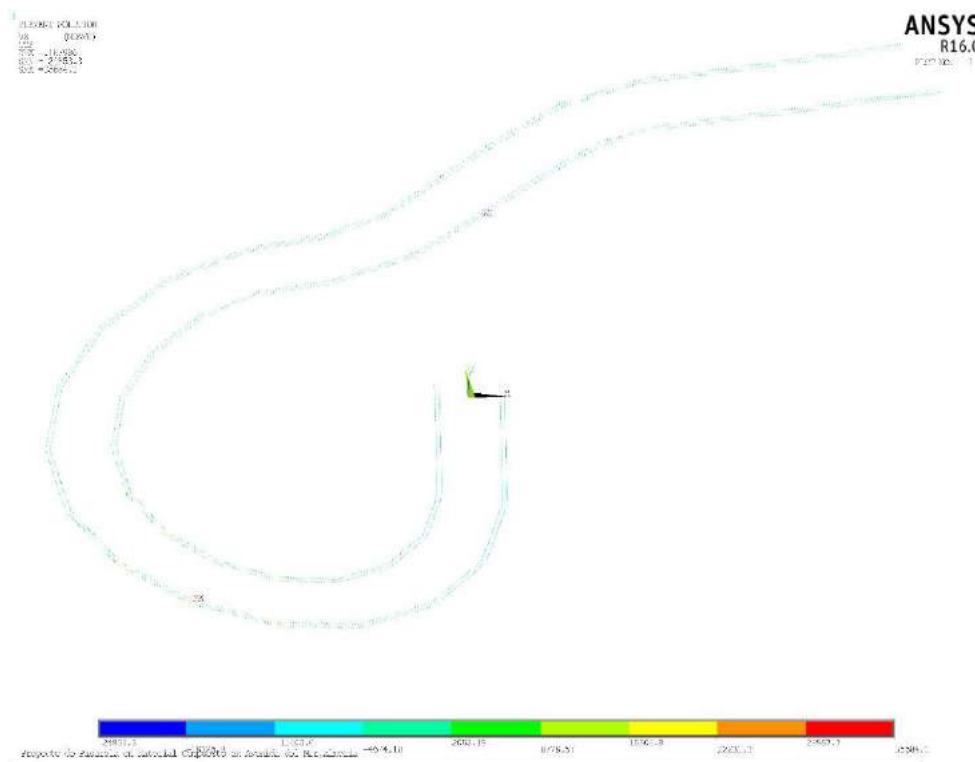


Ilustración 103: Cortante Vx (35.84kN) para la combinación más desfavorable. Unidades en Pa

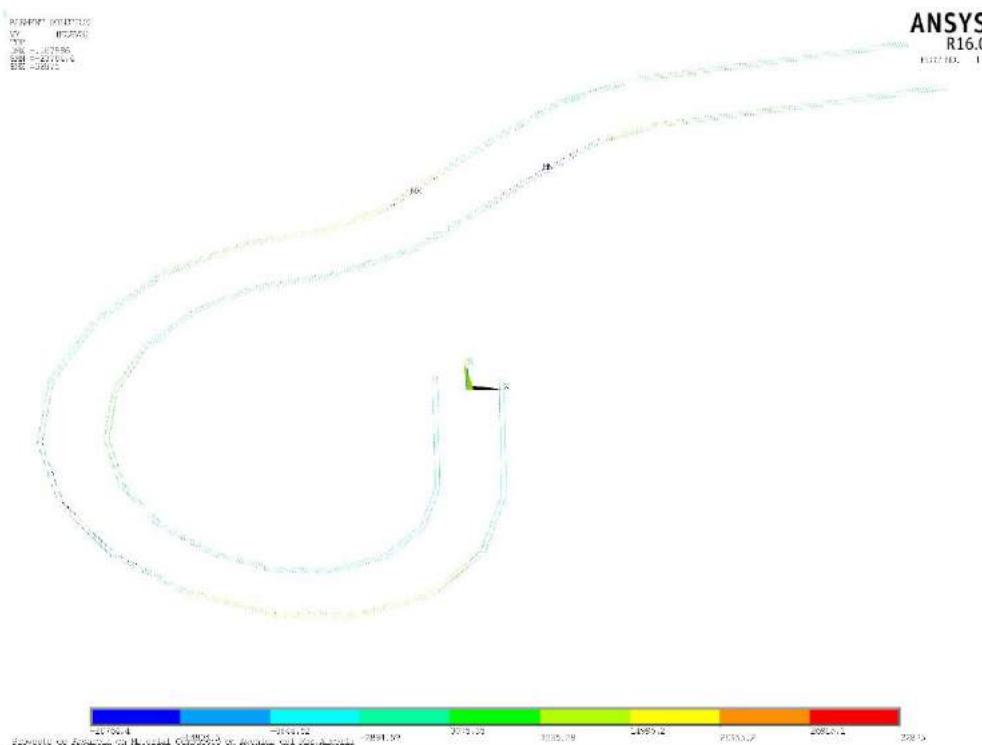


Ilustración 104: Cortante Vy (máximo valor 32.875kN) para la combinación más desfavorable. Unidades en Pa

Pavimento técnico

Introducción

En este apartado se explican los criterios tenidos en cuenta para la elección del pavimento técnico que aplicar a la superficie de nuestra pasarela, así como las características del mismo y la forma de su aplicación.

El sistema de tratamiento superficial ha sido el “Sistema concentrado 2002” de la casa Composán. De manera resumida, el pavimento consistirá en una capa de hormigón de soporte de 2cm de espesor sobre la que se ejecuta el suelo técnico, que está compuesto por dos capas de tratamiento superficial acrílico, liso y pigmentado, alcanzándose espesores de hasta 0.2mm por capa.

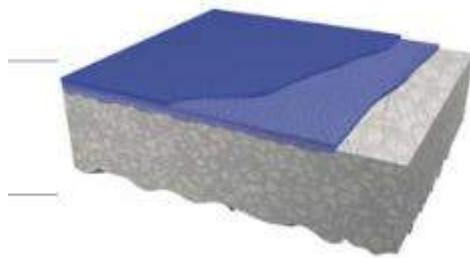


Ilustración 105: Detalle en 3-D del Sistema CompoConcentrado2002 de Composán (Composan, 2011)

Para la elección del pavimento se ha empleado la siguiente bibliografía:

- Manual de pavimentos continuos de la casa Composán (Composan, 2011)
- Guía para la utilización de pavimentos en espacios públicos (Ayuntamiento de Málaga, 2011)

Sistema Compo Concentrado 2002 de Composan

De acuerdo a (Composan, 2011), el sistema concentrado 2002 es un tratamiento superficial de carácter acrílico y de acabado liso y pigmentado, que se aplica sobre una capa soporte de hormigón o de aglomerado asfáltico, alcanzándose hasta 0.2 mm por capa, aplicándose normalmente 2 capas. Generalmente, el rendimiento alcanzado al aplicar el acabado es de $0.2\text{kg}/\text{m}^2$.

De la gama de colores ofertada por la empresa, el color elegido es el color tipo **albero**.



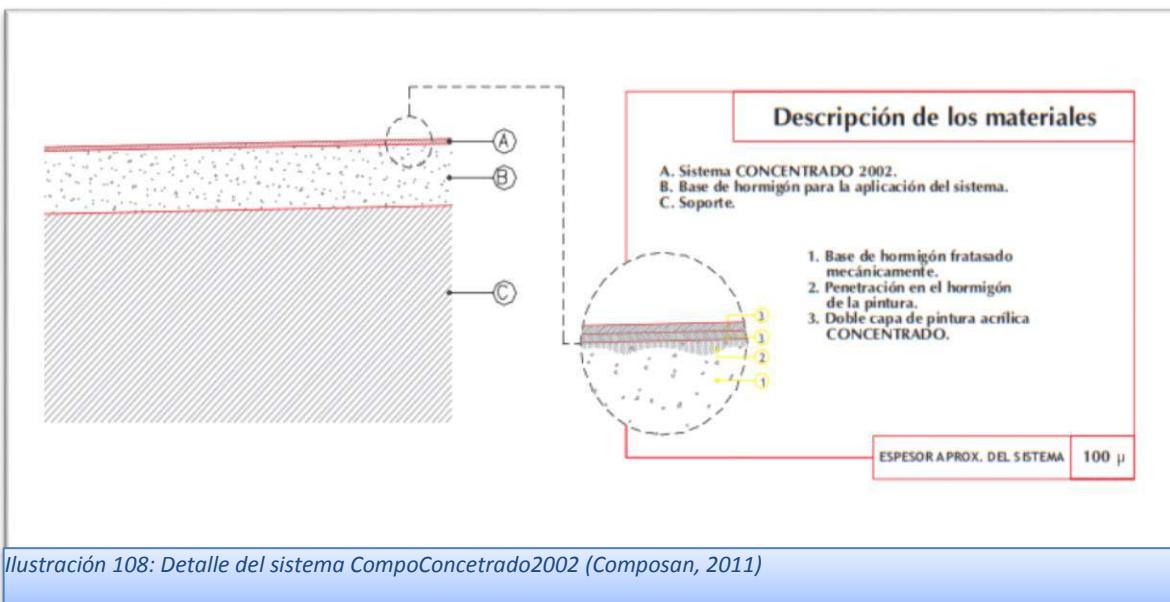


Ilustración 108: Detalle del sistema CompoConcentrado2002 (Composan, 2011)

■ Descripción del Sistema

El sistema Concentrado 2002 es un tratamiento superficial acrílico, liso, pigmentado, que se aplica sobre superficies de hormigón o de aglomerado asfáltico en espesores de hasta 0,2 mm.

■ Propiedades

propiedades físicas

• Densidad a 20°C	1,2-1,3 g/cm ³
• Viscosidad a 20°C (Brookfield, husillo 6, 100 rpm)	>40 poises
• Abrasión Taber en seco, 7 días curado (1000 ciclos, CS 17, 1000 g)	<0,4 g
• Abrasión Taber en húmedo, 7 días curado (1000 ciclos, CS 17, 500 g)	<2,0 g
• Adherencia a hormigón	>1,5 MPa

■ Puesta en obra

Preparación del soporte

La superficie a tratar deberá ser resistente, lisa, porosa, así como estar limpia, seca y exenta de polvo, grasa y materias extrañas.

La temperatura ambiente y del soporte durante la aplicación y curado deberá estar comprendida entre 8 y 30°C.

Los soportes de hormigón deberán ser sometidos a un tratamiento mecánico del soporte mediante diamantado que garantice la eliminación total de la lechada superficial, asegurando una perfecta abertura del poro sin comprometer la cohesión superficial del hormigón. Este tratamiento se complementará con un posterior barrido y aspirado industrial.

Tratamiento de juntas

Las grietas y fisuras existentes se corregirán aplicando el tratamiento adecuado en cada caso.

Composición del sistema

Tratamiento superficial liso de pavimentos de hormigón o aglomerado asfáltico, obtenido por la aplicación sucesiva de dos capas de pintura bicomponente a base de resinas acrílicas Concentrado 2002, con alto contenido en pigmentos, Taber<0,4 g y u>40 poises, rendimiento aproximado de 0,2 Kg/m² por capa, extendidas a mano mediante rastras de banda de goma o rodillo en capas uniformes con un espesor total aproximado de 0,2 mm.

Ilustración 107: Ficha del CompoConcentrado2002

Barrera Peatonal

Introducción

La barrera o barandilla, cuya función es la de proteger y guiar el tránsito de los usuarios de la pasarela, es un elemento cuyo diseño debe estar supeditado al cumplimiento de las normativas de accesibilidad. De esta manera, la función de la misma se ve extendida a toda la población.

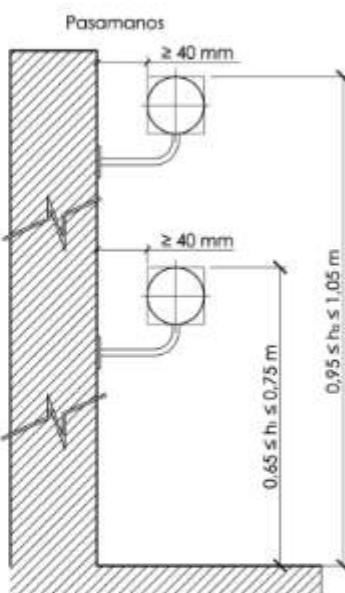
Como normativa de accesibilidad, se ha tomado la que se ha venido estudiando dentro del trazado de la pasarela (Consejería para la Igualdad y el Bienestar Social, 2012) y los criterios y recomendaciones de la (IPV Delft, 2015)

Criterios de Diseño

3. Los pasamanos reunirán las siguientes condiciones:

a) Se dispondrán de forma continua en todo el recorrido prolongándose en el principio y el fin de la misma **30 centímetros** sin interferir otros espacios de circulación y de uso.

b) Se instalarán pasamanos dobles cuya altura de colocación estará comprendida, en el pasamano superior, entre **0,95 y 1,05 metros** y en el inferior entre 0,65 y 0,75 metros medida en cualquier punto del plano inclinado.



c) La dimensión mayor del sólido capaz estará comprendida entre 45 y 50 milímetros.

d) Serán firmes y fáciles de asir, no permitiéndose materiales muy deslizantes o demasiado rugosos, así como aquellos que expuestos a fuentes de calor sufran calentamientos.

e) Estarán separados de los paramentos al menos 40 milímetros. Su sistema de sujeción no interferirá el paso continuo de la mano, y el remate superior no podrá tener aristas vivas.

f) Los pasamanos se diferenciarán cromáticamente de las superficies del entorno.

Diseño adoptado

La barrera de la pasarela está confeccionada de manera que presenta una sección transversal distinta en función de su situación.

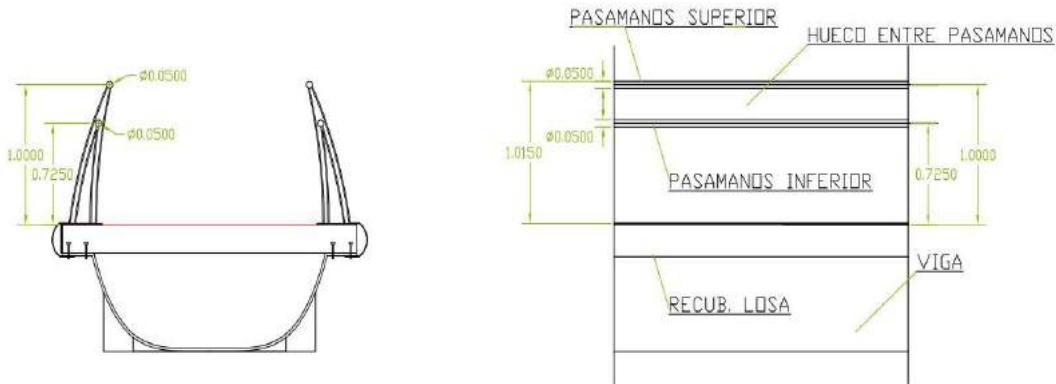


Ilustración 109: Vista de alzado y lateral de la sección, con detalle y acotación de la barrera (en el esquema, aparecen las dos secciones que adopta la barrera: aquella entre diafragmas y la propia del diafragma)

- La sección propia de aquellas en las que se sitúan los diafragmas, en los que la barrera presenta un recrecimiento al que se ancla el pasamanos inferior y sobre el que se coloca el pasamanos superior, alcanzando una altura de antepecho de 1.025m
- La sección entre diafragmas, que soporta el pasamanos inferior y sirve de barrera protectora, cerrando por completo el tramo inferior hasta una altura de 0.725m

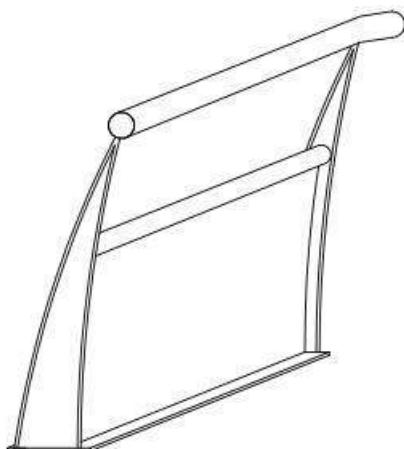


Ilustración 110: Detalle en 3-D del diseño propuesto para la barrera

De esta manera se consigue seguir la normativa de accesibilidad dado que:

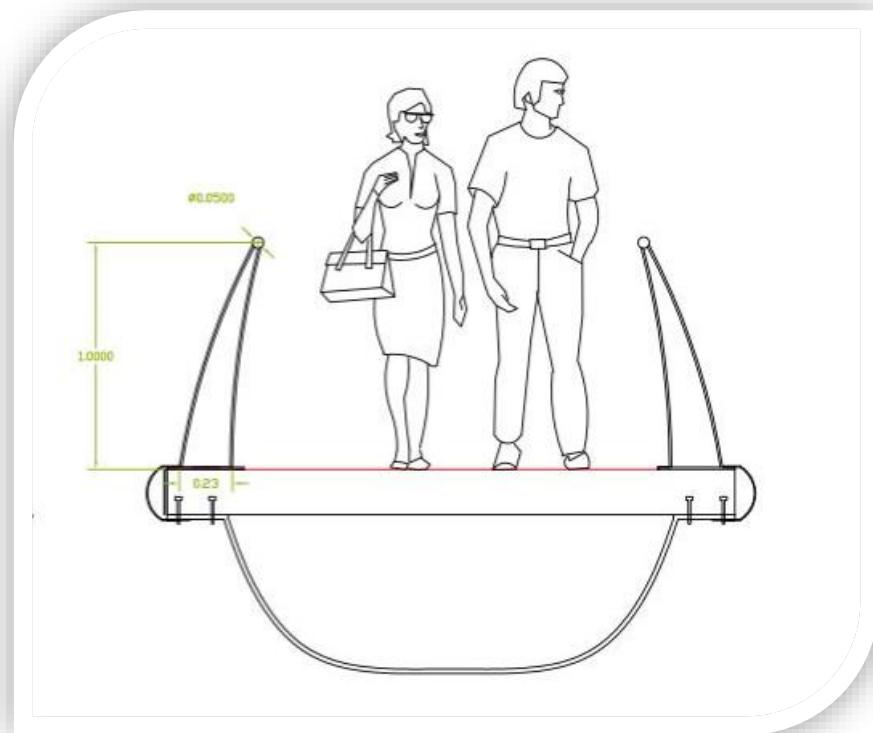


Ilustración 111: Sección por diafragma

- Se asegura que, para desniveles de menos de 6 metros (nuestro caso 4m) existe una altura de antepecho de 0.9m en toda la pasarela, ya que el pasamanos superior está protege una altura de 1.025m.
- Entre los 0.2 y los 0.7 m de altura se impide que queden huecos por los que, tal y como pide la norma, no puedan deslizar cuerpos esféricos de 10 cm de diámetro.
- Los pasamanos se configuran como secciones cilíndricas de 5 cm de diámetro y se colocan a 1m de la superficie el superior y a 0.725 m el inferior.

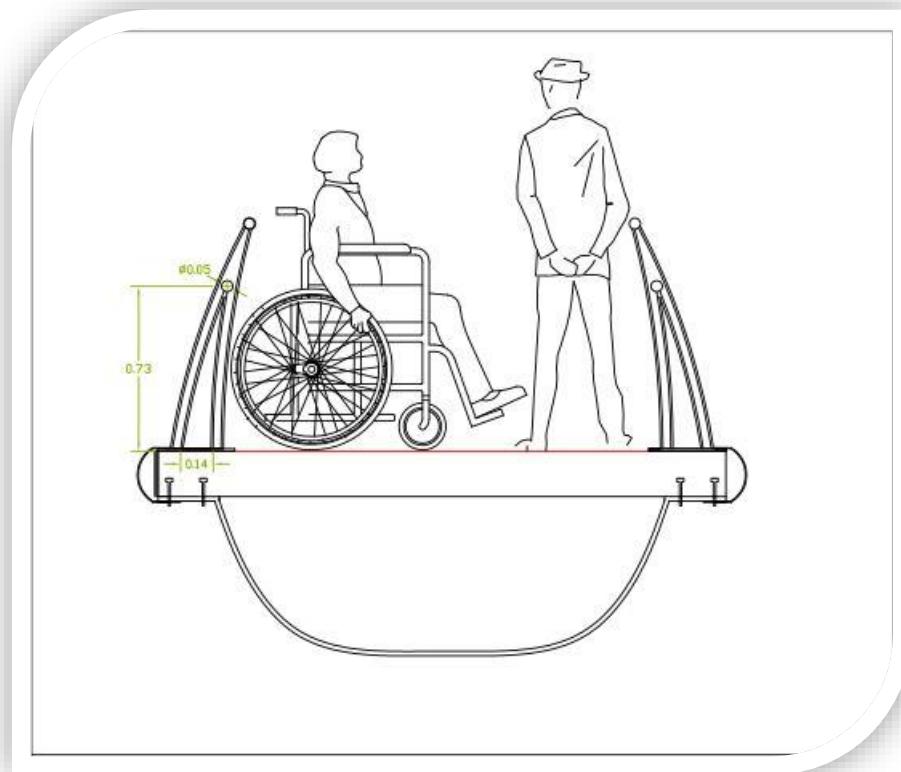


Ilustración 112: Sección entre diafragmas

Bases de Cálculo

Introducción

Marco Normativo de Aplicación

La falta de existencia de normativa de obligado cumplimiento que regule el empleo de materiales compuestos como material propio de elementos estructurales conlleva que la proposición de bases de cálculos imponibles para los cálculos necesarios para proyecto y ejecución debe ser explicitada íntegramente por el proyectista (Bank, 2006).

Es cierto que en algunos países europeos se han empezado a acuñar diferentes recomendaciones y normativas cuyo ámbito de aplicación es más o menos ambicioso, pero en ninguno de los casos generalista, dada la amplia variabilidad de compuestos, su constante desarrollo y la dependencia en gran medida de los datos provenientes de las distintas casas comerciales. Algunas de estas normas nacionales aplicables al diseño de compuestos son las siguientes:

- CUR96: Recomendación holandesa de Diseño de Compuestos FRP para Ingeniería Civil
- BD 90/05 UK : Normativa de Diseño de Puentes carreteros y Renovación de Tableros

La aparición de estas recomendaciones y normativas explicitadas con anterioridad solo se entiende como consecuencia de la aparición en el año 1996 de (Clarke, 1996), el EUROCOMP. Basado en una batería de ensayos importante, el EUROCOMP nació con el objetivo de servir como guía de diseño de elementos estructurales de FRP. Principalmente basado en los GFRP, el EUROCOMP se formula de una forma consistente con las bases de cálculo y cálculo de acciones y combinaciones propias del EuroCódigo 1 y con la filosofía de minoración de propiedades basadas en consideraciones estadísticas de los materiales. Sin embargo, en diferencia de los EuroCódigo, el Eurocomp no posee carácter normativo, es decir, no presenta rango de obligado cumplimiento.

Sin embargo, es cierto que de forma práctica se emplean los valores y consideraciones propuestos por este en el ámbito de proyecto, debido al carácter general y amplio que presenta y la sincronía existente con buena parte de las comprobaciones propias de estructuras formadas por materiales tradicionales.

El hecho de que no presente carácter normativo supone una mayor responsabilidad del proyectista desde el punto de vista que se basa en una serie de datos y consideraciones avaladas por la comunidad científica, una batería de ensayos

exhaustiva, determinadas casas comerciales y miembros de la comunidad de la ingeniería civil a nivel europeo pero que, dentro del punto de vista legislativo, carecen de potestad en el caso de fuera necesario dirimir cualquier problema derivado.

De esta manera, se hace necesario que en todo momento el proyectista declare explícitamente cuales son las bases de cálculo a las que se atiene, dado que, como hemos explicado, no existe una normativa de obligado cumplimiento que englobe todo el diseño.

De acuerdo a lo anterior, pasamos a explicitar nuestras bases de cálculo. Esta posición es ampliamente compartida en otros proyectos (Véase lo explicado acerca del Puente PUMACOM- Asturias de la Autovía del Cantábrico en (Primi & Paulotto, 2011) (Friberg & Olsson, 2014)).

- Instrucción para el diseño de Puentes de Carretera IAP-11. Coherente con el Eurocódigo 1: “Acciones en las estructuras”.

Cálculo de Acciones de Proyecto

De acuerdo a cómo se recoge en su ámbito de aplicación, la normativa que regula el cálculo de pasarelas peatonales actualmente en el marco del Estado Español es la IAP-11 “Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera”, para la que “También será de aplicación al proyecto de estructuras asimilables a los puentes (tales como falsos túneles, pontones o tajeas), a pasarelas para peatones, ciclistas o ciclomotores y a las obras de acompañamiento, como son las escaleras, rampas de acceso y muros.”

De acuerdo a esto, pasamos a describir las cargas que imputar a nuestra pasarela

Acciones Permanentes

Peso Propio Elementos Estructurales

El peso propio de los elementos estructurales aparece contabilizado directamente mediante la introducción de la aceleración de la inercia (de igual dirección y sentido contrario a la acción de la gravedad) y el cálculo interno de la masa que realiza el programa a través de la geometría y la introducción de la densidad.

Dado que las unidades empleadas en el modelo son kN y m, la introducción de la densidad en kg/m³ lleva a que la introducción de la gravedad debe ser congruente para que la acción del peso sea en kN. Para ello, el valor a introducir como aceleración de inercia debe ser de 0.01.

Al introducir la densidad en las unidades propias de kg/m³ y estar definida la geometría en metros conseguimos que para posteriores análisis modales no sean necesarias rectificaciones en las unidades de masa.

Carga muerta-Peso Propio Elementos No Estructurales

Los elementos no estructurales propios de la pasarela de proyecto a tener en cuenta son:

- Barreras
- Peso propio del pavimento

Barreras

A la fila de barreras seleccionada para proyecto se le presupone un valor peso propio equivalente a una carga uniformemente distribuida en torno a línea (definida en la línea de unión que comparten dos áreas) de 1.5kN/m.

Peso Propio del Pavimento

El peso propio del hormigón supone una carga uniformemente distribuida sobre un área cuyo valor es resultado del peso propio 6cm de hormigón magro cuya densidad se supone de 2400 kg/m³.

Acciones Variables

Sobrecarga de Uso

De acuerdo a la IAP-11, la sobrecarga de uso que se asocia a una pasarela peatonal es únicamente aquella que ejercen los peatones con su paso. De acuerdo a la misma norma, esta sobrecarga implica dos componentes, que explicitamos a continuación.

Es importante reseñar que la existencia de dos componentes de la sobrecarga de uso no quiere decir que sean dos acciones diferentes: es una única acción con dos componentes, de manera que a la hora de realizar las combinaciones de carga, esta debe solo una única acción de sobrecarga de uso.

Componente Vertical

La componente vertical aparece estipulado en norma con un valor fijo de 5 kN/m² en todos los casos.

Componente Horizontal

La componente horizontal, de acuerdo a la IAP-11 tiene un valor correspondiente al 10% de la sobrecarga vertical de uso aplicada; esto es, 0.5kN/m²

Sobrecarga de Viento

La carga de viento se supondrá como una carga estática equivalente cuyo valor aparece determinado por el valor de una serie valores y coeficientes que se explicitan a continuación.

Velocidad básica

Es aquella que se supone media durante un periodo de 10 minutos, siendo su periodo de retorno el propio a 50 años, medido con independencia de la dirección, estación del año y en una zona plana, equivalente a un entorno de puente tipo II a una altura de 10 m sobre el suelo.

Su valor tiene, de acuerdo a la norma, la siguiente forma:

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}$$

De acuerdo a la norma, tomaremos tanto los coeficientes de direccionalidad (c_{dir}) y de estacionalidad c_{season} iguales a 1, con lo cual suponemos que la velocidad básica fundamental $v_{b,0}$ del viento coincide con la velocidad básica de este v_b

Así de esta manera, obtenemos el valor de la velocidad básica del viento lo obtenemos mediante el mapa de isostacas de la IAP-11 (que coincide con el del Código Técnico de la Edificación



FIGURA 4.2-a MAPA DE ISOTACAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD BÁSICA FUNDAMENTAL DEL VIENTO $v_{b,0}$

(Coincide con el mapa correspondiente del Código Técnico de la Edificación)

Según el mismo, la velocidad básica del viento para la provincia de Almería es la propia de la zona A, 26m/s

$$v_b = 26 \text{ m/s}$$

Dado que para la importancia prevista de nuestra estructura, el periodo de retorno propio son 100 años, debemos aplicar un coeficiente corrector por probabilidad, que es el siguiente:

$$c_{prob} = \left[\frac{1 - K \ln[-\ln(1 - \frac{1}{T})]}{1 - K \ln[\ln(0.98)]} \right]^n$$

Siendo el valor de K igual 0.5 y el n igual a 0.2. La propia norma ya nos anticipa que para situaciones persistentes tomemos un periodo de retorno de 100 años, al que le corresponde un coeficiente de probabilidad de 1.04, por lo que

$$c_{prob} = \left[\frac{1 - K \ln[-\ln(1 - \frac{1}{T})]}{1 - K \ln[\ln(0.98)]} \right]^n = 1.04$$

Por lo que la velocidad básica del viento en función del periodo de retorno

$$v_b(T) = 27.04 \text{ m/s}$$

Velocidad media del viento

La velocidad media del viento a una altura z sobre el terreno tiene la siguiente forma:

$$v_m = c_r(z)c_o v_b(T)$$

De acuerdo a la norma, tomaremos el coeficiente c_0 de topografía igual a 1, al no existir un encajonamiento propio de un valle (estamos en urbano)

Para el cálculo del coeficiente de rugosidad emplearemos las tablas que propone la norma para calcular las alturas representativas necesarias; dicha tabla se expone a continuación:

TABLA 4.2-b COEFICIENTES k_r , z_0 , Y z_{min} SEGÚN EL TIPO DE ENTORNO

TIPO DE ENTORNO	k_r	z_0 [m]	z_{min} [m]
0	0,156	0,003	1
I	0,170	0,01	1
II	0,190	0,05	2
III	0,216	0,30	5
IV	0,235	1,00	10

La norma prevé cinco tipos de entornos distintos para el cálculo del coeficiente de rugosidad. Estos son, a saber: tipo 0 o marino, tipo 1 o propio de lagos o áreas planas con vegetación despreciable, tipo 2, correspondiente a zonas rurales de vegetación baja; tipo 3, correspondiente a zona suburbana, industrial o forestal con separaciones considerables entre sus edificios; y tipo 4, correspondiente a zonas urbanas. Dado que la definición de zonas urbanas exige que haya más de un 15% de edificaciones y que exista una altura media de edificios superior a 15 m de estos edificios, podemos afirmar que entorno es de tipo IV, podemos afirmar que :

TIPO ENTORNO: IV

$$k_r = 0.235$$

$$z_0 = 1m$$

$$z_{min} = 10m$$

Dado que toda la pasarela se encuentra a una cota inferior a 10m, podemos afirmar que la fórmula que propone la norma para el coeficiente de rugosidad es:

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) = k_r * \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) = 0.235 * \ln(10) = 0.541$$

(Téngase en cuenta que existe en este punto una errata en la norma, y que el valor depende de k_r)

Por lo que la velocidad media del viento toma el valor

$$v_m = c_r * c_o * v_0 = 0.541 * 1 * 27.04 \text{ m/s} = 14.63 \text{ m/s}$$

Empuje del Viento

El valor del empuje del viento toma, de acuerdo a la IAP, el valor siguiente:

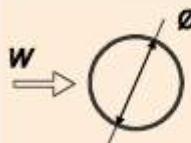
$$F_w = \left[\frac{1}{2} \rho v_b^2(T) \right] c_e(z) c_f A_{ref}$$

Tomaremos $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ tal y como expone la norma. Para el cálculo del coeficiente de exposición, c_e , tomaremos como valor:

$$c_e = k_r^2 \left[c_0^2 * \left[\ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) \right]^2 + 7 * k_l * c_o * \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) \right] = 1.18$$

Que sale de tomar para los coeficientes k_l y c_o el valor 1 propuesto por la norma

Para el coeficiente de fuerza, asimilaremos nuestra sección a una sección circular. Esto es debido a que la forma suave aportada desde proyecto *ex profeso* permite minimizar la acción del viento empleando la fórmula más conservadora de la sección rectangular. Para ello la norma atribuye la siguiente fórmula

	sección circular con superficie lisa y tal que: $\emptyset v_b(T) \sqrt{c_e(z)} > 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $c_f = 0,7$	sección circular con superficie rugosa, o lisa tal que: $\emptyset v_b(T) \sqrt{c_e(z)} < 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $c_f = 1,2$
---	---	---

Suponiendo un diámetro phi aproximado de un metro el valor de la fórmula es:

$$\emptyset * v_b(T) \sqrt{c_e(z)} = 1 * 27.04 * \sqrt{1.18} = 29.37 \text{ m/s}$$

$$c_f = 0.7$$

Por lo que la presión que ejerce el viento (Fuerza por unidad de área) será:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e c_f = \frac{1}{2} 1.25 \frac{kg}{m^3} * (27.04 \frac{m}{s})^2 * 1.18 * 0.7 = 377.462 \frac{N}{m^2}$$

Despreciamos el cálculo del coeficiente de ocultamiento por no existir un ocultamiento por parte de los elementos del tablero reseñable.

Nuestro tablero es, por definición, de alma llena. Con esta consideración procedemos a calcular los coeficientes y valores básicos previos para el reparto de componentes de la carga de viento propia sobre nuestra estructura

Empuje del Viento Transversal

Componente Horizontal

Modificaremos el valor del coeficiente de fuerza propio a emplear para el cálculo del empuje del viento transversal. Este coeficiente de fuerza $c_{f,x}$ tendrá el valor siguiente

$$c_{f,x} = 2.5 - 0.3 * \left(\frac{B}{h_{eq}} \right)$$

siendo B la anchura total del tablero, valor que tomaremos igual a 2.5m y la h_{eq} tendrá el valor de 0.94 (0.7m+4cm de conector+20 cm de losa).

De acuerdo a ello el valor a tomar será el siguiente

$$c_{f,x} = 2.5 - 0.3 * \left(\frac{B}{h_{eq}} \right) = 2.5 - 0.3 * \left(\frac{2.5}{0.94} \right) = 1.735$$

Por lo que el valor de la presión ejercida en el empuje del viento trasnversal será el siguiente:

$$P_{w,x} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e c_f = \frac{1}{2} 1.25 \frac{kg}{m^3} * (27.04 \frac{m}{s})^2 * 1.18 * 1.735 = 935.57 \frac{N}{m^2}$$

Componente Vertical

De acuerdo a la norma, el valor de la presión del viento transversal en componente vertical toma el siguiente valor:

$$P_{w,z} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e c_{f,z}$$

Siendo el valor del coeficiente de fuerza el de ± 0.9 por lo que el valor que toma la presión tomará el valor:

$$P_{w,z} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e c_{f,z} = \frac{1}{2} 1.25 \frac{kg}{m^3} * (27.04 \frac{m}{s})^2 * 1.18 * \pm 0.9 = \pm 485.31 \frac{N}{m^2}$$

Momento de Vuelco

Para modelar el momento de vuelco, aplicaremos esta presión sobre una línea que presenta una excentricidad con respecto al centro de gravedad, para propiciar así un momento de vuelco. Para ello, repartiremos la todo el empuje en una recta, creando una carga distribuida uniformemente por unidad de longitud. Para ello, basta con que multipliquemos por el canto los valores de presión calculados.

Estas líneas de aplicación se (como es nuestro caso) encuentran situadas de acuerdo a los siguientes preceptos:

-Para tableros de alma llena, el 60% de la altura del primer frente máximo para la aplicación del empuje horizontal del viento transversal

Este valor es de 0.768m. Para hacer más aerodinámica nuestra sección transversal, el punto de aplicación del viento aparece como punto intermedio de definición de la sección de transversal. La componente vertical del viento transversal aplicada a un cuarto de la anchura del tablero desde el borde barlovento.

Este valor es de 0.625m. Para implementar el momento de vuelco en nuestro modelo. Aplicamos una carga distribuida por unidad de longitud (carga distribuida por unidad de área por el ancho del tablero) aplicada en el extremo de la losa de barlovento de la losa de hormigón (dado que la norma prevé que esta se aplique a un cuarto del barlovento del tablero, minoraremos la carga por el factor proporcional del brazo con el que se aplica y del brazo que debería propone la norma para que el efecto del momento de vuelco sea idéntico. Por tanto el valor será el siguiente

$$P_{w,z} = \pm 485.31 \frac{N}{m^2}; M_{w,z} = \pm 485.31 * \frac{N}{m^2} * 2.5 m * long_{pasarela}(m) * 0.625m \\ = \pm \frac{485.31}{2} * \frac{N}{m^2} * 2.5 m * long_{pasarela}(m) * 1.25m = 758.30 * long_{pasarela} N * m$$

Empuje del Viento longitudinal

Se define el empuje del viento en dirección longitudinal al plano del tablero como un porcentaje del valor propio del empuje del viento en dirección transversal, que se encuentra asimismo penalizado por un coeficiente reductor cuyo valor se expone a continuación.

Dado que nuestro tablero es de alma llena, el empuje del viento longitudinal será un 25% del empuje del viento transversal, afectado por el valor del coeficiente reductor cuyo valor es el siguiente:

$$c_r = 1 - \left(\frac{7}{c_o \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) + 7} \right) \emptyset\left(\frac{L}{L(z)}\right)$$

$$\text{Con } \emptyset(L(z)) = 0.230 + 0.182 \ln\left(\frac{L}{L(z)}\right)$$

Con L la longitud total del puente (60m), y L (z) la longitud de turbulencia. Definiremos la longitud de turbulencia de acuerdo a la fórmula que propone la norma para z inferiores a z_{min}

$$L(z) = 300 \left(\frac{z_{min}}{200}\right)^{\alpha} = 300 * \left(\frac{10}{200}\right)^{0.67} = 40.31m$$

En el que hemos tomado el coeficiente α igual a 0.67 por ser el propio del tipo de terreno IV. Con este dato podemos calcular \emptyset

$$\emptyset = 0.230 + 0.182 * \ln\left(\frac{L}{L(z)}\right) = 0.302$$

Por lo que el coeficiente reductor tendrá el valor de

$$c_r = 1 - \left(\frac{7}{c_o \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) + 7} \right) \emptyset\left(\frac{L}{L(z)}\right) = 1 - \left(\frac{7}{1.94 * \ln\left(\frac{60}{10}\right) + 7} \right) * 0.302 * \left(\frac{60}{40.31}\right) \\ = 0.7$$

Por lo que el coeficiente toma el que se expone a continuación

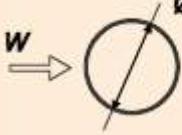
$$c_r = 0.7$$

Y por tanto el valor que toma el empuje ejercido por el viento longitudinal tendrá el valor

$$P_{w, long} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e c_f = \frac{1}{2} 1.25 \frac{kg}{m^3} * (27.04 \frac{m}{s})^2 * 1.18 * 1.914 * 0.25 * 0.7 = 180.62 \frac{N}{m^2}$$

Viento sobre las pilas

El cálculo del viento de las pilas será idéntico al que sufre el tablero, variando el valor del coeficiente de fuerza. Dado que las secciones estudiadas para las pilas son secciones circulares de 40 cm de diámetro, el coeficiente de fuerza será:

	sección circular con superficie lisa y tal que: $\emptyset v_b(T) \sqrt{c_e(z)} > 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $c_f = 0,7$	sección circular con superficie rugosa ("o lisa tal que": $\emptyset v_b(T) \sqrt{c_e(z)} < 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $c_f = 1,2$
--	---	---

$$\emptyset * v_b(T) \sqrt{c_e(z)} = 1 * 27.04 * \sqrt{1.18} = 11.748 \text{ m/s}, \text{ por lo que}$$

$$c_f = 0.7$$

$$P_{w,x} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e c_f = \frac{1}{2} 1.25 \frac{kg}{m^3} * (27.04 \frac{m}{s})^2 * 0.7 * 1.914 = 612.256 \frac{N}{m^2}$$

$$P_{w, long} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e c_f = \frac{1}{2} 1.25 \frac{kg}{m^3} * (27.04 \frac{m}{s})^2 * 1.18 * 0.7 * 0.25 * 0.7 = 66.06 \frac{N}{m^2}$$

Para introducirlas al modelo de elementos finitos

Para el capitel de las pilas altas , la carga es igual pero se prevé una un coeficiente de fuerza distinto, propio de una de una sección en rectangular con B/h aproximadamente igual a 6, por lo que el coeficiente de fuerza será igual a

$$c_f = 1$$

$$P_{w,x} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e c_f = \frac{1}{2} 1.25 \frac{kg}{m^3} * (27.04 \frac{m}{s})^2 * 1 * 1.914 = 874.65 \frac{N}{m^2}$$

$$P_{w,long} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e c_f = \frac{1}{2} 1.25 \frac{kg}{m^3} * (27.04 \frac{m}{s})^2 * 1.18 * 1 * 0.25 * 0.7 = 94.37 \frac{N}{m^2}$$

Sobrecarga de Nieve

La carga de nieve propia de Almería es, evidentemente, la mínima propuesta por la norma. Los valores que proponen Son los siguientes:

Capital	Altitud (m)	$s_k [\frac{kN}{m^2}]$	Densidad de la nieve $[\frac{kN}{m^3}]$
Almería	0	0.2	1.5

No usaremos el valor de la nieve dado que se despreciamos la situación que se puedan producir acumulaciones puntuales debido a lo reducido en anchura de la pasarela

El valor característico de la carga de acuerdo a la norma toma el valor:

$$q_k = 0.8 * s_k = 0.8 * 0.2 = 0.16 \frac{kN}{m^2}$$

Acción Térmica

Consideramos nuestra pasarela como un puente mixto; es decir, formado por hormigón en la losa y acero, para así poder modelar correctamente la interacción térmica propia de dos materiales diferentes (con diferente coeficiente de dilatación térmica).

Temperatura máxima y mínima del aire

Calculamos mediante el mapa de isotermas proporcionado por la IAP el valor de la temperatura a la sombra con un periodo de retorno característico de 100 años, que es el propio para la construcción objeto de estudio.

Para la zona de Almería, las Temperaturas Máximas y Mínimas para un periodo de retorno de 50 años son, de acuerdo a mapa:

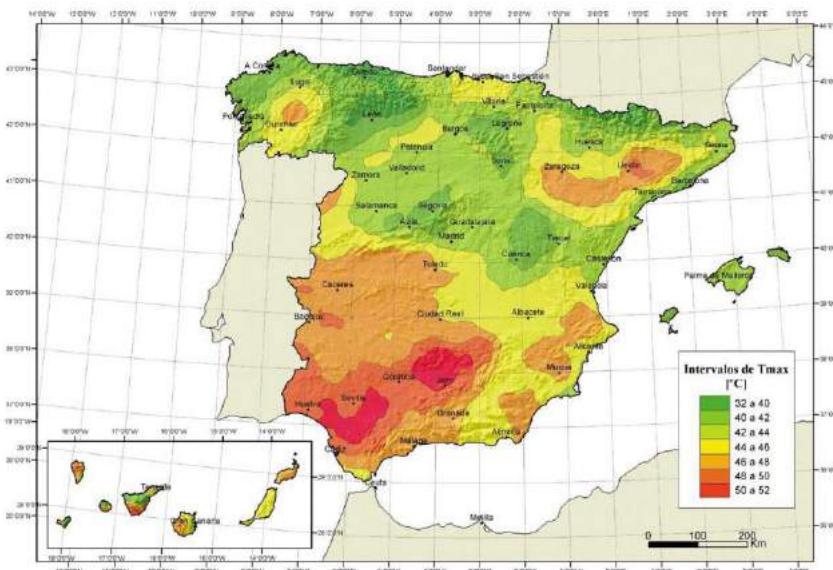


FIGURA 4.3-a ISOTERMAS DE LA TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL DEL AIRE, T_{\max} [°C]
(Coincide con el mapa correspondiente del Código Técnico de la Edificación)

Por lo cual la temperatura máxima se encuentra en torno a los 44-46 °C

En cuanto a la temperatura mínima, la norma prevé una serie de zonas climáticas invernales, repartidas de acuerdo al siguiente mapa:



FIGURA 4.3-b ZONAS CLIMÁTICAS DE INVIERNO
(Coincide con el mapa correspondiente del Código Técnico de la Edificación)

Almería queda por tanto encuadrada en la zona 6, siendo por tanto las características propias invernales, siendo, para 0 m sobre el nivel del mar la temperatura mínima del aire de -6°C.

Realizaremos una adaptación probabilística de los datos obtenidos para un periodo de retorno de 50 años para el periodo de cálculo de 100 años.

De acuerdo a ello, los valores para 100 años como periodo de retorno serán los siguientes:

Tmax,p (°C)	42,01
Tmin,p (°C)	-4,57

Componente uniforme de la temperatura

Calcularemos el valor de la componente uniforme de la temperatura teniendo en cuenta que esta tendrá un valor máximo y un valor mínimo, a saber:

$$T_{e,min} = T_{min} + \Delta T_{e,min} = -4.57 + 4 = -0.57^{\circ}\text{C}$$

$$T_{e,max} = T_{max} + \Delta T_{e,max} = 46.01^{\circ}\text{C}$$

Los valores máximos son los calculados anteriormente y los incrementos son aportados por la norma, siendo su valor para el caso de puentes mixtos igual a +4 para ambos incrementos en el caso de un puente (pasarela) mixta.

Definiremos los coeficientes de dilatación térmica que propone la norma para el hormigón y aportaremos a la viga el coeficiente de dilatación propio asociado a los compuestos de fibra de vidrio y de carbono.

Rango de la componente uniforme de la temperatura

El rango de variación de la componente uniforme de temperatura tiene el valor:

$$\Delta T_n = T_{e,max} - T_{e,min} = 46.58^{\circ}\text{C}$$

Estos rangos hay que compararlos con aquellos a los que está sometido el tablero una vez se ejecuta; es decir, cual es la diferencia de temperatura que ejerce carga térmica sobre el tablero una vez este está coaccionada. Por lo tanto hay que tener en cuenta la temperatura a la que se ejecuta e inmoviliza la losa. Tal y como propone la norma, tomaremos esta temperatura de ejecución como

$$T_o = 15^{\circ}\text{C}$$

Distinguiremos entre los máximos rangos de dilatación y de contracción. El máximo rango de contracción es el que sigue:

$$\Delta T_{N,con} = T_o - T_{e,min} = 15^\circ C - (-0.57^\circ C) = 15.57^\circ C$$

El máximo rango de dilatación es

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = 46.01^\circ C - 15^\circ C = 31.01^\circ C$$

Para el cálculo de los apoyos, este rango se mayora en 15°C más, siendo por tanto los valores:

$$\Delta T_{N,con} = T_o - T_{e,min} = 15^\circ C - (-0.57^\circ C) + 15^\circ C = 30.57^\circ C$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = 46.01^\circ C - 15^\circ C + 15^\circ C = 46.01^\circ C$$

Componente de la diferencia de temperatura

Diferencia Vertical

Para puentes mixtos, tipo 2 se considerará a priori una diferencia entre la losa (hormigón) y la viga. Aunque la normativa prevé, como es caso general, que la viga sea de acero, en nuestro caso la misma está formada por material compuesto. Es por ello necesaria una discusión en cuanto a lo que propone la norma y como adaptarla de manera coherente al cálculo a realizar.

Generalmente la norma prevé, de acuerdo a las características propias de los materiales hormigón armado y acero estructural que conforman losa y viga de puentes y pasarelas mixtos, es lógico que al existir dos materiales con propiedades distintas frente a los cambios de temperatura, la “inercia térmica” que presenten hormigón y acero sea distinta. Esta propiedad aparece determinada por la conductividad térmica. De acuerdo a (Instituto de Ciencias de Construcción Eduardo Torroja e Instituto de la Construcción de Castilla y León, s.f.) valores estándar de los coeficientes de conductividad térmica son

Material	Conductividad (genérico)	Térmica	W/m*K
Hormigón Armado	2.3		
Acero estructural	50		
Fibra de Vidrio	0.03-0.07		
Resina Epoxy	0.2		
Fibra de carbono	137		
Compuesto de fibra de carbono/resina epoxy (UD)	1		
Compuesto de fibra de vidrio/resina epoxy (UD)	0.4		

TYPICAL THERMAL PROPERTIES OF PREPREG LAMINATES

	Units	Glass		Aramid		High strength carbon	
		UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric
Coefficient of expansion	$10^{-6} K^{-1}$	11	14	- 0.4	- 5.2	0.3 - 0.7	2 - 3
Thermal conductivity	$Wm^{-1} K^{-1}$	0.4	0.16 - 0.33	0.4	0.21	1	0.86 - 1.44

Estos números nos vienen a ilustrar en cuanto al cambio en el orden de magnitud existente entre losa de hormigón y viga fibra de vidrio/resina epoxy y el típico de hormigón/acero. Por tanto, más que el número exacto que identifica la conductividad térmica, nos sirve como indicativo el orden de magnitud: el hormigón armado tiene entre 1 y 2 órdenes de magnitud más que los materiales que componen la viga.

Si bien es cierto que la fibra de carbono presenta una alta conductividad térmica, consideramos el comportamiento de la resina (sobre todo) y fibra de vidrio más representativo al servir la resina de envoltura de la fibra y al estar la fibra de vidrio más presente en el exterior que la de carbono. Por tanto podemos aproximar que se entiende un cambio entre los roles de mayor y menor inercia térmica, por lo que podemos afirmar que la carga de diferencia térmica y las situaciones de calentamiento y enfriamiento que prevé la norma pueden estar invertidas conforme a la problemática que proponían los puentes mixtos de acero y losa de hormigón

La norma prevé situaciones de calentamiento (aquellas en las que el material con mayor conductividad presenta una mayor temperatura que aquel con una menor, independientemente del soleamiento) y situaciones de enfriamiento (aquellas en las que el material con mayor conductividad térmica posee una temperatura inferior a aquel que posee una mayor inercia térmica).

Tomaremos, como aproximación, una diferencia de temperatura igual a la prevista para un puente mixto convencional en situaciones de calentamiento y de enfriamiento, pero siendo los elementos de la viga dotados de una mayor inercia térmica que la losa.

Si bien es cierto que la toma de estos parámetros puede resultar inexacta, es cierto que la diferencia entre órdenes de magnitud es de 1, por lo que a falta de datos más aproximados se pueden suponer las diferencias térmicas como asumibles.

Una vez expuestas las hipótesis adoptadas, supondremos que

- En situaciones de calentamiento, la losa de hormigón posee 18°C más que la viga de compuesto.
- En situaciones de enfriamiento, se considera que la losa de hormigón se encuentra a 10°C menos que la viga de compuesto.
- Se supondrá pues una variación de temperatura lineal, tal y como explicita la norma.

Diferencia horizontal

Supondremos para el cálculo que la diferencia de temperatura entre caras laterales de acuerdo a la normativa para puentes mixtos siempre y cuando la longitud del tramo del puente en estudio sea inferior a 2 veces la proyección del paramento lateral del tablero sobre el plano vertical. Por lo tanto, la diferencia de temperatura entre los dos lados del tablero será de 18°C debido al soleamiento.

Acción Simultánea de la diferencia de temperatura

A la hora de comprobar los efectos derivados tanto de la variación de temperatura media así como de la diferencia de temperatura por efectos de calentamiento diferencial, la norma propone que ambas ΔT 's se combinen de acuerdo a la siguiente regla

$$\Delta T_M + \omega_N \Delta T_N$$

$$\omega_M \Delta T_M + \Delta T_N$$

Teniendo $\omega_N = 0.35$ y $\omega_M = 0.75$. Dado que existen dos parejas las variaciones de temperatura pueden tomar distintos valores:

$$\Delta T_M = (\Delta T_{M,calentamiento} \text{ o } \Delta T_{M,enfriamiento})$$

$$\Delta T_N = (\Delta T_{N,exp} \text{ o } \Delta T_{M,contr})$$

Dando lugar hasta a ocho combinaciones

De acuerdo a lo calculado anteriormente:

$$\Delta T_{M,calentamiento} = +18 \text{ (en el hormigón °C)}$$

$$\Delta T_{M,enfriamiento} = -10°C \text{ (en el hormigón °C)}$$

$$\Delta T_{N,con} = T_o - T_{e,min} = 15°C - (-0.57°C) = 15.57°C$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = 46.01°C - 15°C = 31.01°C$$

Por lo que son las combinaciones que dan una mayor diferencia de temperaturas

Dilatación

$$\begin{aligned}\omega_M \Delta T_M + \Delta T_N &= 0.75 * [18(dif\ vert - mat,heat) + 18(dif\ hor)°C] + 31.01°C \\ &= 58.01°C\end{aligned}$$

$$\Delta T_M + \omega_N \Delta T_N = 18°C + 18°C + 0.35 * 31.01°C = 46.85°C$$

Contracción

$$\begin{aligned}\omega_M \Delta T_M + \Delta T_N &= -0.75 * [10(dif\ vert - mat,heat) + 18(dif\ hor)°C] - 15.57°C \\ &= -36.57°C\end{aligned}$$

$$\Delta T_M + \omega_N \Delta T_N = -|10°C + 18°C + 0.35 * 15.57°C| = -33.45°C$$

Modelización de la carga térmica en ANSYS

A la hora de modelizar la carga térmica en ANSYS debemos tener en cuenta unas ideas previas que nos permitan entender la manera de la que se procede.

Definiremos como temperatura de referencia aquella (TREF) que hemos considerado T_0 y aplicaremos a las distintas áreas una temperatura en función de su material (gradiente vertical) y de su posición (gradiente horizontal por diferencia de soleamiento). De esta manera, la variación de temperatura la aportamos nosotros especificando diferentes valores de temperatura en función del material. Es una forma simplificada de simular la variación lineal de temperatura, pero suficiente dado los reducidos valores de conductividad térmica de los materiales empleados.

De acuerdo a lo expuesto manera, hemos considerado, de acuerdo a la posición geográfica de la pasarela cuatro escenarios de cálculo, cruzando las opciones de máximas diferencias de temperatura estival/invernal con los casos diferentes de soleamiento (amanecer/atardecer).

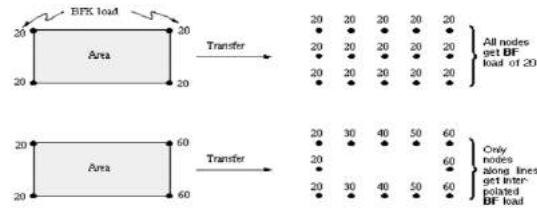


Ilustración 113: Ejemplificación de cómo reparte la carga térmica entre nodos en función del input usado. (ANSYS Inc., 2014)

Acción sísmica

Téngase en cuenta que la aplicación de la NCSR-Puentes 07 excluye a aquellos puentes distintos de acero u hormigón, por lo que puede no estar bajo el amparo normativo y debemos buscar, tal y como explica la norma un modelo conservador y que evite la aparición de rotura frágiles para aquellos casos en los que no es de ámbito de aplicación la misma.

Pseudoaceleración según la normativa

Datos del mapa de peligrosidad sísmica

A la hora de realizar el cálculo del espectro tendremos en cuenta los datos aportados por la normativa.



El mapa de peligrosidad suministra la aceleración sísmica básica de la superficie del terreno y el coeficiente de contribución K que tiene en cuenta los distintos tipos de

terremotos esperados en la peligrosidad sísmica de cada punto. Se presentan de una manera más concisa en la tabla del Anejo 1 de la normativa.

Dado que la pasarela se encuentra ubicada dentro del término municipal de Almería, los datos propios suministrados por la normativa son los siguientes. De la observación de ambos se puede intuir el interés que tiene el realizar un estudio sísmico de la pasarela.

a_b/g	K
Almería	0,14

Siendo el primer valor la relación entre la aceleración básica y la gravedad y el segundo el coeficiente de contribución.

Aceleración sísmica de cálculo

La aceleración de cálculo sigue la siguiente fórmula

$$a_c = S \rho a_b$$

Siendo:

— ρ : Coeficiente adimensional de riesgo, función de la probabilidad aceptable de que se exceda en el período de vida para el que se proyecta la construcción. Toma los siguientes valores:

	Construcciones de importancia normal	Construcciones de importancia especial
ρ	1,0	1,3

Nuestra pasarela será una construcción de importancia especial, de modo que adoptaremos 1,3 en el cálculo.

— **S:** Coeficiente de amplificación del terreno. Toma el valor, para $\rho a_b = 1,3 * 0.14g = 0.183g \leq 0.4g$ y $0.1g < 0.183g$, de la siguiente fórmula:

$$S = \frac{C}{1.25} + 3.33 \left(\rho \frac{a_b}{g} - 0.1 \right) * \left(1 - \frac{C}{1.25} \right)$$

Extracto de la normativa donde se clasifican los tipos de terreno

2.4. Clasificación del terreno. Coeficiente del terreno

En esta Norma, los terrenos se clasifican en los siguientes tipos:

- Terreno tipo I: Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $v_s > 750$ m/s.
- Terreno tipo II: Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, 750 m/s $\geq v_s > 400$ m/s.
- Terreno tipo III: Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, 400 m/s $\geq v_s > 200$ m/s.
- Terreno tipo IV: Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $v_s \leq 200$ m/s.

A cada uno de estos tipos de terreno se le asigna el valor del coeficiente C indicado en la tabla 2.1.

A falta de datos más fidedignos supondremos que los 30 metros de espesor por debajo del terreno son de terreno tipo IV. Esta suposición es, a su vez, el más desfavorable, con lo cual nos quedamos dentro del lado de la seguridad.

Tipos de terreno	Coeficiente C
I	1,0
II	1,3
III	1,6
IV	2,0

Recapitulando;

$$S = \frac{C}{1.25} + 3.33 \left(\rho \frac{a_b}{g} - 0.1 \right) * \left(1 - \frac{C}{1.25} \right) = 1.44$$

Aplicando para el caso de Almería:

$$a_c = S * \rho * a_b = 1.44 * 1,3 * 0,14 * 9.81 = 2.571 \frac{m}{s^2}$$

Espectro de respuesta elástica

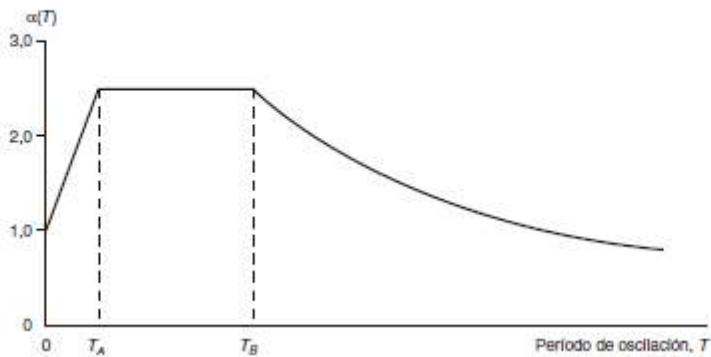
En primer lugar, calculamos los períodos característicos T_A y T_B .

Pasaje de la norma sobre los períodos característicos del espectro de respuesta

T_A, T_B Períodos característicos del espectro de respuesta, de valores:

$$T_A = K \cdot C/10$$

$$T_B = K \cdot C/2,5$$



Si $T < T_A$
 Si $T_A \leq T \leq T_B$
 Si $T > T_B$

$$\alpha(T) = 1 + 1,5 \cdot T/T_A$$

$$\alpha(T) = 2,5$$

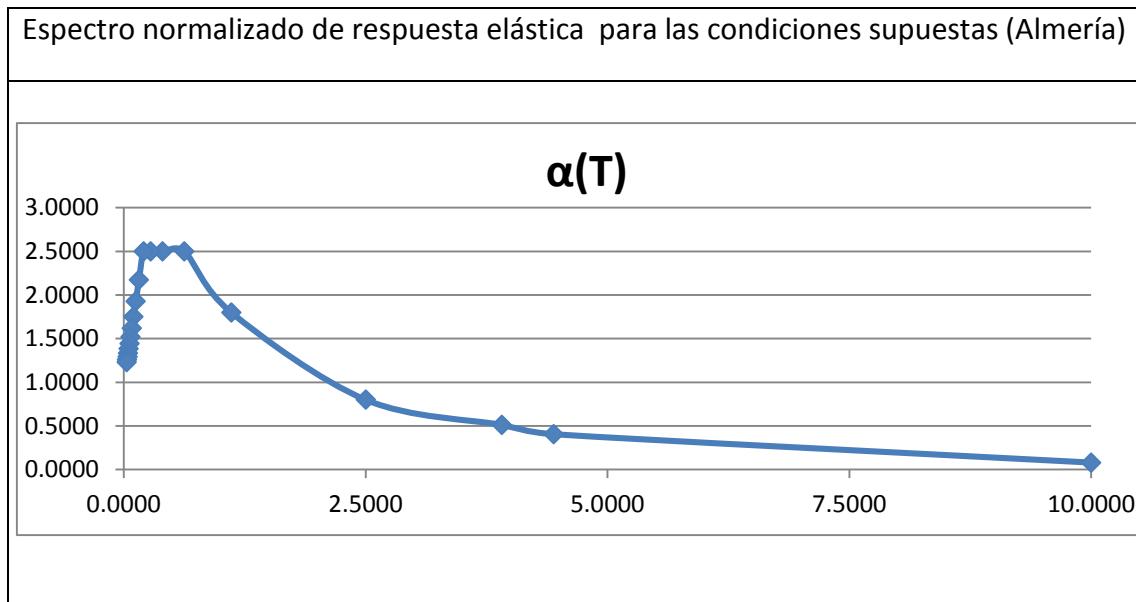
$$\alpha(T) = K \cdot C/T$$

De acuerdo a la fórmula dada por la norma:

	K	T_A	T_B
Almería	1	0.2	0.8

Como recopilación adjuntamos todos los datos empleados en los cálculos del espectro normalizado y este mismo.

Espectro NSCP-07



Este espectro debe ser escalado de acuerdo a la aceleración de cálculo adoptada, recordemos $2.571 \frac{m}{s^2}$

Combinación de modos

ANSYS implementa esta combinación de modos mediante el método de agrupación de modos SRSS (Raíz Cuadrada del cuadrado de las sumas).

Casos de carga y combinación de acciones

Factores de seguridad parciales

Las propiedades propios de los materiales para los cálculos se ven afectada por un coeficiente parcial de seguridad de manera que las propiedades de diseño, X_d son función de sus propiedades características, X_d minoradas por el factor propio de seguridad, γ_m , de la siguiente forma:

$$X_d = X_k / \gamma_m$$

La adopción del factor de seguridad γ_m viene determinada por tres coeficientes, a saber:

- γ_{m1} , relacionado con el nivel de incertidumbre de las propiedades en función de la variabilidad y procedencia de las mismas En función de la procedencia de los datos, de acuerdo a (Clarke, 1996) γ_{m1} toma los siguientes valores:

Las propiedades del material constitutivo provienen de ensayos de probetas del elemento en cuestión	
Las propiedades de un laminado individual provienen de la teoría/bibliografía	2.25
Las propiedades del laminado, panel o elemento producido mediante pultrusión provienen de la teoría /bibliografía	2.25
Las propiedades de una lámina provienen de ensayos de probetas del elemento en cuestión	1.5
Las propiedades del laminado, panel o elemento producido mediante pultrusión provienen de la teoría/bibliografía	1.5
Las propiedades del laminado, panel o del elemento producido mediante pultrusión provienen de ensayos de probetas del elemento en cuestión	1.15

Como podemos observar, EUROCOMP propone valores altos de minoración, yendo de menos a más en función de la representatividad de los datos. En general,

cuanto pasando por los estadios de material constitutivo, laminado tipo y pieza tipo, mientras más cercanos sean los datos a nuestra realidad menor es el coeficiente.

Para el caso que nos ocupa, se exigirán por pliego que las REALIZCEN LAS PROBETAS pertinentes para asegurar el comportamiento de las piezas que conforman nuestra pasarela y, por tanto, pudiendo ser adoptable un coeficiente de seguridad:

$$\gamma_1 = 1.5$$

- γ_{m2} , relacionado con el tipo de material y el método de producción empleado. En función del método, el coeficiente γ_{m2} , adopta los siguientes valores.

Método de Producción	Post-curado completo en producción	Sin Post-curado completo en producción
Aplicación de resina mediante spray, con aplicación a mano de la misma	2.2	3.2
Aplicación de resina mediante spray, con aplicación mecanizada de la misma	1.4	2.0
Hand lay-up (laminado manual)	1.4	2.0
Resin Transfer-Moulding	1.2	1.7
Prepreg lay-up (apilado de prepregs)	1.1	1.7
Filament Winding	1.1	1.7
Pultrusión	1.1	1.7

Dado que el método empleado es el de RTM y aunque las resinas empleadas son de bajas necesidades de temperatura y presión son aportadas mediante mantas térmicas y bolsas de vacío, sí las someteremos a un post-curado controlado. De esta manera, tomaremos el coeficiente más conservador

$$\gamma_2 = 1.2$$

- γ_{m3} , relacionado con las condiciones ambientales y de duración de la carga. En función de la temperatura de diseño a la que va a estar sometida la pieza, al carácter permanente o no de las cargas y a la temperatura de distorsión del

material (Heat Distortion Temperature, HDT), generalmente **no** asimilable en proyecto a la temperatura de transición vítreo de la resina empleada (T_g) , el coeficiente γ_{m3} , puede presentar los siguientes valores:

Temperatura de servicio prevista en diseño	HDT (ºC)	γ_{m3}	
25-50	55-80	Sometida a cargas transitorias	Sometido a cargas permanentes
	80-90	1.2	3.0
	>90	1.1	2.8
0-25	55-70	1.0	2.5
	70-80	1.1	2.7
	>90	1.0	2.6

Dado que la temperatura de transición vítreo de la resina aplicada en la producción de nuestra pasarela tiene una temperatura de distorsión es superior a 90º (la matriz empleada posee buenas características a altas temperaturas, la temperatura de distorsión **no** es la temperatura de transición vítreo, para este material de 80ºC) y que la temperatura de servicio de la pasarela se espera que esté en el rango de 25-50ºC, tomaremos el valor más conservador para elementos sometidos a cargas permanentes. Por tanto, el elemento coeficiente de seguridad a emplear será, para comprobaciones permanentes

$$\gamma_3 = 2.5$$

Y para comprobaciones transitorias

$$\gamma_3 = 1.2$$

De acuerdo a lo previsto, para el caso de comprobación estados límites de resistencia, el valor del coeficiente de seguridad será, para comprobaciones permanentes:

$$\gamma = \gamma_1 * \gamma_2 * \gamma_3 = 1.5 * 1.2 * 2.5 = 4.5$$

Y para comprobaciones transitorias

$$\gamma = \gamma_1 * \gamma_2 * \gamma_3 = 1.5 * 1.2 * 1.1 = 1.98 \rightarrow 2$$

Combinación de Acciones

Para la combinaciones de acciones tomaremos los conceptos y valores de los coeficientes preconizados por la IAP y que pasamos a mostrar de acuerdo a la misma

Factores de Simultaneidad

ACCIÓN		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga de uso	Vehículos pesados	0,75	0,75	0
	gr 1, Cargas verticales	Sobrecarga uniforme	0,4	0,4
		Carga en aceras	0,4	0,4
	gr 2, Fuerzas horizontales		0	0
	gr 3, Peatones		0	0
	gr 4, Aglomeraciones		0	0
Sobrecarga de uso en pasarelas		0,4	0,4	0
Viento	F_{wk}	En situación persistente	0,6	0,2
		En construcción	0,8	0
		En pasarelas	0,3	0,2
Acción térmica	T_k		0,6	0,6
Nieve	$Q_{Sn,k}$	En construcción	0,8	0
Acción del agua	W_k	Empuje hidrostático	1,0	1,0
		Empuje hidrodinámico	1,0	1,0
Sobrecargas de construcción	Q_c		1,0	0
				1,0

(1) El factor de simultaneidad ψ_2 correspondiente a la sobrecarga uniforme se tomará igual a 0, salvo en el caso de la combinación de acciones en situación sísmica (apartado 6.3.1.3), para la cual se tomará igual a 0,2.

Combinaciones para comprobación de ELU

TABLA 6.2-b COEFICIENTES PARCIALES PARA LAS ACCIONES γ_f
(PARA LAS COMPROBACIONES RESISTENTES)

ACCIÓN	EFECTO	
	FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0 1,35
	Carga muerta	1,0 1,35
Permanente de valor no constante (G^*)	Pretensado P_1	1,0 1,0 / 1,2 ⁽¹⁾ / 1,3 ⁽²⁾
	Pretensado P_2	1,0 1,35
Variable (Q)	Otras presolicitaciones	1,0 1,0
	Reológicas	1,0 1,35
	Empuje del terreno	1,0 1,5
	Asientos	0 1,2 / 1,35 ⁽³⁾
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0 1,35
	Sobrecarga de uso	0 1,35
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0 1,5
	Acciones climáticas	0 1,5
	Empuje hidrostático	0 1,5
	Empuje hidrodinámico	0 1,5
	Sobrecargas de construcción	0 1,35

Situación persistente o transitoria

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

De acuerdo a la formulación para situaciones persistentes o transitorias, y de acuerdo a las cargas consideradas para nuestra estructura, las siguientes combinaciones serían aquellas a tener en cuenta. Los coeficientes que aplicar a las comprobaciones resistentes son

Combinación 1: Sobrecarga de uso predominante, carga de viento transversal secundaria (LCASE20)

$$1.35 (G_{estructura} + G_{barrera}) + 1.35 \text{ Sob Uso} + 0.45 \text{ Sob Viento Transversal} \\ + 1.2 \text{ Nieve} + 0.9 \text{ Térmica}$$

Combinación 2: Sobrecarga de uso predominante, carga de viento longitudinal secundaria (LCASE21)

$$1.35 (G_{estructura} + G_{barrera}) + 1.35 \text{ Sob Uso} + 0.45 \text{ Sob Viento Horizontal} \\ + 1.2 \text{ Nieve} + 0.9 \text{ Térmica}$$

Combinación 3: Sobrecarga de Viento Transversal predominante (LCASE22)

$$1.35 (G_{estructura} + G_{barrera}) + 1.5 \text{ Viento transversal} + 0.54 \text{ Sob Uso} + \\ 1.2 \text{ Nieve} + 0.9 \text{ Térmica}$$

Combinación 4: Sobrecarga de Viento longitudinal predominante (LCASE23)

$$1.35 (G_{estructura} + G_{barrera}) + 1.5 \text{ Viento longitudinal predominante} + \\ 0.54 \text{ Sob Uso} + 1.2 \text{ Nieve} + 0.9 \text{ Térmica}$$

Combinación 5: Sobrecarga de Nieve predominante, viento transversal secundario (LCASE24)

$$1.35 (G_{estructura} + G_{barrera}) + 1.5 \text{ Nieve} + 0.54 \text{ Sob Uso} + \\ 0.45 \text{ Viento transversal} + 0.9 \text{ Térmica}$$

Combinación 6: Sobrecarga de Nieve predominante, viento longitudinal secundario (LCASE25)

$$1.35 (G_{estructura} + G_{barrera}) + 1.5 \text{ Nieve} + 0.54 \text{ Sob Uso} + \\ 0.45 \text{ Viento Longitudinal} + 0.9 \text{ Térmica}$$

Combinación 7: Carga térmica predominante, viento transversal secundario (LCASE26)

$$1.35 (G_{estructura} + G_{barrera}) + 1.5 \text{ Térmica} + 0.54 \text{ Sob Uso} + \\ 0.45 \text{ Viento transversal} + 1.2 Nieve$$

Combinación 8: Carga térmica predominante, viento longitudinal secundario (LCASE27)

$$1.35 (G_{estructura} + G_{barrera}) + 1.5 \text{ Térmica} + 0.54 \text{ Sob Uso} + \\ 0.45 \text{ Viento longitudinal} + 1.2 Nieve$$

Combinaciones para comprobación de ELS

TABLA 6.2-c COEFICIENTES PARCIALES PARA LAS ACCIONES γ_F (ELS)

	ACCIÓN	EFECTO	
		FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0	1,0
	Carga muerta	1,0	1,0
	Pretensado P_1	0,9 ⁽¹⁾	1,1 ⁽¹⁾
	Pretensado P_2	1,0	1,0
	Otras presolicitaciones	1,0	1,0
	Reológicas	1,0	1,0
Permanente de valor no constante (G')	Empuje del terreno	1,0	1,0
	Asientos	0	1,0
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,0
	Sobrecarga de uso	0	1,0
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,0
	Acciones climáticas	0	1,0
Variable (Q)	Empuje hidrostático	0	1,0
	Empuje hidrodinámico	0	1,0
	Sobrecargas de construcción	0	1,0

Situación característica

- Combinación característica (poco probable o rara):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Esta combinación, que coincide formalmente con la combinación fundamental de ELU, se utiliza en general para la verificación de ELS irreversibles.

Combinación 9: Sobrecarga de uso predominante, carga de viento transversal secundaria

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + Sob Uso + 0.3 Sob Viento Transversal + 0.8 Nieve + 0.6 Térmica$$

Combinación 10: Sobrecarga de uso predominante, carga de viento longitudinal secundaria

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + Sob Uso + 0.3 Sob Viento Horizontal + 0.8 Nieve + 0.6 Térmica$$

Combinación 11: Sobrecarga de Viento Transversal predominante

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + Viento transversal + 0.4 Sob Uso + 0.8 Nieve + 0.6 Térmica$$

Combinación 12: Sobrecarga de Viento Longitudinal predominante

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + Viento Horizontal + 0.4 Sob Uso + 0.8 Nieve + 0.6 Térmica$$

Combinación 13: Sobrecarga de Nieve predominante, viento transversal secundario

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + Nieve + 0.4 Sob Uso + 0.3 Viento transversal + 0.6 Térmica$$

Combinación 14: Sobrecarga predominante, viento longitudinal secundario

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + Nieve + 0.4 Sob Uso + 0.3 Viento Longitudinal + 0.6 Térmica$$

Combinación 15: Carga térmica predominante, viento transversal secundario

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + \text{Térmica} + 0.4 \text{ Sob Uso} + 0.3 \text{ Viento transversal} + 0.8 \text{ Nieve}$$

Combinación 16: Carga térmica predominante, viento longitudinal secundario

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + \text{Térmica} + 0.4 \text{ Sob Uso} + 0.3 \text{ Viento longitudinal} + 0.8 \text{ Nieve}$$

Situación *frecuente*

- Combinación frecuente:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Esta combinación se utiliza en general para la verificación de ELS reversibles.

Combinación 17: Sobrecarga de uso predominante

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + 0.4 \text{ Sob Uso} + 0.5 \text{ Térmica}$$

Combinación 18: Sobrecarga de Viento Transversal predominante

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + 0.2 \text{ Viento transversal} + 0.5 \text{ Térmica}$$

Combinación 19: Sobrecarga de Viento Longitudinal predominante

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + 0.2 \text{ Viento Longitudinal} + 0.5 \text{ Térmica}$$

Combinación 20: Sobrecarga de Nieve predominante

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + \text{Nieve} + 0.5 \text{ Térmica}$$

Combinación 21: Carga térmica predominante

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + 0.6 \text{ Térmica}$$

Situación casi-permanente

Combinación 22: Sobrecarga de uso predominante

$$(G_{estructura} + G_{barrera}) + 0.5 \text{ Térmica}$$

Comprobaciones realizadas

A continuación se explicitan las comprobaciones realizadas a la pasarela, que son las comprobaciones que se consideran necesarias para garantizar la estabilidad estructural y los niveles de servicio óptimos previstos para una pasarela de proyecto típica.

Comprobaciones resistentes: E.L.U. de Resistencia

Las comprobaciones de resistencia se han realizado mediante la aplicación de criterios de rotura típicos en compuestos que aparecen implementados en la versión 16.0 de ANSYS (entorno APDL) y cuya validez fue discutida en el Bloque A, epígrafe [Criterios de Fallo en Compuestos](#)

Por tanto, se han comprobado las láminas más desfavorables de cada laminado, para las combinaciones propuestas.

Los criterios de fallo elegidos para la comprobación del compuesto son el criterio de Puck para la fibra, el criterio de Puck (matriz y fibra) y el criterio de Tsai-Wu.

A continuación expondremos los esfuerzos y criterios de fallo para las ocho combinaciones de carga de E.L.U. consideradas más desfavorables.

Combinación 1 (LCASE 20)- COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE

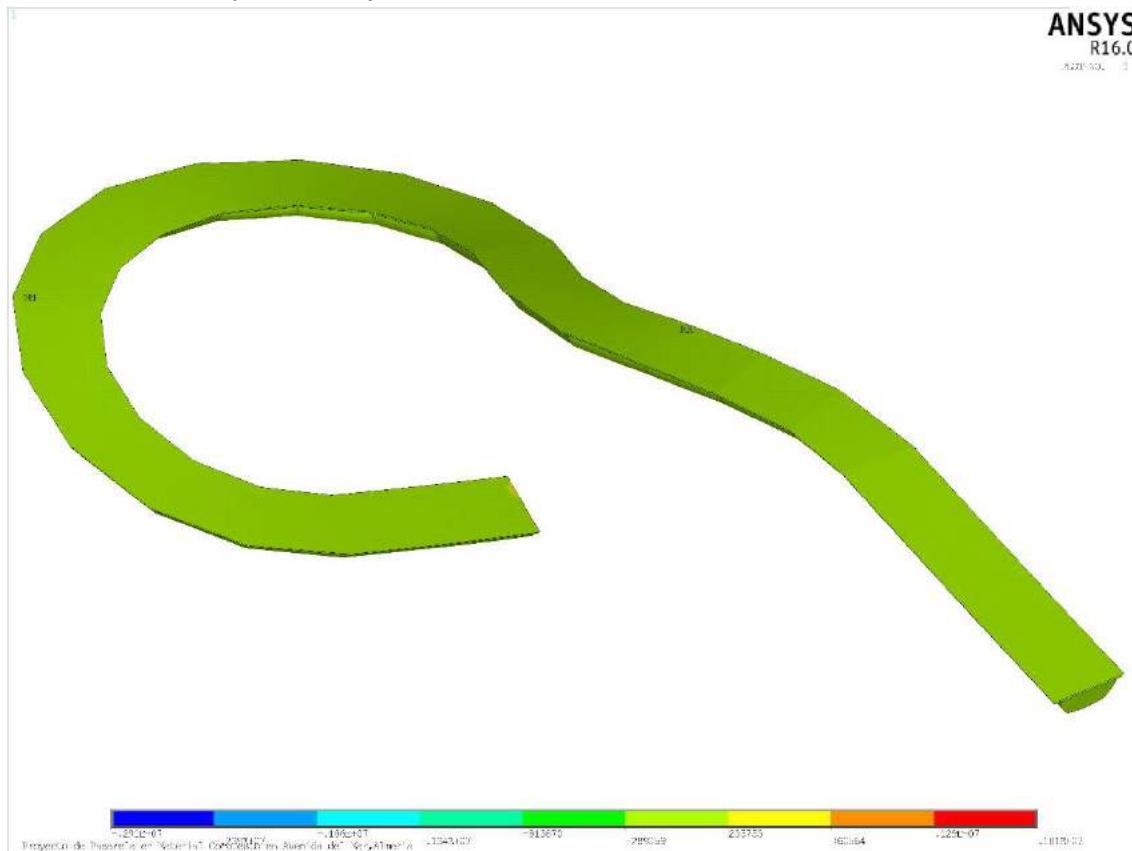


Ilustración 114: AXIL N11 (en kN/m). Valor Máximo 289 kN

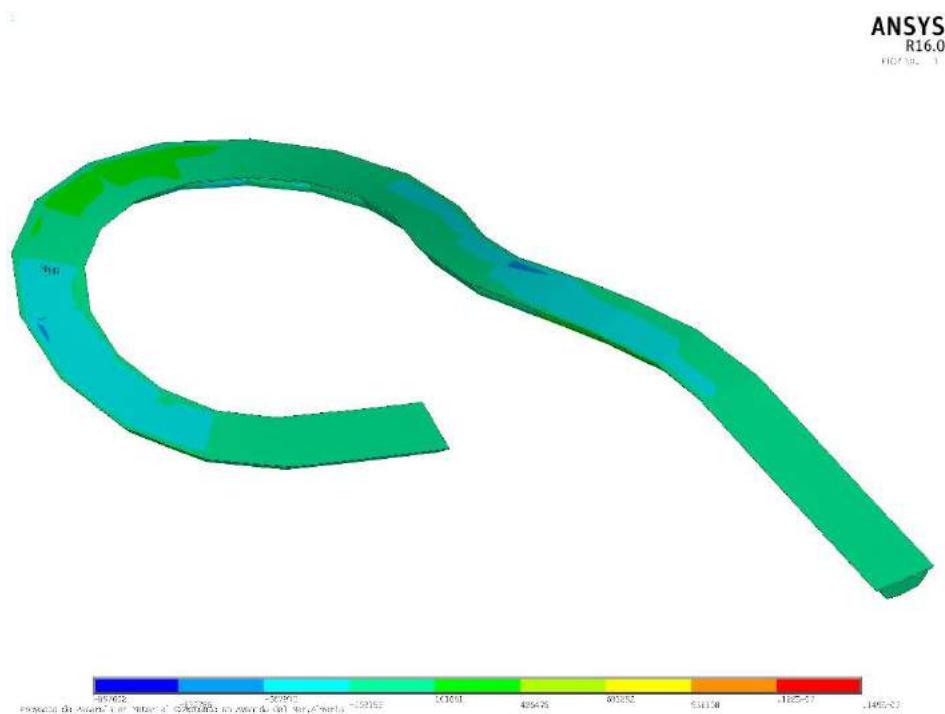


Ilustración 115: Axil N22 (en kN/m). Valor máximo 897kN

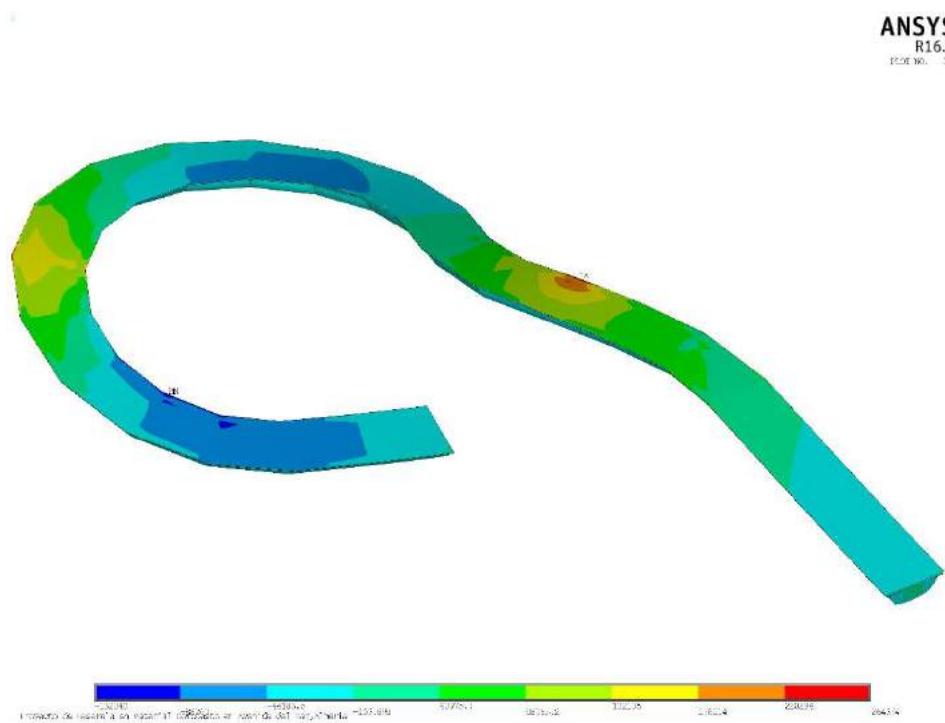


Ilustración 116: Axil N12 en (kN/m). Valor máximo 264kN

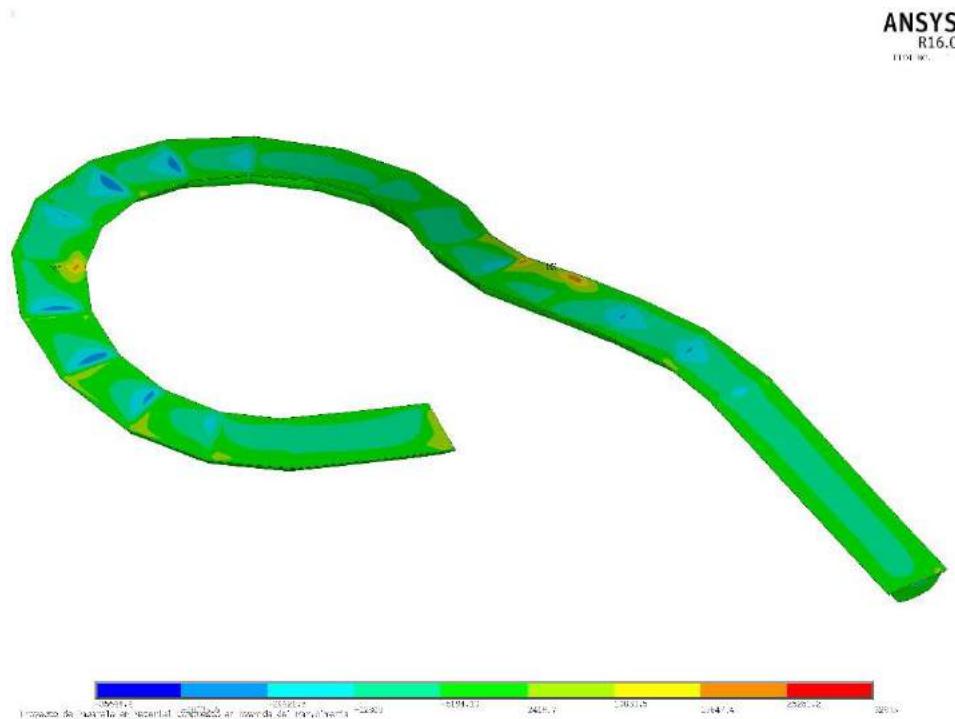


Ilustración 117: Q13 (en kN/m). Valor máximo 35.649 kN

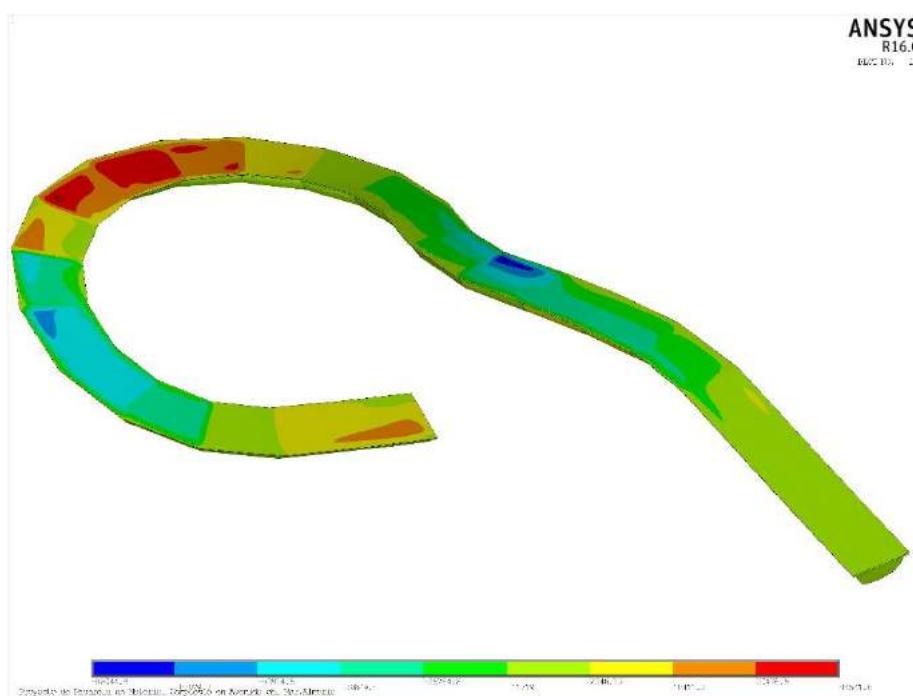


Ilustración 118: Q23 (en kN/m). Valor máximo 82 kN

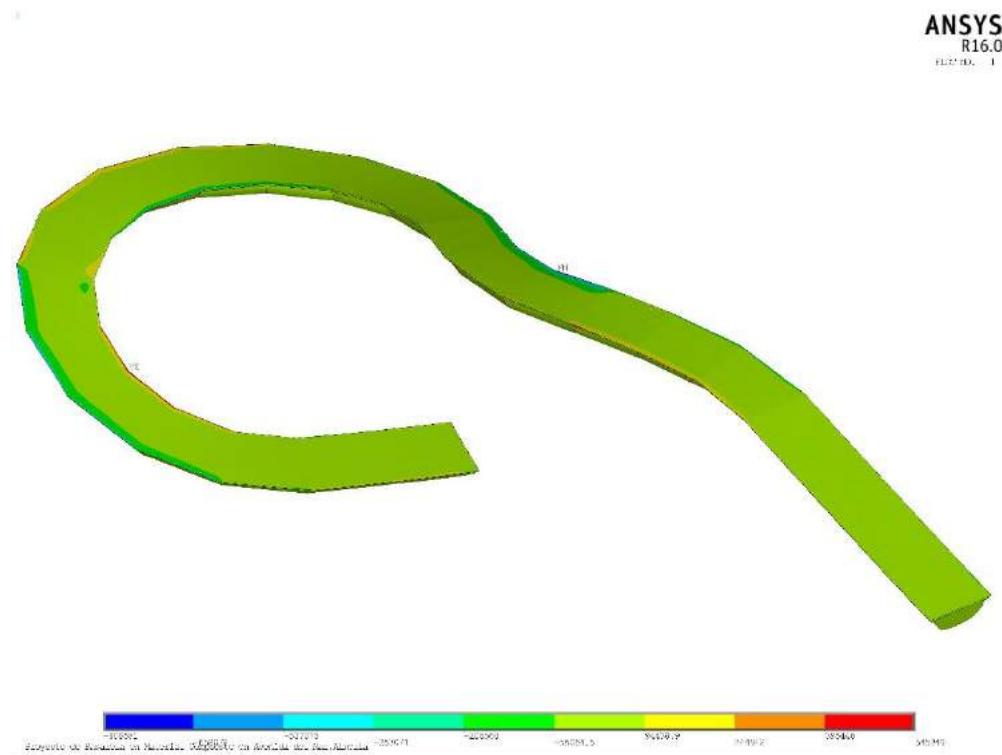


Ilustración 119: M11 en kN. Valor máximo 808.581 kN*m

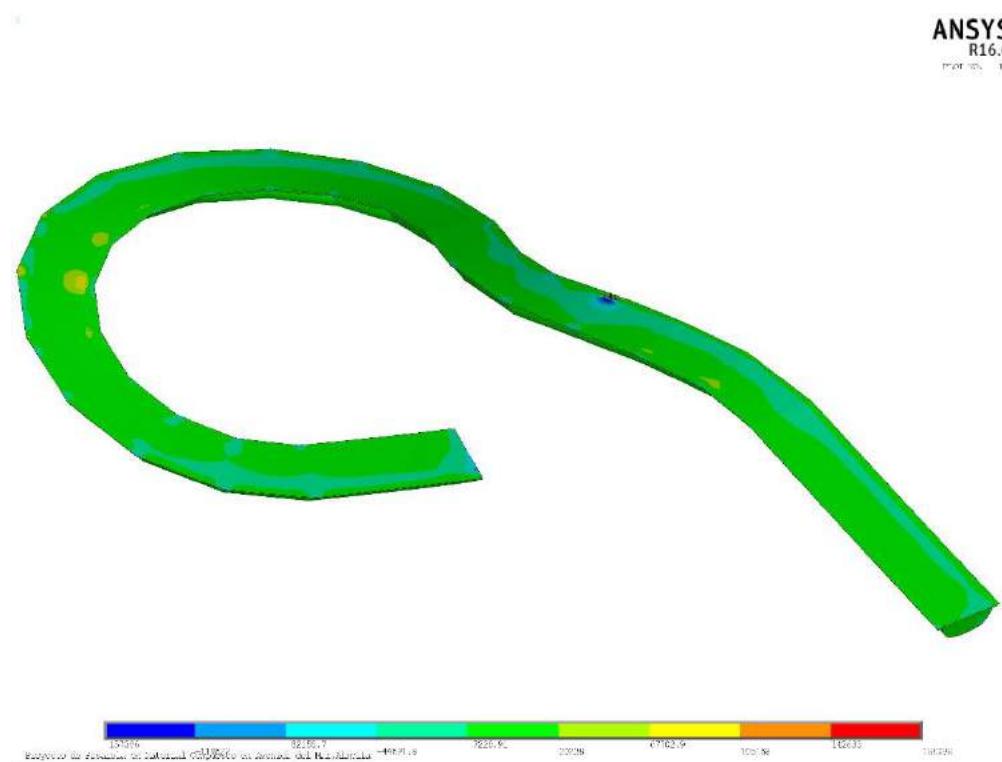


Ilustración 120 M22 en kN. Valor máximo:180 kN*m

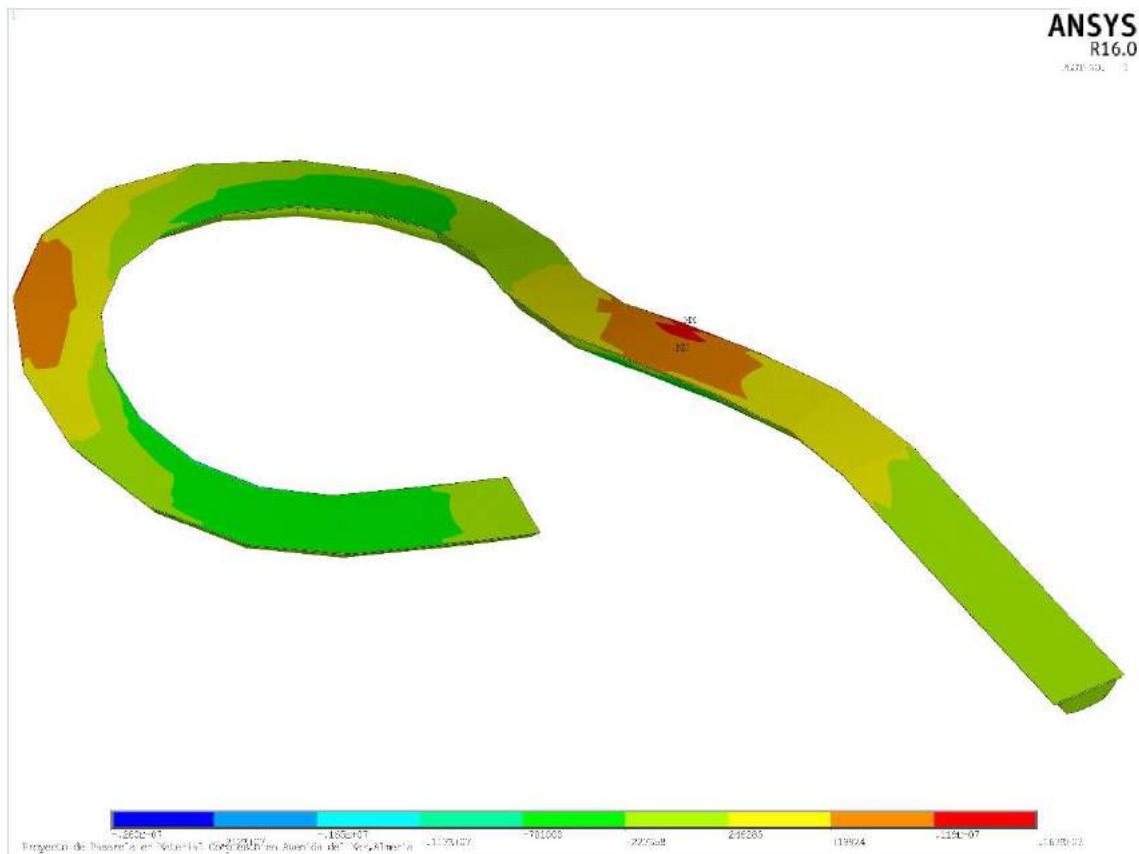


Ilustración 121: M12 en kN. Valor máximo 1670 kN*m.

Criterios de rotura para la combinación más desfavorable

ANSYS
R16.0
8221:501 - 1

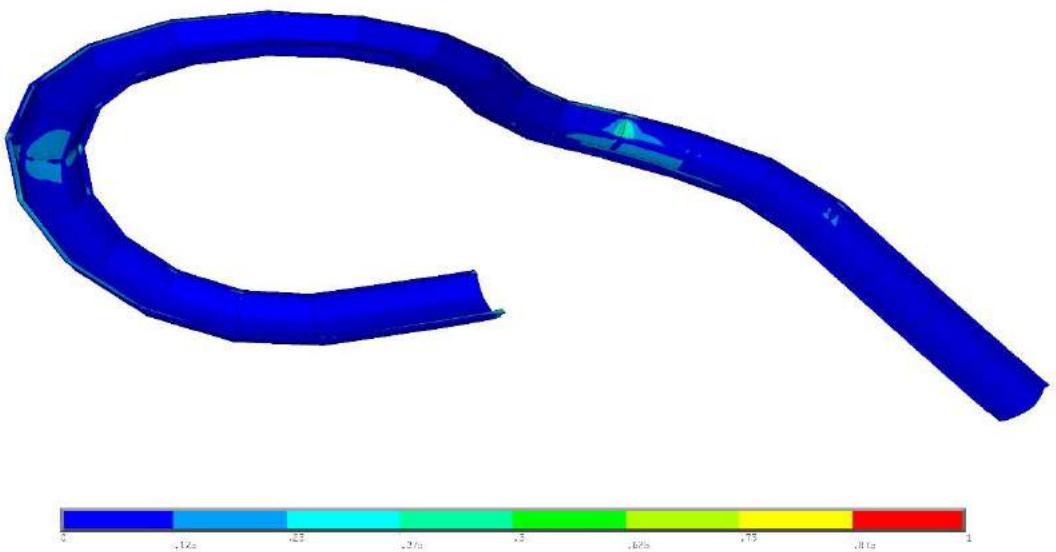


Ilustración 122: Criterio Rotura Puck para la Fibra. Grado de Aprovechamiento 62.5%

ANSYS
R16.0
8221:501 - 1

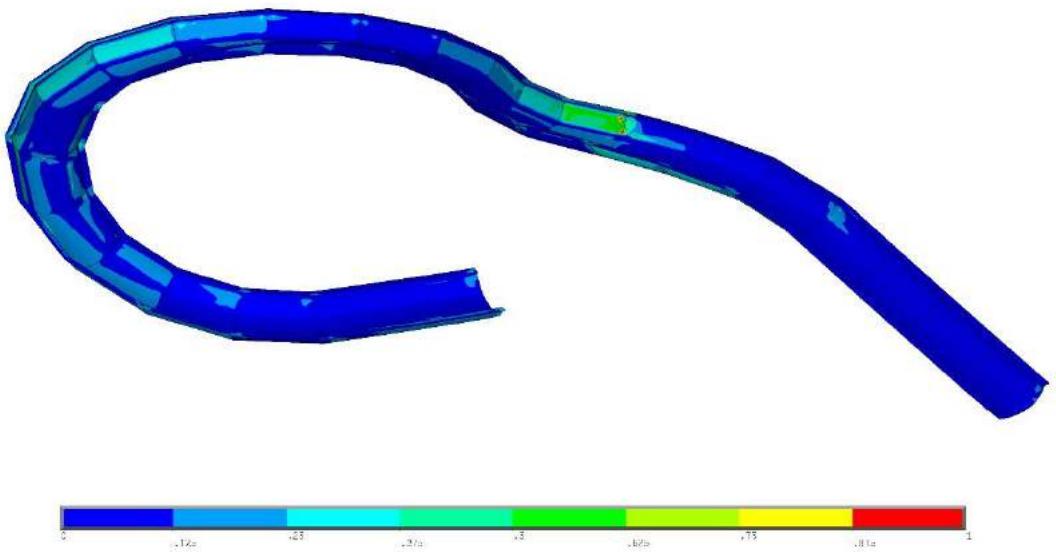


Ilustración 123: Criterio de Puck para la Matriz. Grado de aprovechamiento: 87.5%

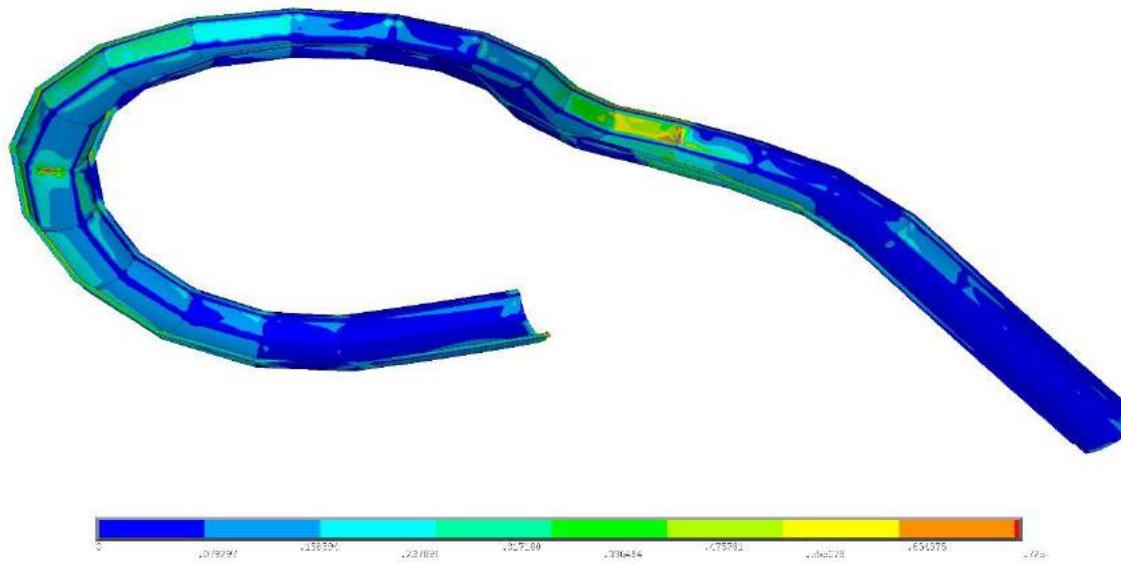


Ilustración 124: Criterio de rotura de Tsai-Wu. Grado de aprovechamiento 72%

Criterios de Rotura	Grado de aprovechamiento (%)
Puck (Fibra)	62.5
Puck (Matriz)	87.5
Tsai-Wu	72.5

Comprobaciones E.L.U. de Inestabilidad

En Eurocomp (Clarke, 1996), las comprobaciones de inestabilidad están basadas en los criterios básicos de pandeo Euler de columnas y pandeo de placas extendidas a casos ortotropos. De esta manera, la norma no introduce imperfecciones como sí se viene haciendo en los Eurocódigos con las curvas de pandeo, ni establece reducciones efectivas debido a la abolladura y plastificación local en placas. Es por ello que, de acuerdo a Eurocomp, un análisis de pandeo clásico lineal puede resultar factible dado que no se aportan mayores datos. La manera de actuar que tomaremos será la de garantizar un coeficiente de pandeo lo suficientemente elevado como para asegurarnos para posibles efectos no contemplados por la normativa.

De esta manera, hemos realizado un análisis a pandeo lineal clásico (“eigenbuckling”) comprobando las combinaciones propuestas y hemos asegurado que el coeficiente de pandeo sea siempre superior a 2. Esta es la razón que, en aras de aportar rigidez, una vez llegada a la conclusión de que la estructura cumple a resistencia, se colocaran los bloques de espuma pertinentes como núcleo para, con el aumento de la rigidez pertinente, poder cumplir el criterio impuesto de pandeo.

Tengamos en cuenta que, de acuerdo a los resultados que muestra aportados por el software de elementos finitos empleados (ANSYS 16), el coeficiente de pandeo muestra el valor por el que es necesario aumentar **todas las cargas incluidas en la combinación** para que se produzca un fenómeno de inestabilidad. De esta manera, el coeficiente es conservador, dado que puede que solo una carga sea la responsable del pandeo, sin que el resto repercuta de manera significativa. Ello, unido al alto valor de mayoración de cargas exigido (mayor que dos) hace que el criterio adoptado resulte conservador y adecuado.

Recordemos que el mecanismo adoptado para el control del pandeo de la viga fue la colocación de “costillas” rigidizadores transversales tipo sándwich colocados cada 2.5m provistos de un laminado preparado para soportar cortante (el 70% de las fibras están puesta a $\pm 45^\circ$) y dotados de un material de núcleo de PET, cuya función es la de aportar rigidez al conjunto.

Los valores obtenidos para los casos de carga estudiados de E.L.U son:

Número de la Combinación de Carga	Coeficiente de Pandeo
1	2.3342
2	2.3022
3	3.2577
4	3.0454
5	3.1243
6	3.0586
7	3.1511
8	3.0871

Tabla 16: Coeficientes de pandeo global calculados

ANSYS
R16.0
ANSYS 16.0 - 1

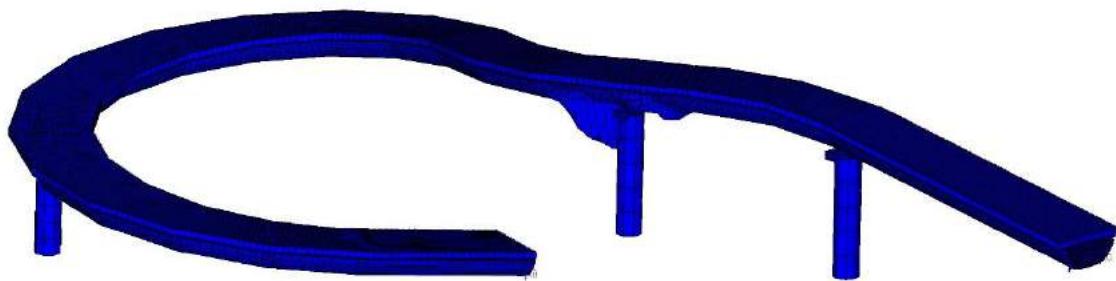


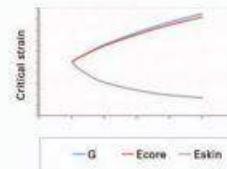
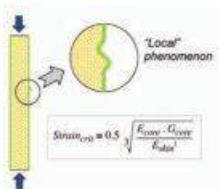
Ilustración 125: Deformada para el coeficiente de pandeo crítico(2. 3342)o. Observar el fallo de los diafragmas

Es necesario apuntar que las comprobaciones de inestabilidad realizadas son a nivel global. Sería necesario realizar comprobaciones de inestabilidad locales para los cuales el criterio de diseño seguido (recordemos que sin rango normativo) no se pronuncia más que considerándolas incluidas en el cálculo global. Dichas comprobaciones locales se han considerado fuera del ámbito de este proyecto, y se encuadran dentro de los estudios futuros. De esta manera, sería necesario tener en cuenta aquellos fenómenos de inestabilidades locales de los cuales se conocen los mecanismos pero no aparecen bien reseñados en estos códigos y/o guías de diseño seguidas.

Estos mecanismos aparecen recogidos esquemáticamente en el catálogo de Gurit, en su versión 10 (Gurit , 2015)

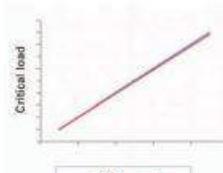
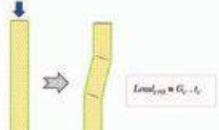
SKIN WRINKLING

Core provides insufficient out-of-plane support to skins allowing local, independent buckling.
Occurs on panels subjected to high compressive strains, independently of panel width.



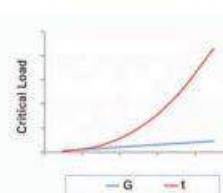
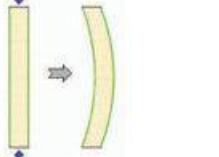
SHEAR CRIMPING

Core shear modulus is too low to transfer loads between outer laminate skins.
Occurs on panels subjected to high compressive loads, independently of panel width.



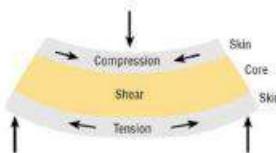
PANEL BUCKLING

The panel has insufficient bending stiffness to prevent buckling.
Occurs on wide flat panels subjected to high compressive load (Euler buckling), or on deep panels subjected to high shear load (Shear buckling).



IMPACT RESISTANCE

Core toughness and resistance-to-cracking is too low to absorb high energy slamming loads. Occurs in core materials with low shear elongation.



Comprobaciones E.L.U./E.L.S procedimiento constructivo

De acuerdo al procedimiento constructivo, debemos comprobar que la colocación de la prelosa y el hormigón fresco sin fraguar no supongan una carga excesiva. Así, tanto para controlar flecha como garantizar la no pérdida de resistencia por delaminación de componentes debido al alcance tensiones elevadas se limita la tensión que pueden alcanzar las láminas a un 60% de su resistencia.

Dado que la situación de construcción es una situación transitoria (por tanto, a "corto plazo") los coeficientes parciales de seguridad a emplear son los situaciones a corto plazo, previstos en [Factores de seguridad parciales](#)

De esta manera, en aras de conseguir los objetivos propuestos de cara a garantizar la seguridad durante el proceso constructivo, se tanteó la colocación de apeos provisionales.

Comprobación E.L.S. Deformaciones

Para la comprobación del estado límite servicio de deformaciones se busca cumplir el criterio propuesto por la IAP-11 para cumplir el criterio de deformación para **el valor frecuente de la sobrecarga uso**, limitando la normativa de referencia la deformación vertical máxima para pasarelas o puentes sitos en zonas peatonas a L/1200.

Dado que nuestra estructura no es atirantada, suspendida, con tablero inferior o asimilable, el valor de la deformación vertical máxima admisible toma "L" como el valor total del desarrollo de la pasarela. De esta manera, el valor máximo de deformación admisible para deformación vertical de la pasarela viene a ser:

$$L = 60 \text{ m} \rightarrow \frac{60\text{m}}{1200} = 0.05\text{m} = 5\text{cm}$$

De esta manera, evaluando el valor de los desplazamientos para el valor frecuente de la sobrecarga de uso, podemos observar el cumplimiento de la flecha límite exigida por la normativa seguida:

Combinación de Carga	Valor del desplazamiento máximo (cm)
Valor frecuente de la sobrecarga de uso	1.97cm

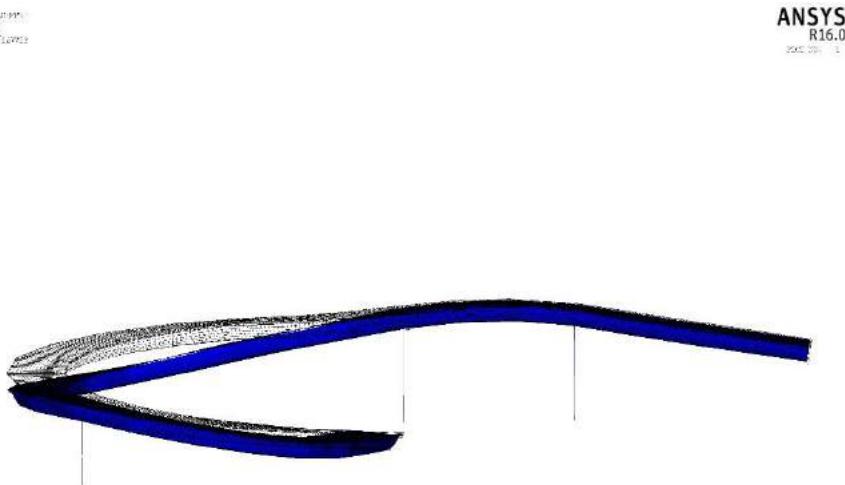


Ilustración 126: Vista general de la deformada (valor máximo: 0.019689m)

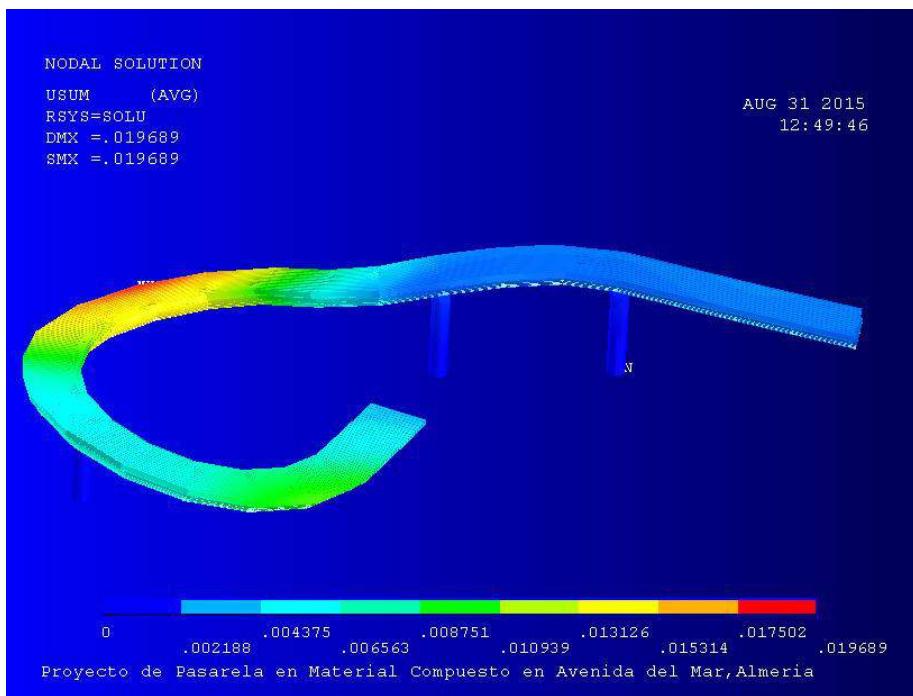


Ilustración 127: Mapa de colores de la resultante de desplazamientos, valor máximo para el valor frecuente de la sobrecarga de uso: 0.019689m

Comprobación para E.L.S de Vibraciones

Introducción

La comprobación del estado límite servicio de vibraciones comprende el análisis modal de la estructura y el análisis de los valores de las frecuencias naturales, de sus modos de vibración asociados y de las aceleraciones máximas inducidas por los peatones en su tránsito. La normativa empleada para la comprobación será tanto la IAP-11 como las recomendaciones recogidas por el grupo SYNPEX (Heinemeyer, et al., 2009).

De acuerdo a estas normas, el cumplimiento del estado límite de servicio se consigue mediante el control de las aceleraciones experimentadas en cualquier espacio transitable por peatones, limitándose estos valores a unos considerados como admisibles de acuerdo al grado de confort exigido. Este grado de confort aparece determinado por las exigencias previstas para la pasarela en función de su categoría y de las situaciones de tráfico previstas.

De forma simplificada, las normativas concluyen que son excluibles de un cálculo dinámico aquellas pasarelas cuyas frecuencias naturales se encuentre fuera de un determinado rango. Este rango es el que se muestra a continuación:

- Rango crítico de 0.5 a 1.2 Hz para modos de vibración laterales según IAP-11
- Rango crítico de 1.25 a 4.6 Hz para modos de vibración verticales según IAP-11

- Los estudios elaborados por el SYNPEX y recogidos en la normativa francesa SETRA (Heinemeyer, et al., 2009) acotan el rango crítico entre 1.25 y 2.3 Hz para frecuencias verticales, advirtiendo que, frecuencias entre 2.5 y 4.6Hz pueden excitar el segundo armónico de cargas peatonales para cargas verticales y torsionales.

En la propia publicación se admite que, a día de hoy no se puede encontrar en la literatura existente casos reseñables de vibraciones provocadas por el segundo armónico y que este nunca afecta a vibraciones laterales. Esta consideración provoca que, actualmente el rango más aceptado en la práctica para considerado como crítico para análisis dinámicos más exhaustivos el diseño de una pasarela se encuentra, para rangos de entre 1.25 y 2.3 Hz.

Pedestrian effects are generally characterised on the basis of harmonic load models which coefficients are systematised in Section 9. The dominant contribution of the first harmonic leads to the following critical range for natural frequencies f_i :

- for vertical and longitudinal vibrations:

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 2,3 \text{ Hz}$$

- for lateral vibrations: $0,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 1,2 \text{ Hz}$

There are situations in which natural frequencies lie in an interval susceptible of excitation by the second harmonic of pedestrian excitation. Under these circumstances, if it is considered relevant to investigate the effects associated with the second harmonic of pedestrian loads, the critical range expands to:

- for vertical and longitudinal vibrations:

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$$

Footbridges which have natural frequencies f_i in the critical range should be subject to a dynamic assessment to pedestrian excitation.

Lateral vibrations are not affected by the 2nd harmonic of pedestrian loads.

Note: A vertical vibration excitation by the second harmonic of pedestrian forces might take place. Until now there is no hint in the literature that significant vibration of footbridges due to the second harmonic of pedestrians have occurred.

Ilustración 128: Valores de rango crítico de frecuencias, previsto en (Heinemeyer, et al., 2009)

De esta manera se comprueba que las frecuencias de la pasarela no se encuentren dentro de los límites impuestos por la normativa de referencia para modos de vibración verticales y horizontales. Los límites impuestos a las vibraciones por la IAP-11 aparecen recogidos en la siguiente tabla presente en la norma:

TABLA 7.2-a VALORES DE REFERENCIA DE ACCELERACIONES PARA EL CONFORT DE LOS PEATONES

GRADO DE CONFORT	RANGOS DE ACCELERACIONES	
	VERTICALES	LATERALES
Máximo	< 0,50 m/s ²	< 0,10 m/s ²
Medio	0,50 a 1,00 m/s ²	0,10 a 0,30 m/s ²
Mínimo	1,00 a 2,50 m/s ²	0,30 a 0,80 m/s ²
No aceptable	>2,50 m/s ²	> 0,80 m/s ²

Ilustración 129: Grado de Confort previstos en la IAP-11

Valores tomados de (Heinemeyer, et al., 2009)

Dado que, de acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la segunda frecuencia natural, se supone necesaria la paliación de los efectos de este modo, que entra dentro del rango considerado problemático, mediante la colocación del TMD y el estudio del transitorio para comprobar que las aceleraciones inducidas por la carga dinámica de las personas se encuentran acotadas dentro de los límites impuestos por la normativa de referencia.

Table 4-4: Defined comfort classes with common acceleration ranges

Comfort class	Degree of comfort	Vertical a_{limit}	Lateral a_{limit}
CL 1	Maximum	< 0,50 m/s ²	< 0,10 m/s ²
CL 2	Medium	0,50 – 1,00 m/s ²	0,10 – 0,30 m/s ²
CL 3	Minimum	1,00 – 2,50 m/s ²	0,30 – 0,80 m/s ²
CL 4	Unacceptable discomfort	> 2,50 m/s ²	> 0,80 m/s ²

Note that the given acceleration ranges are just comfort criteria; lock-in criteria for horizontal vibrations are given in section 4.6.

Ilustración 130: Valores de rango crítico de confort, previsto en (Heinemeyer, et al., 2009)

Definición de la situación de diseño

De la misma manera que definimos en su momento las combinaciones de carga para el estudio del estado límite último de resistencia (E.L.U.), es necesario que para el estudio de aceleraciones establezcamos una serie de situaciones características propias del tránsito previsto de nuestra pasarela y en las que sea necesario asegurar unos criterios impuestos de aceleraciones. De esta manera, estableceremos estos límites de acuerdo a las consideraciones que exige la Propiedad.

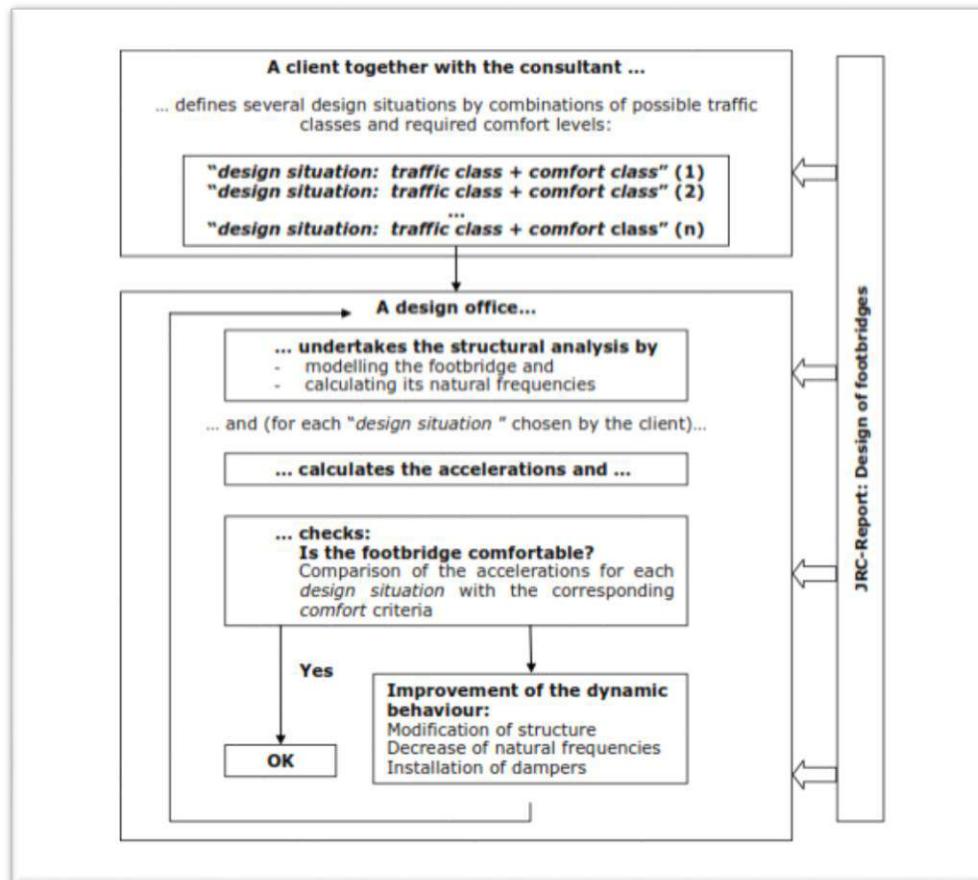


Ilustración 131: Metodología de diseño ante solicitud dinámica. Cortesía de (Heinemeyer, et al., 2009)

Análisis Modal

Realizaremos un análisis modal para determinar aquellas frecuencias que pudieran resultar merecedoras de un análisis dinámico más detallado y del cálculo y empleo de un TMD.

En el análisis modal se han tenido en cuenta dos masas añadidas a la propia del modelo (y, por tanto, no estructurales)

- La masa del pavimento y barreras, de $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
- La masa propia de los peatones, que es supuesta aproximadamente de un peatón cada metro cuadrado de 70 kg de peso, esto es $70 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$.

Los resultados obtenidos, de acuerdo a las premisas adoptadas, son los siguientes:

Nº Frecuencia	Frecuencia (Hz)	Modo de vibración
1	1.2626	Vertical
2	1.585	Vertical
3	2.3383	Horizontal
4	2.6074	Vertical
5	4.0748	Torsional
6	5.6353	Torsional
7	6.1713	Vertical
8	6.975	Vertical
9	8.6807	Torsional
10	10.055	Vertical

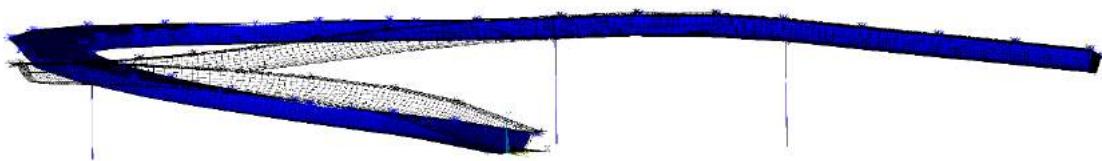
A continuación se exponen los modos de vibración obtenidos mediante el paquete de elementos finitos ANSYS.

De acuerdo a las frecuencias obtenidas se considera necesario el estudio dinámico de la pasarela dado que existen frecuencias a modos de vibración que entran dentro de los posibles rangos conflictivos especificados por la IAP-11 y en (Heinemeyer, et al., 2009) y que necesitarán del cálculo y colocación de un TMD.



Ilustración 132: Visión en conjunto de los modos de vibración de la estructura,

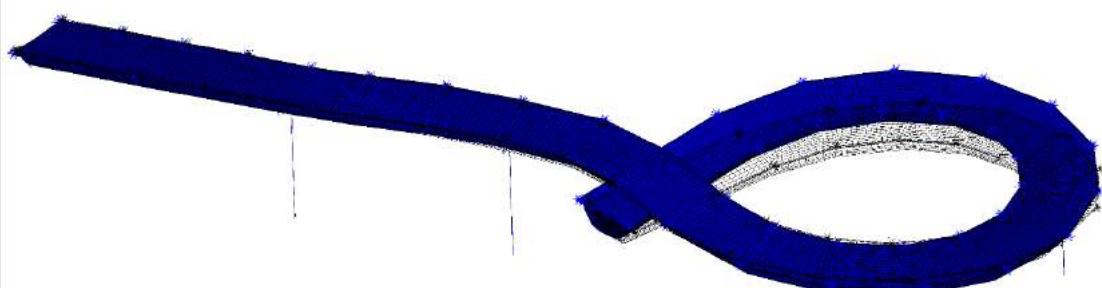
ANSYS
R16.0
ANSYS 16.0



Frecuencia de vibración en vertical: 1.26Hz. Completado en Análisis de Vibración.

Ilustración 133: Modo de vibración (vertical) para la primera frecuencia natural (1.26Hz)

ANSYS
R16.0
ANSYS 16.0



Frecuencia de vibración en vertical: 1.58Hz. Completado en Análisis de Vibración.

Ilustración 134: Modo de vibración (vertical) para la segunda frecuencia natural (1.58Hz)

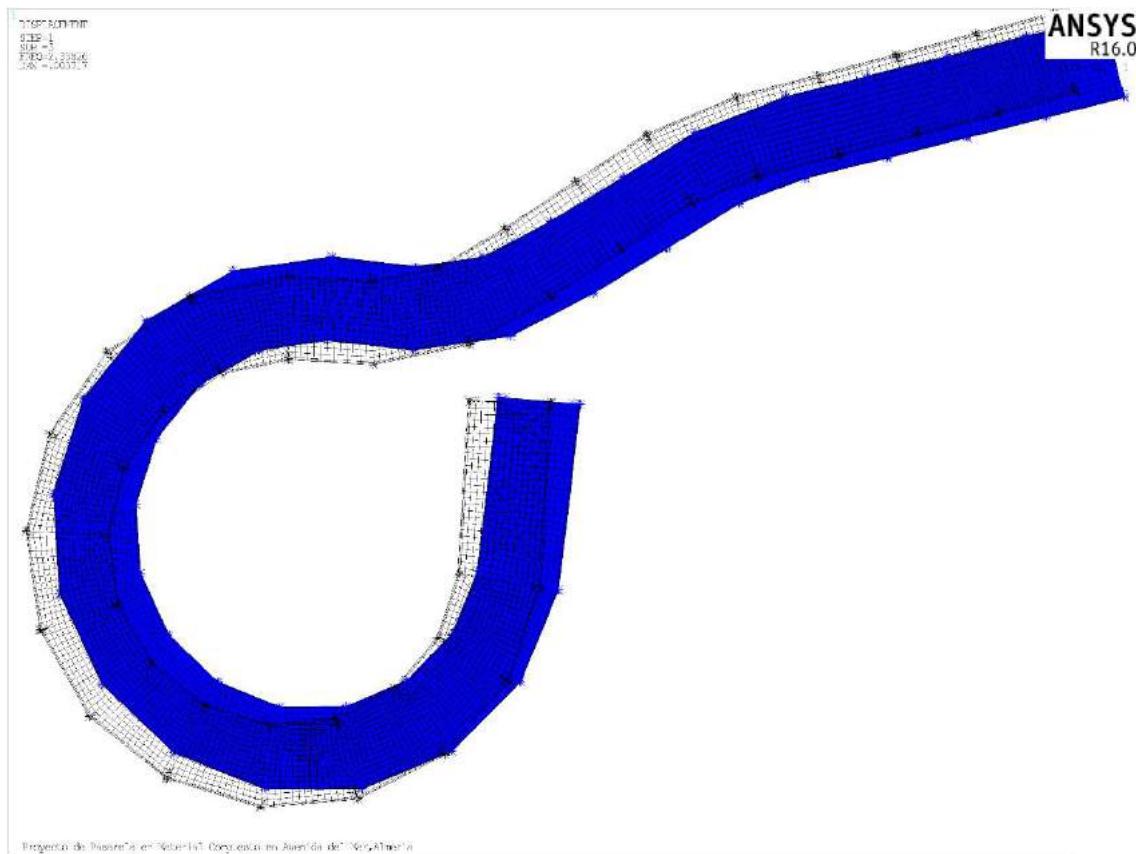


Ilustración 135: Modo de vibración (horizontal) para la tercera frecuencia natural (2.34Hz)

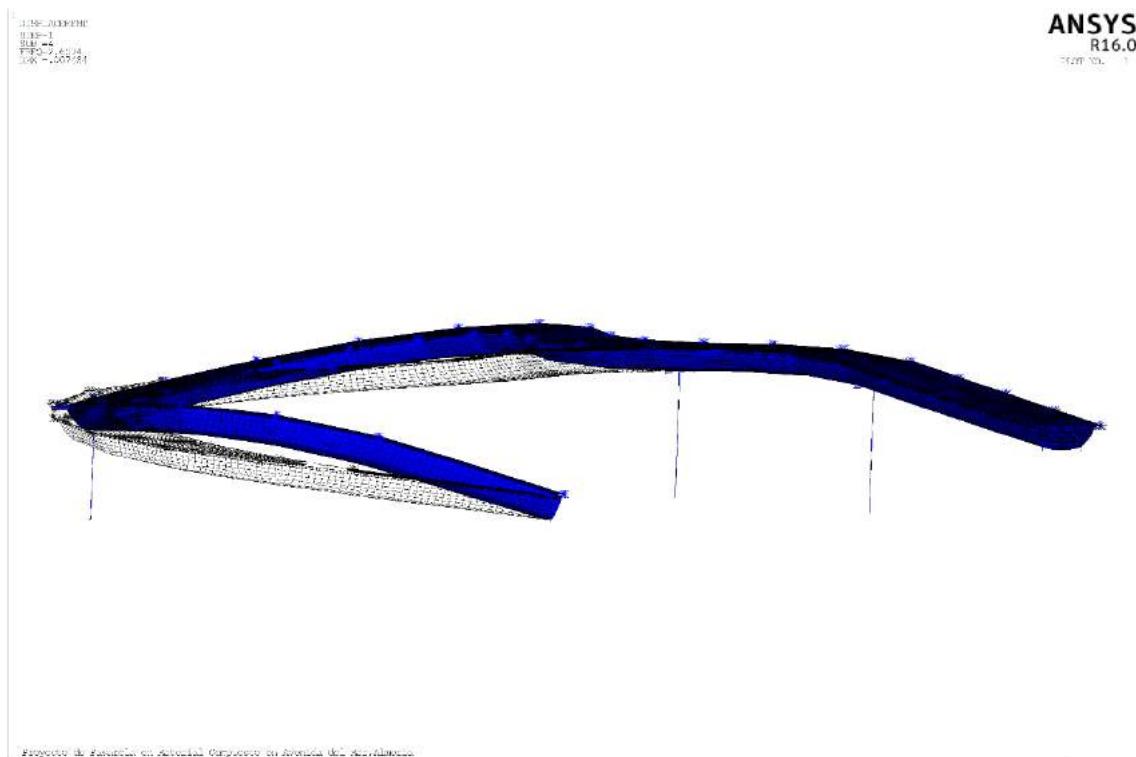


Ilustración 136: Modo de vibración (vertical) para la cuarta frecuencia natural (2.61Hz)

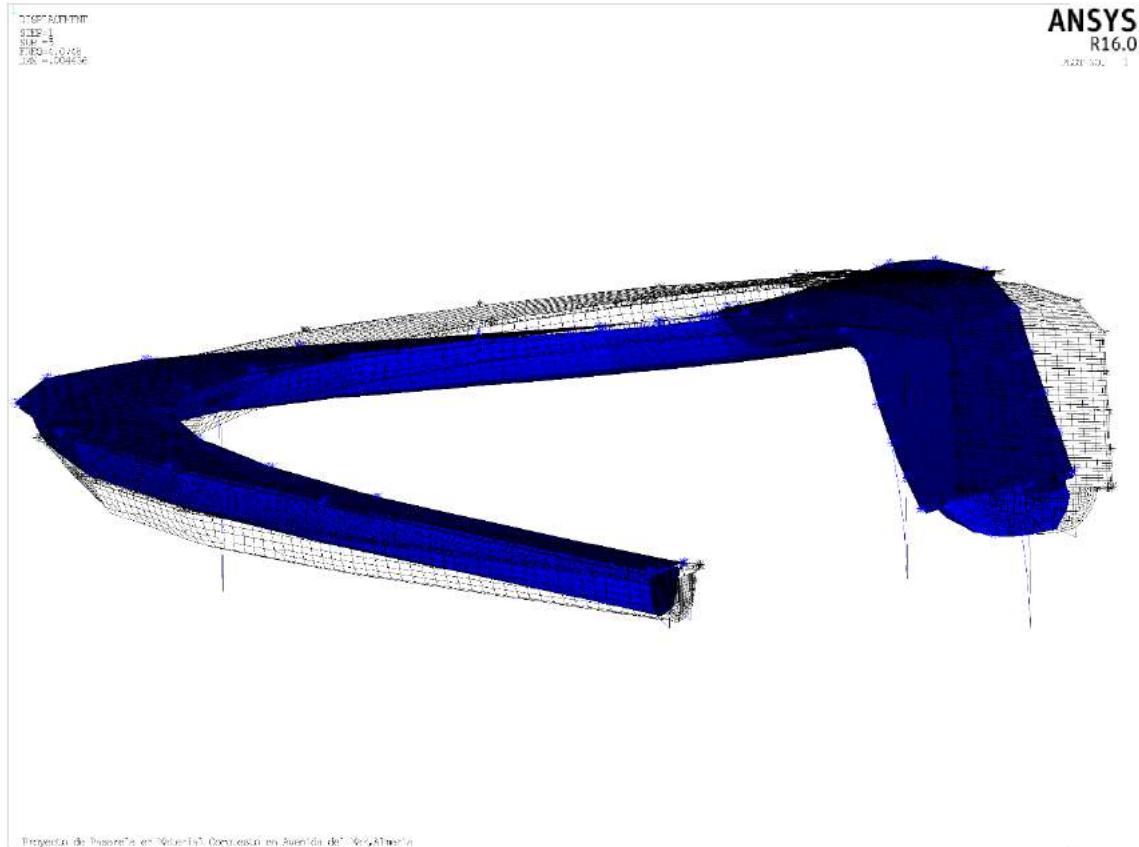


Ilustración 137: Modo de vibración (torsional) para la quinta frecuencia natural (4.08Hz)

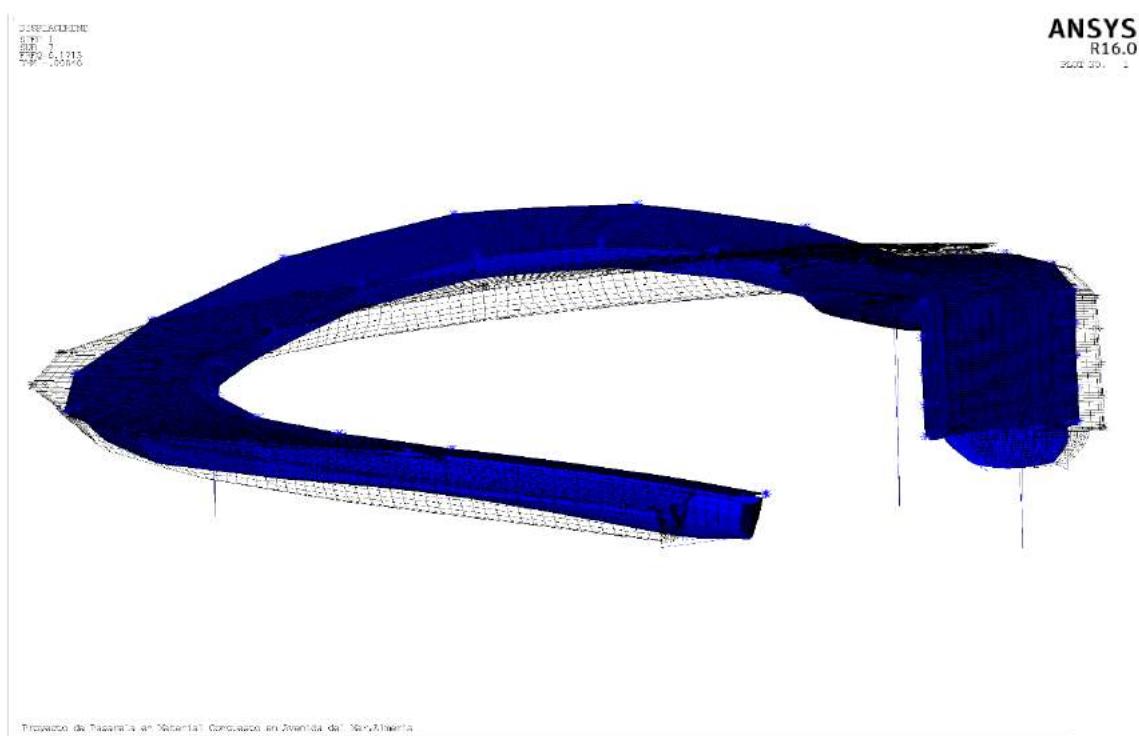
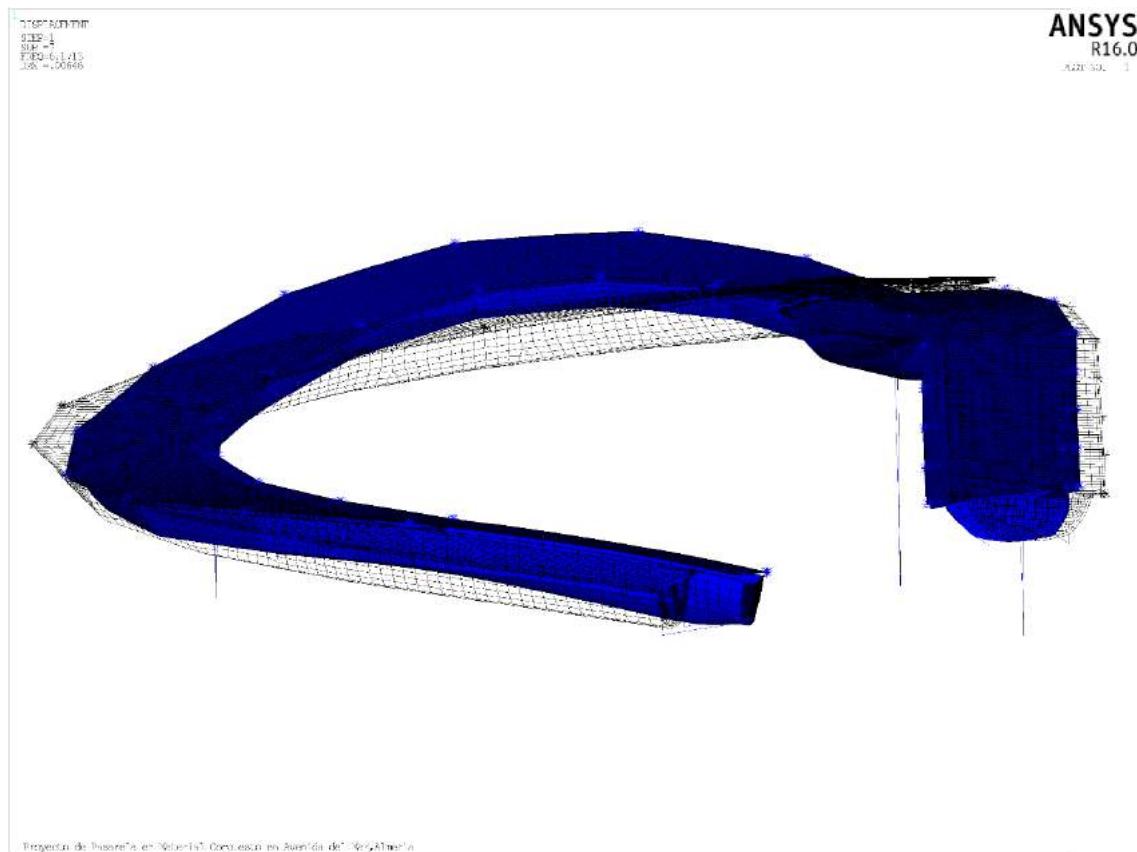


Ilustración 138: Modo de vibración (torsional) para la sexta frecuencia natural (5.64Hz)



ANSYS
R16.0
ANSYS 1

Proyecto de Pasarela en Material Compuesto en Análisis del Desempeño

Ilustración 139: Modo de vibración (vertical) para la séptima frecuencia natural (6.17Hz)



ANSYS
R16.0
ANSYS 1

Proyecto de Pasarela en Material Compuesto en Análisis del Desempeño

Ilustración 140: Modo de vibración (vertical) para la octava frecuencia natural (6.975Hz)

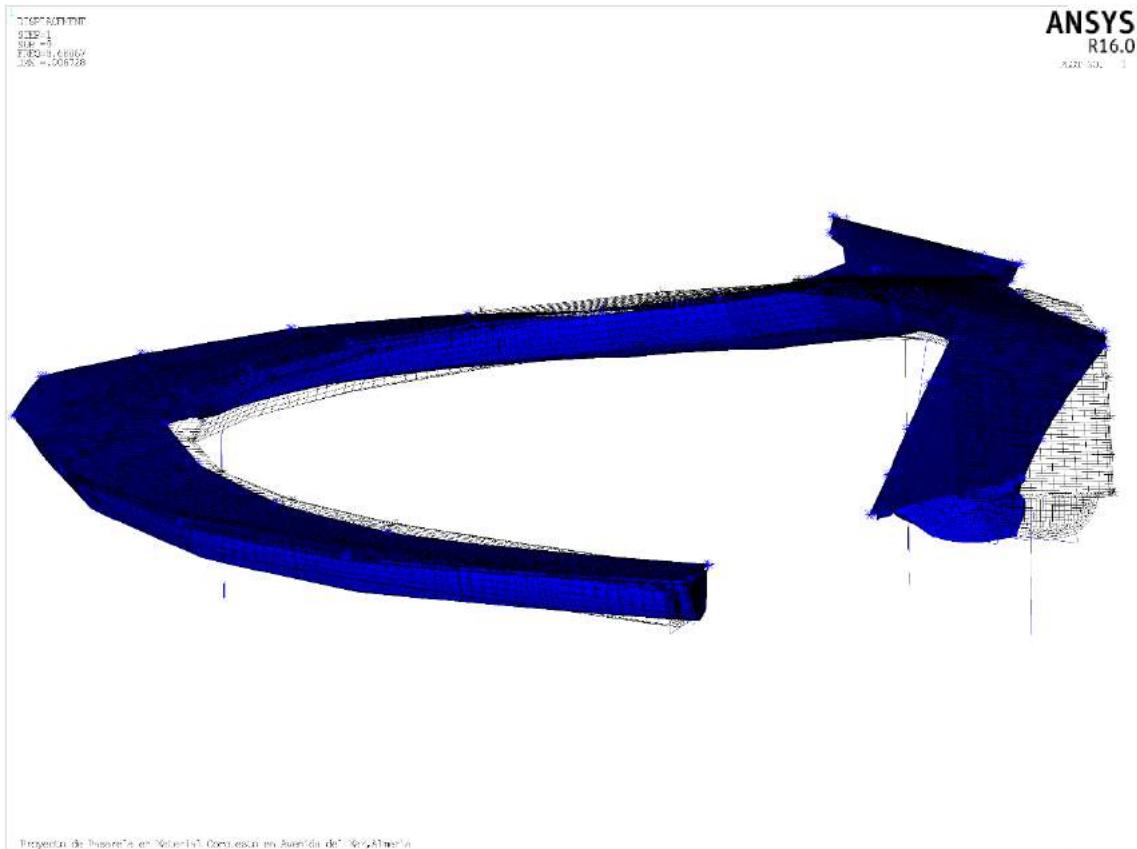


Ilustración 141: Modo de vibración (torsional) para la novena frecuencia natural (8.68Hz)



Ilustración 142: Modo de vibración (vertical) para la décima frecuencia natural (10.06Hz)

Definición Situaciones de Tráfico

Debemos definir una serie de situaciones en las que se combinen las situaciones de tráfico peatonal y los niveles de confort elegido. Para nuestro diseño, consideramos que debemos garantizar un nivel de exigencia elevado de acorde con la importancia de la estructura. De esta manera, entendemos que el nivel de confort exigido por la Propiedad para las situaciones de tráfico que ahora se detallan será el de máximo confort (C1).

Las situaciones de tráfico y sus densidades asociadas aparecen recogidas en la siguiente tabla, presente en el (Heinemeyer, et al., 2009):

Traffic Class	Density d (P = pedestrian)	Description	Characteristics
TC 1*)	group of 15 P; $d=15 \text{ P} / (B L)$	Very weak traffic	(B =width of deck; L =length of deck)
TC 2	$d = 0,2 \text{ P/m}^2$	Weak traffic 	Comfortable and free walking Overtaking is possible Single pedestrians can freely choose pace
TC 3	$d = 0,5 \text{ P/m}^2$	Dense traffic 	Still unrestricted walking Overtaking can intermittently be inhibited
TC 4	$d = 1,0 \text{ P/m}^2$	Very dense traffic 	Freedom of movement is restricted Obstructed walking Overtaking is no longer possible
TC 5	$d = 1,5 \text{ P/m}^2$	Exceptionally dense traffic	Unpleasant walking Crowding begins One can no longer freely choose pace

*) An equivalent pedestrian stream for traffic class TC1 is calculated by dividing the number of pedestrians by the length L and width B of the bridge deck.

Ilustración 143: Clases de tráfico peatonal especificadas en (Heinemeyer, et al., 2009)

Dado que, como hemos recogido anteriormente, los criterios de confort aparecen asociados a “clases”, siendo la C1 la más exigente y la C4 la de grado de confort inaceptable:

Table 4-4: Defined comfort classes with common acceleration ranges

Comfort class	Degree of comfort	Vertical a_{limit}	Lateral a_{limit}
CL 1	Maximum	< 0,50 m/s ²	< 0,10 m/s ²
CL 2	Medium	0,50 – 1,00 m/s ²	0,10 – 0,30 m/s ²
CL 3	Minimum	1,00 – 2,50 m/s ²	0,30 – 0,80 m/s ²
CL 4	Unacceptable discomfort	> 2,50 m/s ²	> 0,80 m/s ²

Note that the given acceleration ranges are just comfort criteria; lock-in criteria for horizontal vibrations are given in section 4.6.

Ilustración 144: Clases de confort para los peatones especificadas en (Heinemeyer, et al., 2009)

De esta manera, someteremos la pasarela a estudio dinámico de las situaciones consideradas como típicas por las guías del SYNPEX (Heinemeyer, et al., 2009) y que son asimilables a las situaciones de tráfico existentes en nuestra pasarela, a saber:

	Individual pedestrians and small groups Number of pedestrians: 11 Group size: 1-2 P Density: 0,02 P/m ² Note: P = pedestrian
	Very weak traffic Number of pedestrians: 25 Group size: 1-6 P Density: 0,1 P/m ²
	Weak traffic Here: event traffic Number of pedestrians: 60 Group size: 2-4 P Density: 0,2 P/m ²
	Exceptionally dense traffic Here: opening ceremony traffic Density: > 1,5 P/m ²

Ilustración 145: Situaciones de tráfico consideradas aproximativamente como características en el diseño dinámico de pasarelas, de acuerdo a (Heinemeyer, et al., 2009)

Estas situaciones de tráfico se han recogido en la siguiente tabla en la que aparecen explicitados los tráficos definidos por sus densidades y los momentos en la vida de la pasarela que representan

Situación de Diseño	Descripción	Clase de Tráfico	Densidad de Peatones	Expectativa de ocurrencia	Clase de Confort exigida
1	Inauguración de la pasarela	TC5	1.5 P/m ²	Una vez en la vida	CL1
2	Tráfico Normal+ Tráfico Turístico	TC2	0.2 P/m ²	Diariamente	CL1
3	Tráfico Normal	TC1-B	0.1 P/m ²	Diariamente	CL1
4	Tráfico Horas Intempestivas (primera hora de la mañana, última de la noche)	TC1-A	0.02 P/m ²	Diariamente	CL1

Coeficiente de amortiguamiento

La elección del coeficiente de amortiguamiento para pasarelas híbridas FRP no se presenta, a priori, tan estudiada como sucede en puentes y pasarelas de otros materiales. Si bien es cierto que el amortiguamiento es una característica propia de la estructura, y que cada modo de vibración con su frecuencia asociada posee un amortiguamiento crítico distinto, es cierto que la experiencia acumulada permite tabular valores medios y mínimos representativos. Prueba de ello es la siguiente tabla recogida en (Heinemeyer, et al., 2009) para situaciones de servicio.

Construction type	Minimum ξ	Average ξ
Reinforced concrete	0,8%	1,3%
Prestressed concrete	0,5%	1,0%
Composite steel-concrete	0,3%	0,6%
Steel	0,2%	0,4%
Timber	1,0%	1,5%
Stress-ribbon	0,7%	1,0%

Ilustración 146: Valores propios de coeficientes de amortiguamiento mínimo y medios para materiales convencionales, recogida en (Heinemeyer, et al., 2009)

Sin embargo, esta experiencia a día no se encuentra tan acotada dentro del mundo de las pasarelas fabricadas en FRP. Asimismo, a esto se une la enorme variabilidad de los materiales englobados dentro del término FRP así como a las diferentes tipologías existentes de puentes y pasarelas en FRP (all-composite, hybrid).

Acerca de los coeficientes de amortiguación en puentes y pasarelas realizados en materiales compuestos podemos recoger una serie de nociones básicas que aparecen explicadas en (Center Landherr , 2008), y que pasamos a exponer:

- La mayor contribución al amortiguamiento en materiales compuestos es aquella atribuida a la matriz y a la interfaz fibra matriz.
- Asimismo, la existencia de daño, delaminación y roturas en la matriz del compuesto también induce a unas mejores capacidades de amortiguamiento, si bien es cierto que, en nuestro diseño, no vamos a permitir que se produzcan roturas de láminas ni delaminaciones, con lo cual no podemos contar con este mecanismo amortiguador. (Center Landherr , 2008)
- La mayor parte del modelado y estudio sobre amortiguamiento se ha realizado desde la perspectiva del amortiguamiento a través de la interfaz fibra matriz, pero no existen trabajos acerca de amortiguamientos transversales.
- Si bien es cierto que hay acuerdo en que la existencias de delaminaciones y otros mecanismos de fallo mejoran el comportamiento en cuanto a amortiguamiento, estos estudios están basados siempre en casos con múltiples delaminaciones unidireccionales, sin que se hayan buscado teorías más complejas que modelen el caso 3-D.
- La mayoría de los estudios investigan el amortiguamiento de elementos bidireccionales sin propias de las láminas, sin que se tengan en cuenta

laminados de mayor envergadura que pudieran tener en cuenta efectos en la dirección perpendicular

Existen expuestos diversos datos experimentales sobre estudios dinámicos de puentes y pasarelas FRP (Chandra, et al., 1999) (Center Landherr , 2008) que son recopilados y cuyas conclusiones son expuestas a continuación. Estas conclusiones nos permiten obtener una serie de conclusiones aproximadas y nos permiten hacernos un juicio de valor acerca de qué coeficiente de amortiguamiento puede ser representativo para nuestra estructura

- La ligereza de las estructuras en las que aparece el FRP y su carácter poco “masivo” en comparación con otras de mayores espesores, como es el caso del hormigón, así como una relación rigidez-peso alta las hace estructuras de coeficientes de amortiguamiento reducidos, cercanos a los de puentes de acero.
- Para pasarelas all-composite de fibra de vidrio (Aberfedley), al necesitar de mayores espesores y generalmente de luces cortas, el coeficiente de amortiguamiento sería el propio de la madera (módulo elástico parecido y material menos masivo que el hormigón armado)
- El comportamiento de elementos de fibra de carbono sería asimilable al del acero, debido a lo parecido en cuanto a la rigidez del material.

Para nuestra pasarela, suponerla mixta es una aproximación plausible dado que el mayor peso estructural recae en la fibra de carbono. Pese a que es cierto que la mayor flexibilidad de la fibra de vidrio que se ocupa de las almas exigiría un trato diferente, en primera aproximación, el asimilar la fibra de carbono/resina epoxy al acero puede suponer en carácter de amortiguamiento se supone un criterio suficiente en diseño.

Análisis Dinámico

Consideraciones previas

Para cada uno de los casos de tráfico analizados se han analizado las evoluciones con respecto al tiempo de las aceleraciones (tanto horizontal como vertical) de aquellos nodos que consideramos característicos y que son aquellos que alcanzan la mayores aceleraciones (en dirección x, y o z, respectivamente).

De esta manera, realizamos una envolvente de las aceleraciones X, Y o Z, obtenemos el nodo al que está asociada y analizamos su evolución en el tiempo, así como verificamos que se cumplan los condicionantes impuestos por la Propiedad en cuanto a niveles de confort.

Análisis previo. Constatación de la necesidad del TMD

Tanto del análisis modal como del análisis dinámico llegamos a la conclusión de que se muestra necesaria la colocación de un amortiguador que reduzca la aceleración inducida por la acción de los peatones. En el análisis transitorio se exigirá que el incremento de tiempo empleado para garantizar la eficacia del algoritmo de Newmark sea de acuerdo a lo visto en (Domínguez Barbero, 2001):

$$\Delta t = \min \left(\frac{1}{8f_{max}} ; \frac{L_{min}}{200*v_p} ; \frac{L_{min}}{4*n*v_p} ; 0.01 \right) \text{seg}$$

Con f_{max} la frecuencia máxima de estudio, v_p , la velocidad del peatón, L_{min} y n el número de modos de estudio. El paso escogido es de 0.01s.

Caso de Tráfico TC1-A

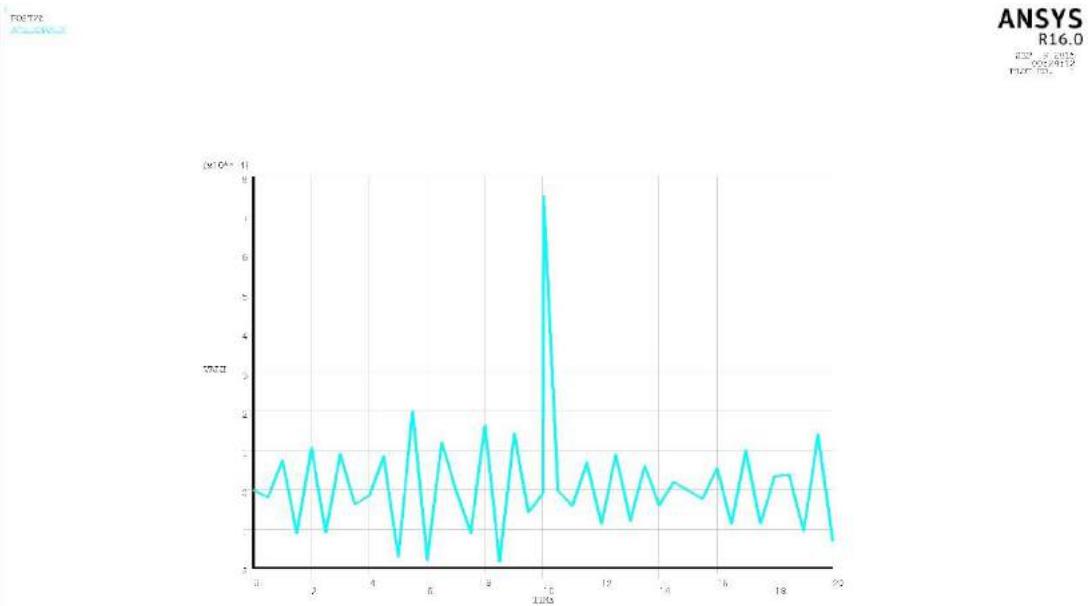
De acuerdo a lo previsto anteriormente, la carga dinámica de estudio es la inducida por una aglomeración de tráfico propia de lo que hemos considerado TC-1^a

Caso de Carga	Peatones/m2	Carga/m2
TC-1 ^a	0.02P/m2	1.4kN/m2

Según la envolvente realizada, los nodos de estudio (aquellos con la mayor aceleración en todo el lapso de tiempo de estudio del transitorio) son los siguientes:

Componente Aceleración	Número de nodo	Valor máximo de Aceleración (m/s ²)	Tiempo en el que se dio el máximo
Aceleración X	10949	7.51E-04	10.02
Aceleración Y	41384	1.15E-03	10.02
Aceleración Z	41310	2.65E-03	10.02

Aceleración X



Proyecto de Pasarela en Material Compuesto en Resina del Rio Almendral

Ilustración 147: Evolución de la aceleración (dirección X) frente al tiempo para el punto de mayor de Valor Máximo 7.51E-04

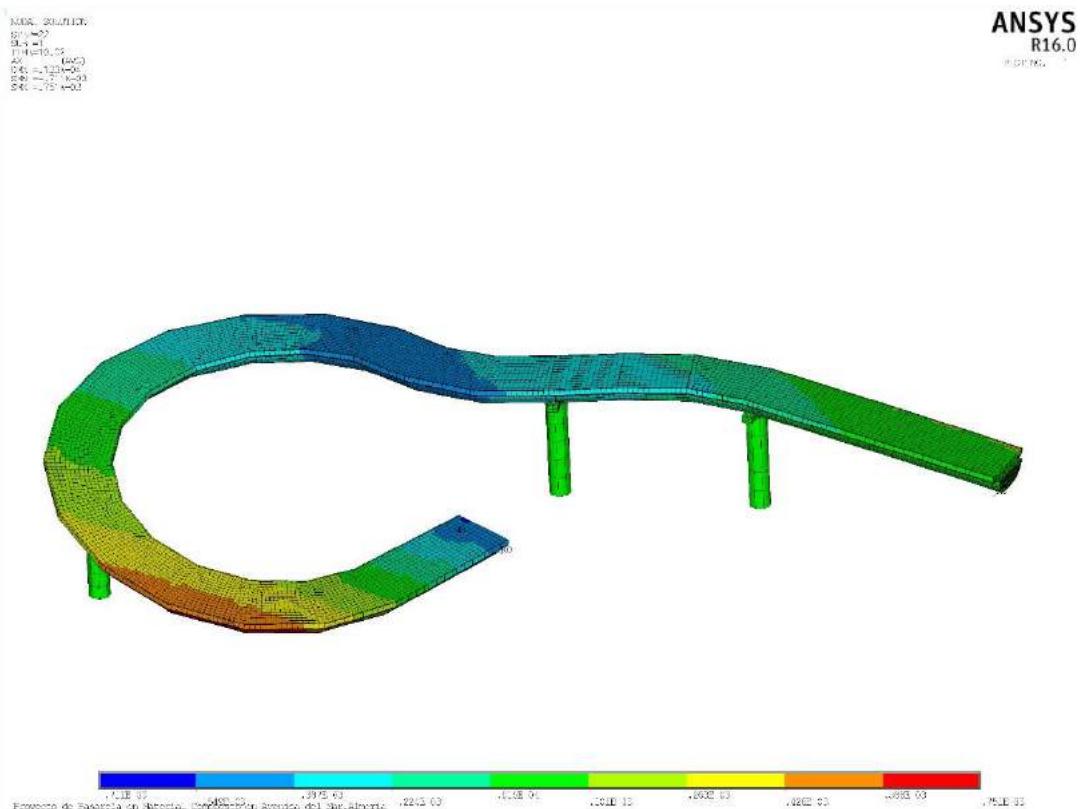


Ilustración 148: Mapa de aceleraciones (dirección X) para el caso de tráfico TC1-A. Valor Máximo

Aceleración

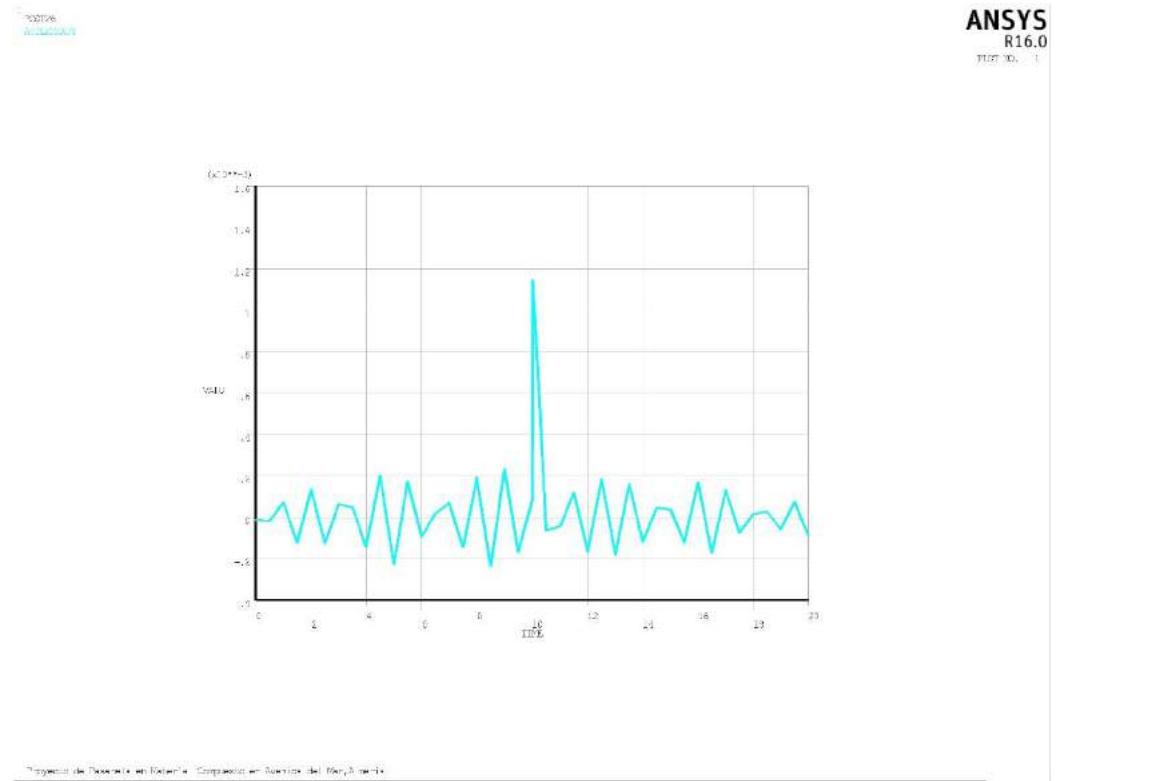


Ilustración 149: Evolución de la aceleración (dirección Y) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Y) para el caso de tráfico considerado (TC1-A) $1.15\text{E}-03\text{m/s}^2$

Aceleración Z

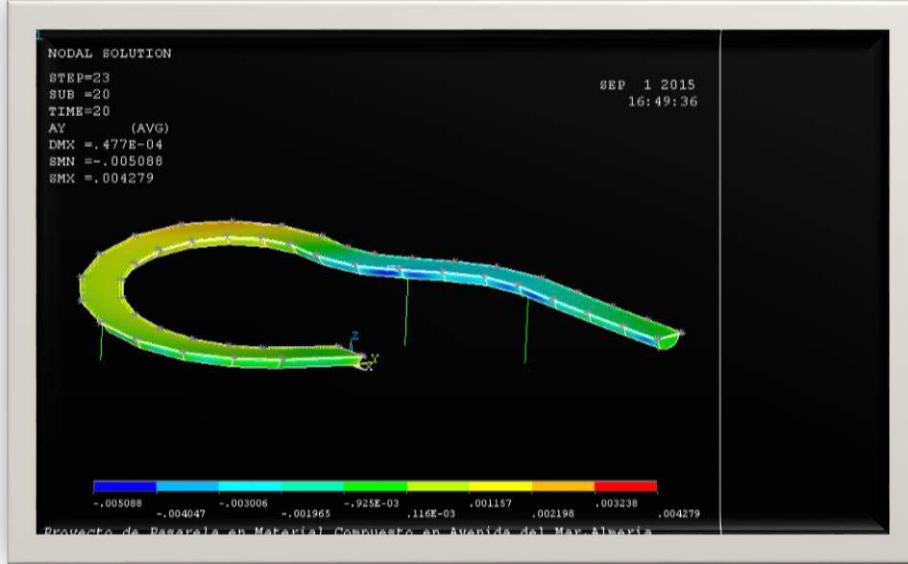


Ilustración 150: Evolución de la aceleración (dirección Z) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Z) para el caso de tráfico considerado (TC1-A) Valor máximo $2.65\text{E}-03$

Caso de Tráfico TC1-B

De acuerdo a lo previsto anteriormente, la carga dinámica de estudio es la inducida por una aglomeración de tráfico propia de lo que hemos considerado TC-1^a

Caso de Carga	Peatones/m2	Carga/m2
TC-1B	0.1P/m2	7kN/m2

Según la envolvente realizada, los nodos de estudio (aquellos con la mayor aceleración en todo el lapso de tiempo de estudio del transitorio) son los siguientes:

Componente Aceleración	Número de nodo	Valor máximo de Aceleración (m/s ²)	Tiempo en el que se dio el máximo
Aceleración X	10949	3.75E-03	10.02
Aceleración Y	41384	5.74E-03	10.02
Aceleración Z	41310	1.32E-02	10.02

Aceleración X

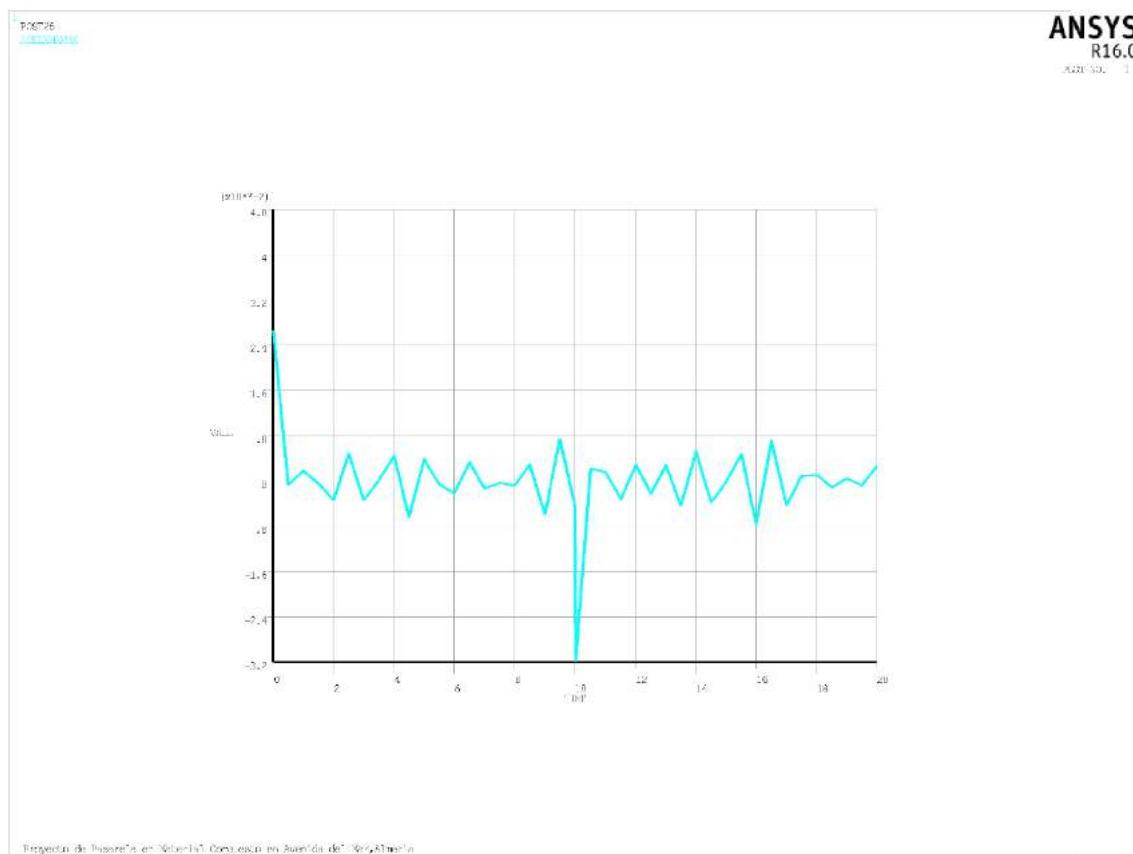


Ilustración 151: Evolución de la aceleración (dirección X) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección X) para el caso de tráfico considerado (TC1-B) Valor máximo 3.75E-03 m/s²

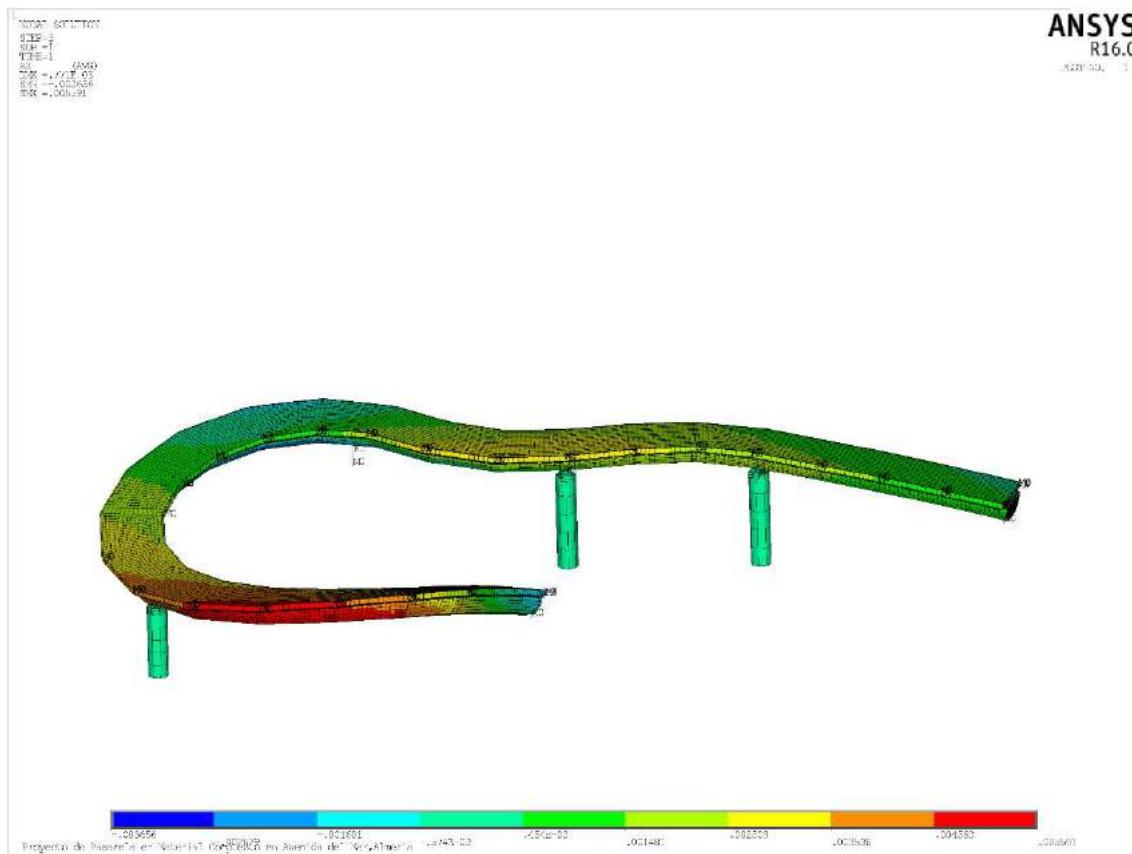


Ilustración 152: Mapa de aceleraciones (dirección X) para el caso de tráfico TC5. Tiempo=1seg

Aceleración Y

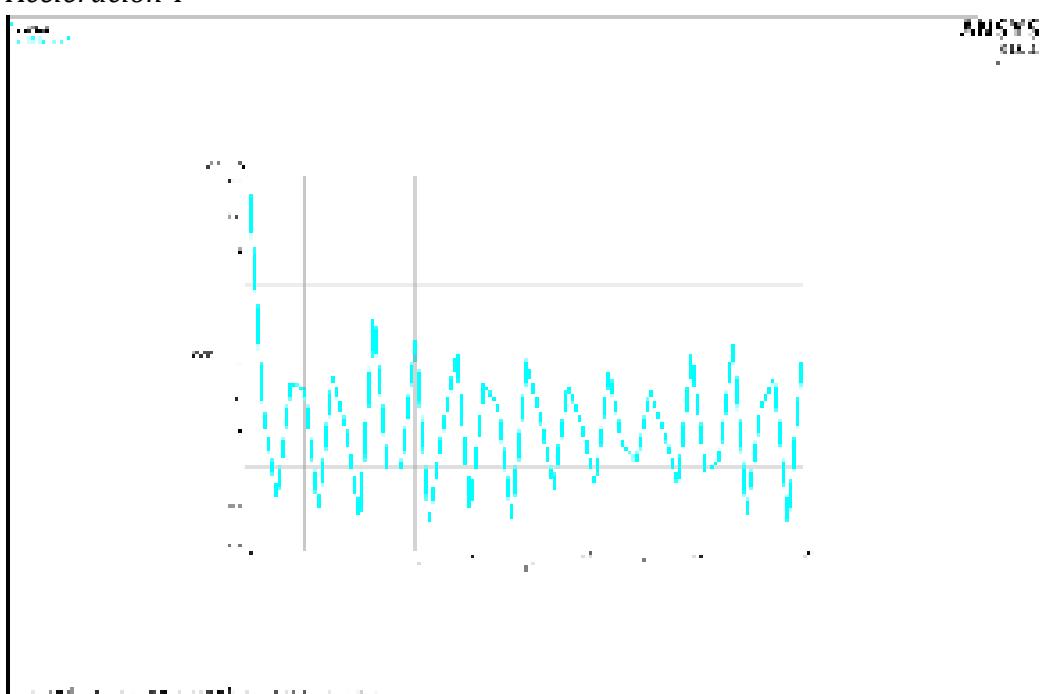


Ilustración 153: Evolución de la aceleración (dirección Y) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Y) para el caso de tráfico considerado (TC1-B) Valor máximo: 5.74E-03 m/s²

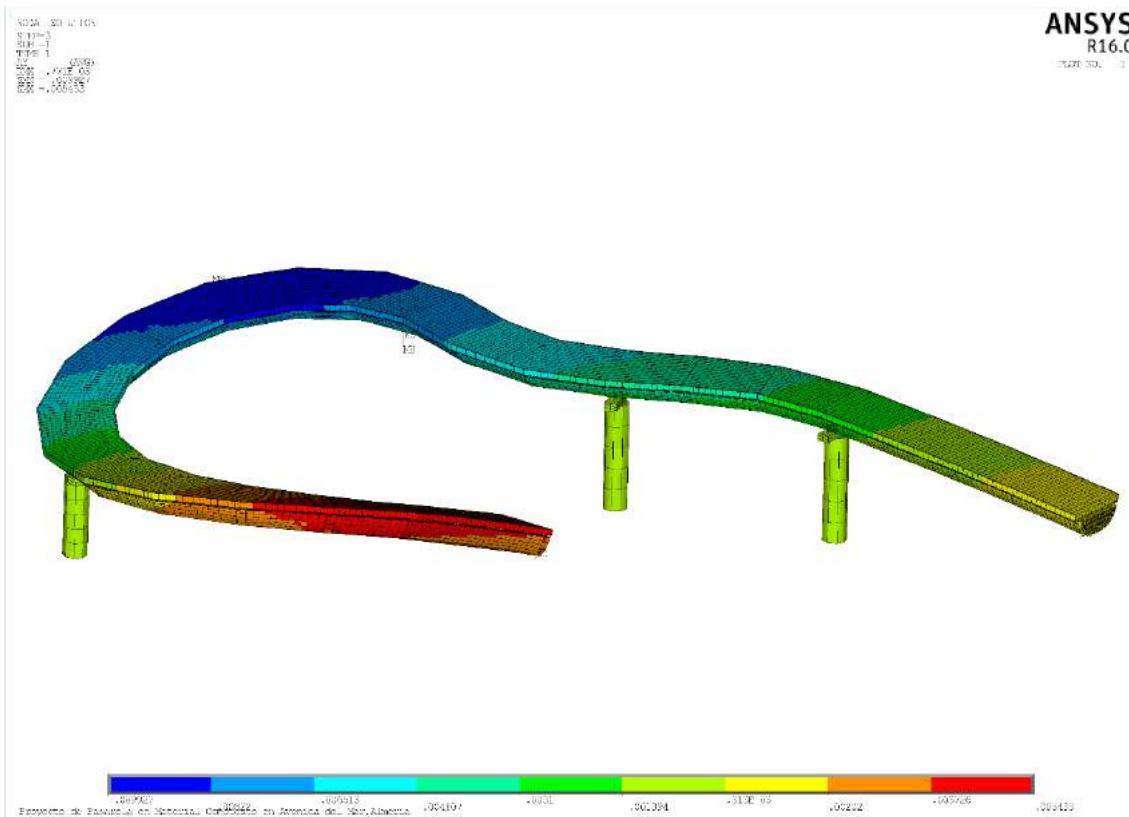
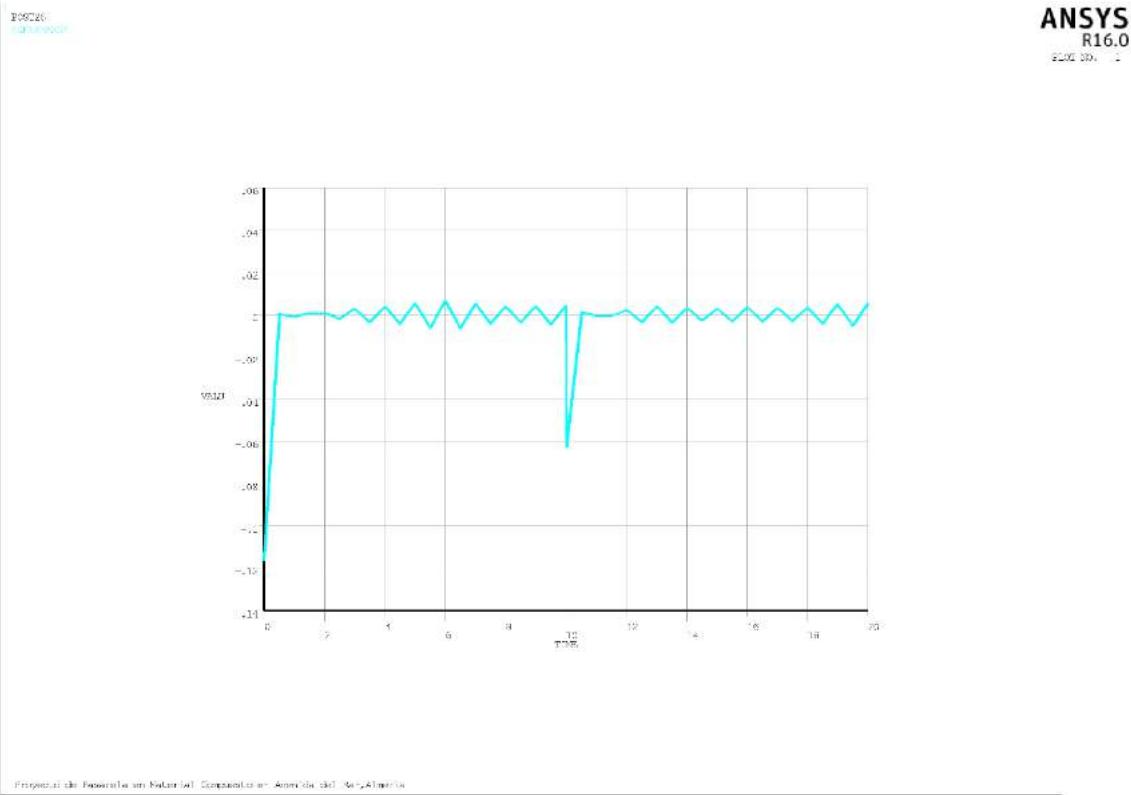


Ilustración 83: Mapa de aceleraciones (dirección Z) para 0.5 segs y tráfico TC5

Aceleración Z



Proyecto de Fomento en Material Compuesto en Aeronaves del Año Almería

Ilustración 84: Evolución de la aceleración (dirección Z) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Z) para el caso de tráfico considerado (TC1-B) Valor máximo 0.12

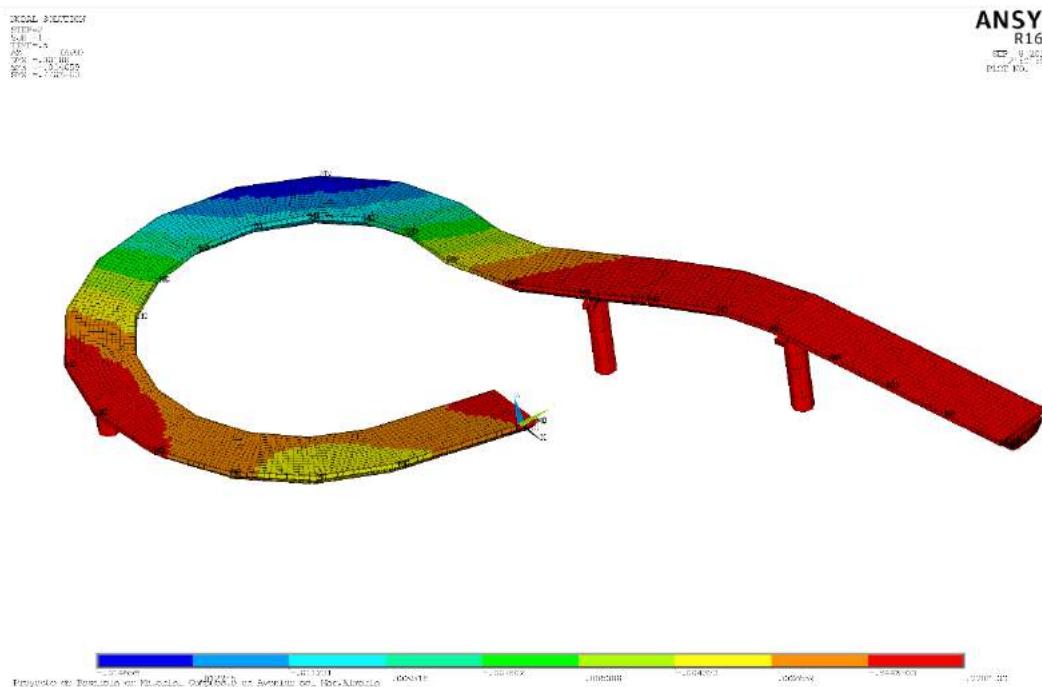


Ilustración 154: Mapa de aceleraciones a los 10.2 segundos en la dirección Z para la clase de tráfico TC1-B

Caso de Tráfico TC2 OK

De acuerdo a lo previsto anteriormente, la carga dinámica de estudio es la inducida por una aglomeración de tráfico propia de lo que hemos considerado TC-1^a

Caso de Carga	Peatones/m2	Carga/m2
TC-2	0.2 P/m2	14 kN/m2

Según la envolvente realizada, los nodos de estudio (aquellos con la mayor aceleración en todo el lapso de tiempo de estudio del transitorio) son los siguientes:

Componente Aceleración	Número de nodo	Valor máximo de Aceleración (m/s ²)	Tiempo en el que se dio el máximo
Aceleración X	10949	7.51E-03	10.02
Aceleración Y	41384	1.15E-02	10.02
Aceleración Z	41310	2.65E-02	10.02

Aceleración X

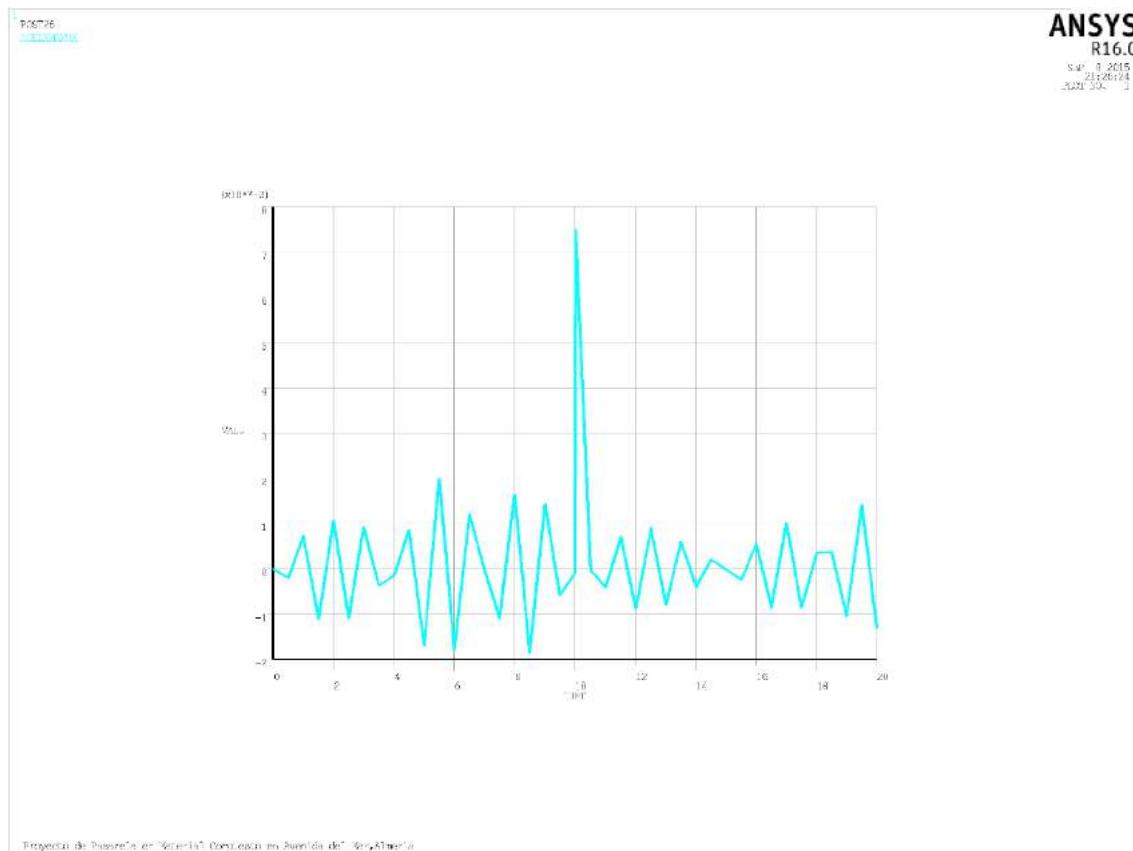


Ilustración 155: Evolución de la aceleración (dirección X) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección X) para el caso de tráfico considerado (TC2) Valor máximo 7.51E-03m/s²

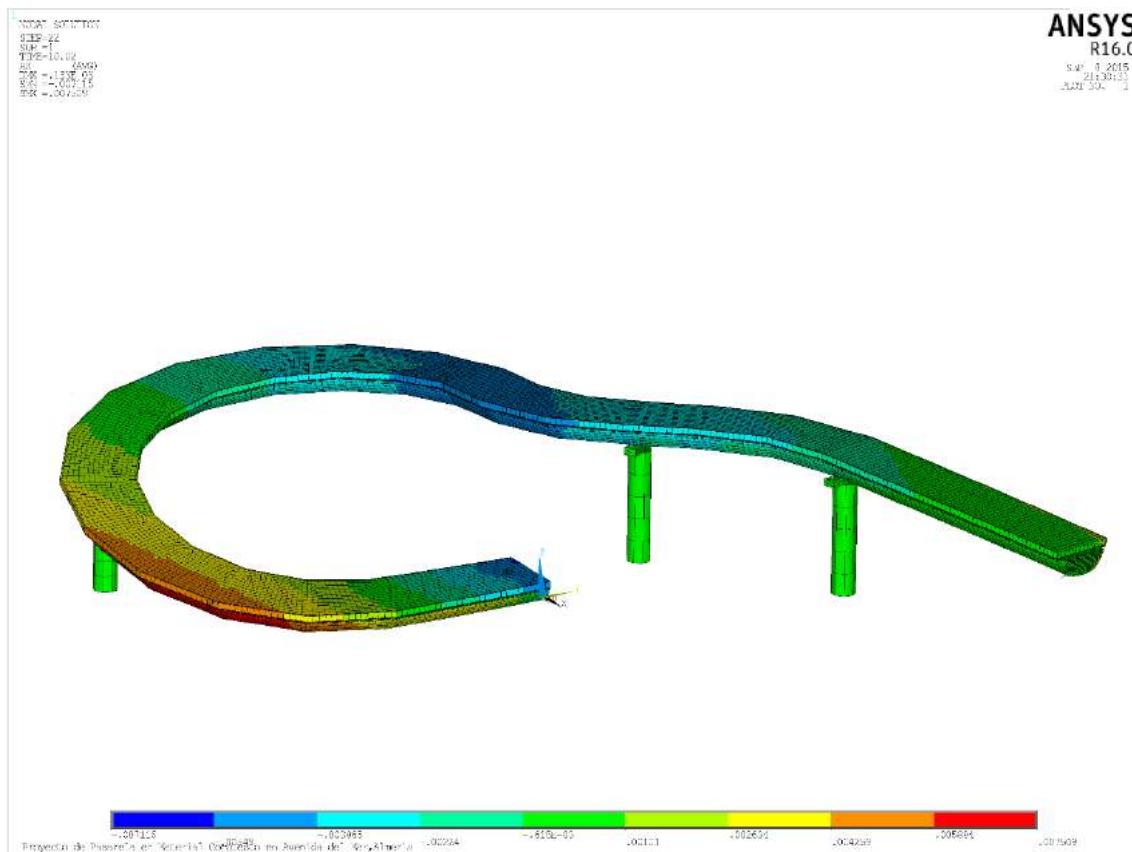
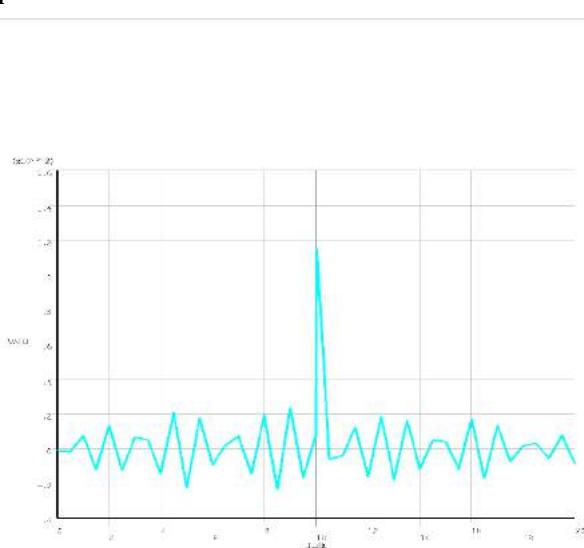


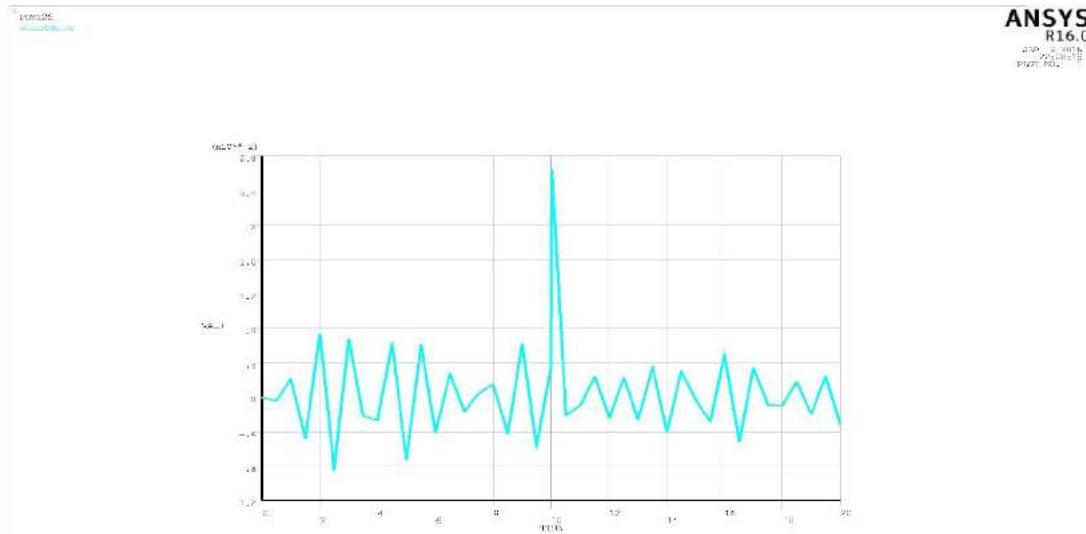
Ilustración 156: Mapa de aceleraciones (dirección X) para el caso de tráfico TC5. Tiempo=1seg

Aceleración Y



Proyecto de Puente en Mecánica - Organización en Investigación - Borrador

Ilustración 157: Evolución de la aceleración (dirección Y) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Y) para el caso de tráfico considerado (TC2) Valor máximo 1.15E-02



Proyecto en Finitos Elementos ANSYS R16.0. Versión 16.0.0. Número de Marca: 10.

Ilustración 158: Evolución de la aceleración (dirección Z) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Z) para el caso de tráfico considerado (TC2) Valor máximo 2.65E-02m/s²

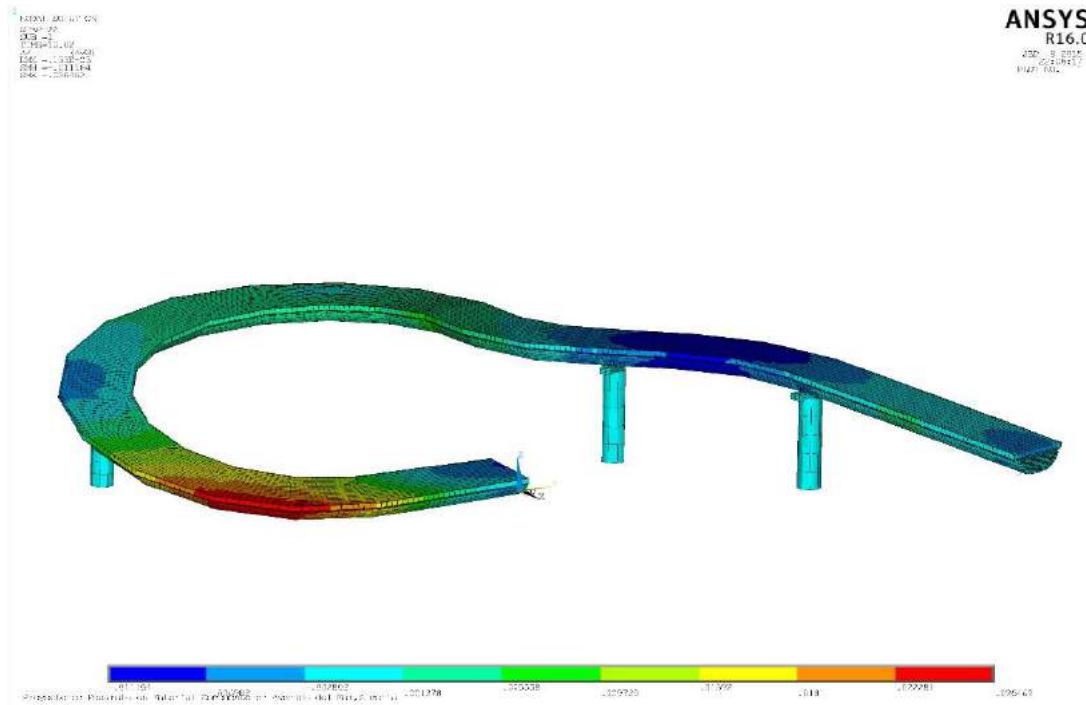


Ilustración 88: Mapa de aceleraciones (dirección Z) para 10.02 segs y tráfico TC2

Caso de Tráfico TC5

De acuerdo a lo previsto anteriormente, la carga dinámica de estudio es la inducida por una aglomeración de tráfico propia de lo que hemos considerado TC-1^a

Caso de Carga	Peatones/m2	Carga/m2
TC-5	1.5P/m2	105kN/m2

Según la envolvente realizada, los nodos de estudio (aquellos con la mayor aceleración en todo el lapso de tiempo de estudio del transitorio) son los siguientes:

Componente Aceleración	Número de nodo	Valor máximo de Aceleración (m/s ²)	Tiempo en el que se dio el máximo
Aceleración X	23725	2.66E-02	1.0E-06
Aceleración Y	23945	2.64E-02	1.0E-06
Aceleración Z	41310	1.32E-01	1.0E-06

Aceleración X

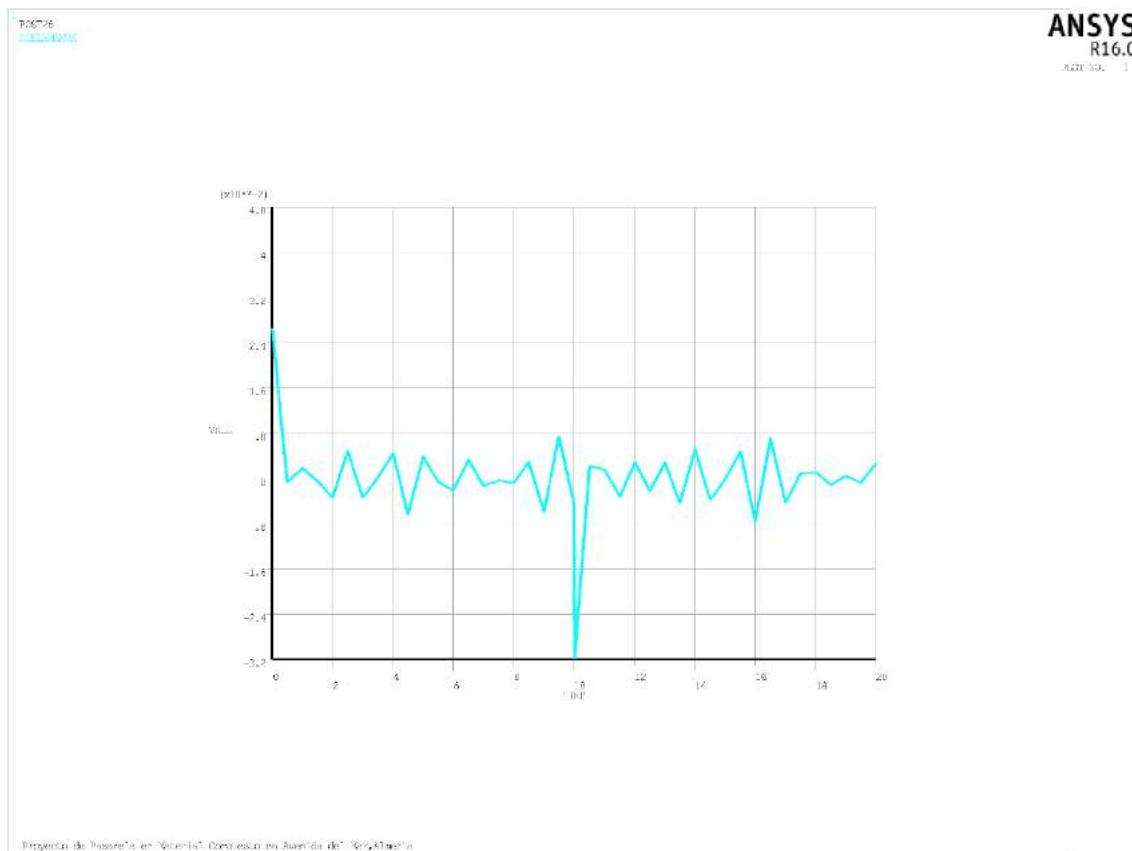


Ilustración 159: Evolución de la aceleración (dirección X) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección X) para el caso de tráfico considerado (TC5) Valor máximo 2.66E-02m/s²

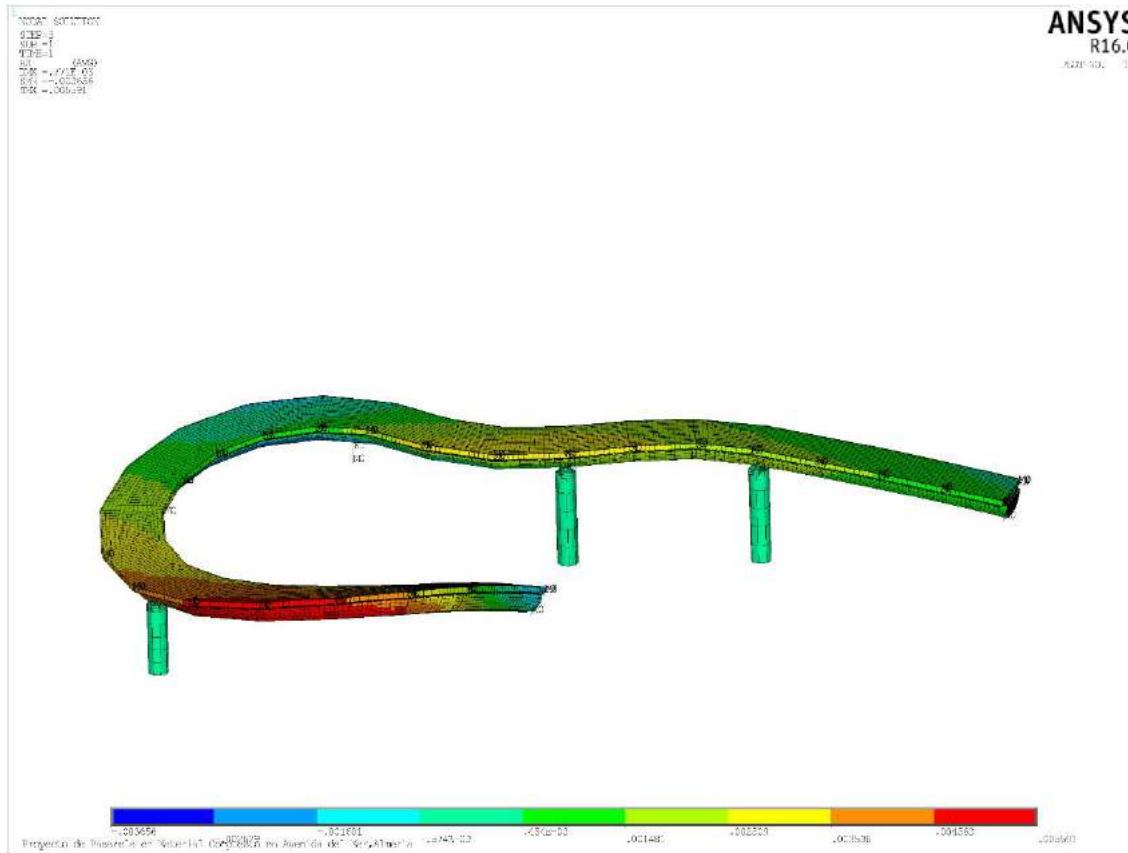
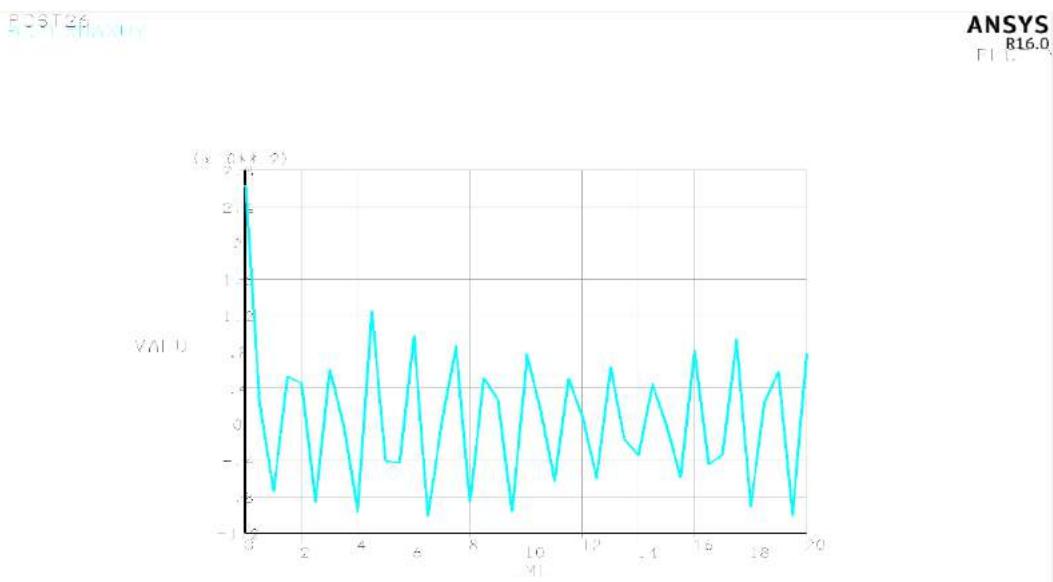


Ilustración 160: Mapa de aceleraciones (dirección X) para el caso de tráfico TC5. Tiempo=1seg

Aceleración Y



Proyecto de Pasarela en Material Compuesto en Avenida del Mar, Almería

Ilustración 161: Evolución de la aceleración (dirección Y) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Y) para el caso de tráfico considerado (TC5) Valor máximo 2.64E-02 m/s²

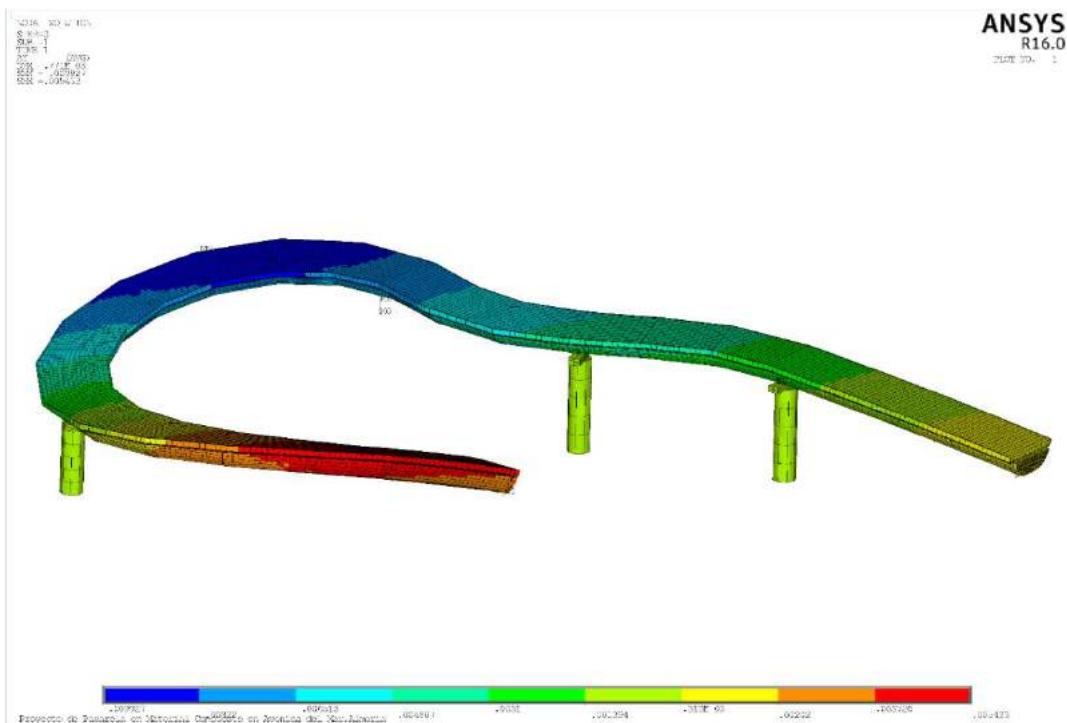


Ilustración 83: Mapa de aceleraciones (dirección Y) para 0.5 seas v tráfico TC5

Aceleración Z

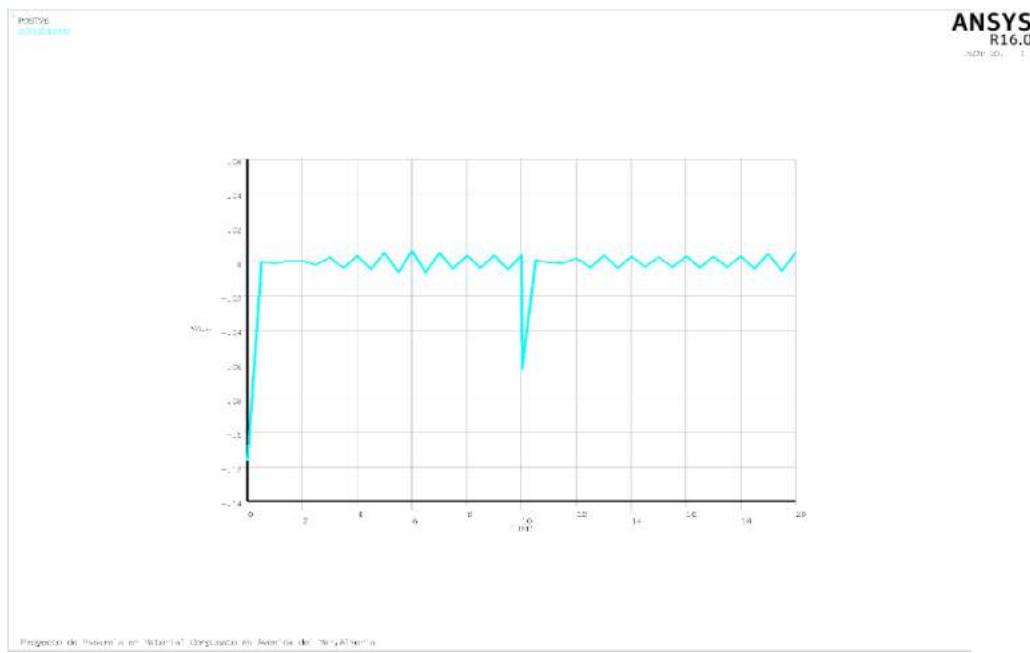


Ilustración 162: Evolución de la aceleración (dirección Z) frente al tiempo para el punto de mayor aceleración (dirección Z) para el caso de tráfico considerado (TC5) Valor máximo 1.32E-01 m/s²

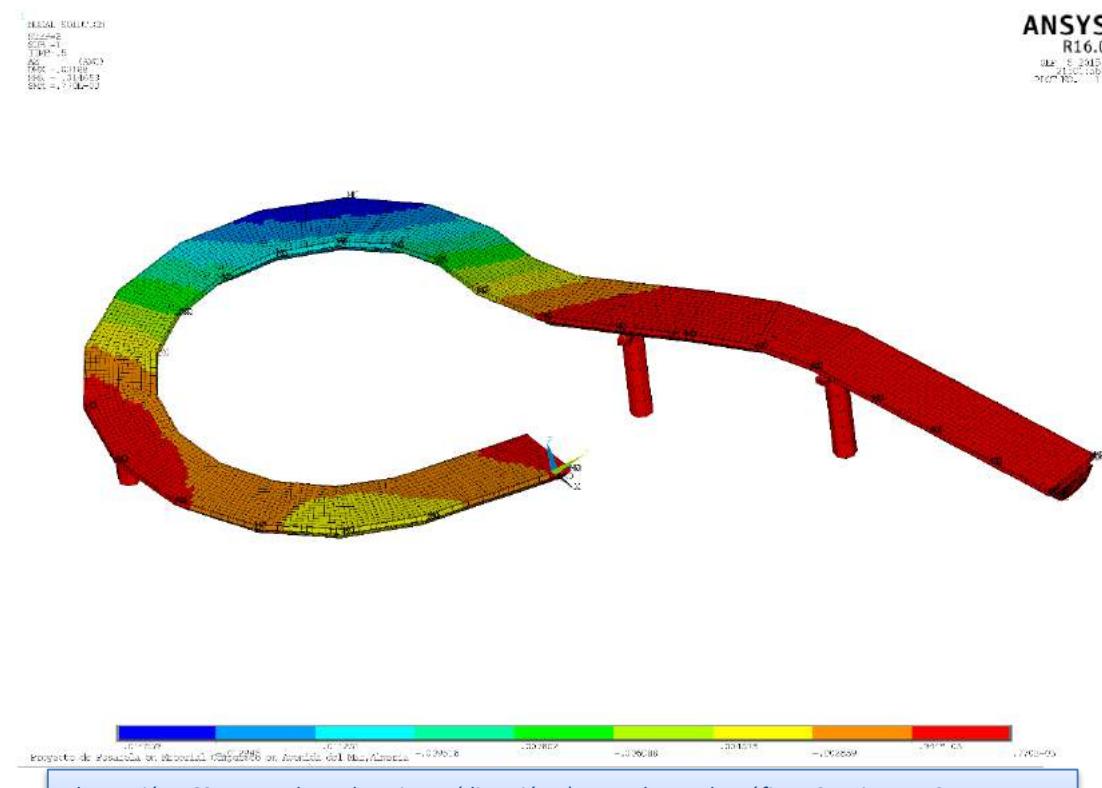


Ilustración 163: Mapa de aceleraciones (dirección Z) para el caso de tráfico TC5. Tiempo=0.5seg

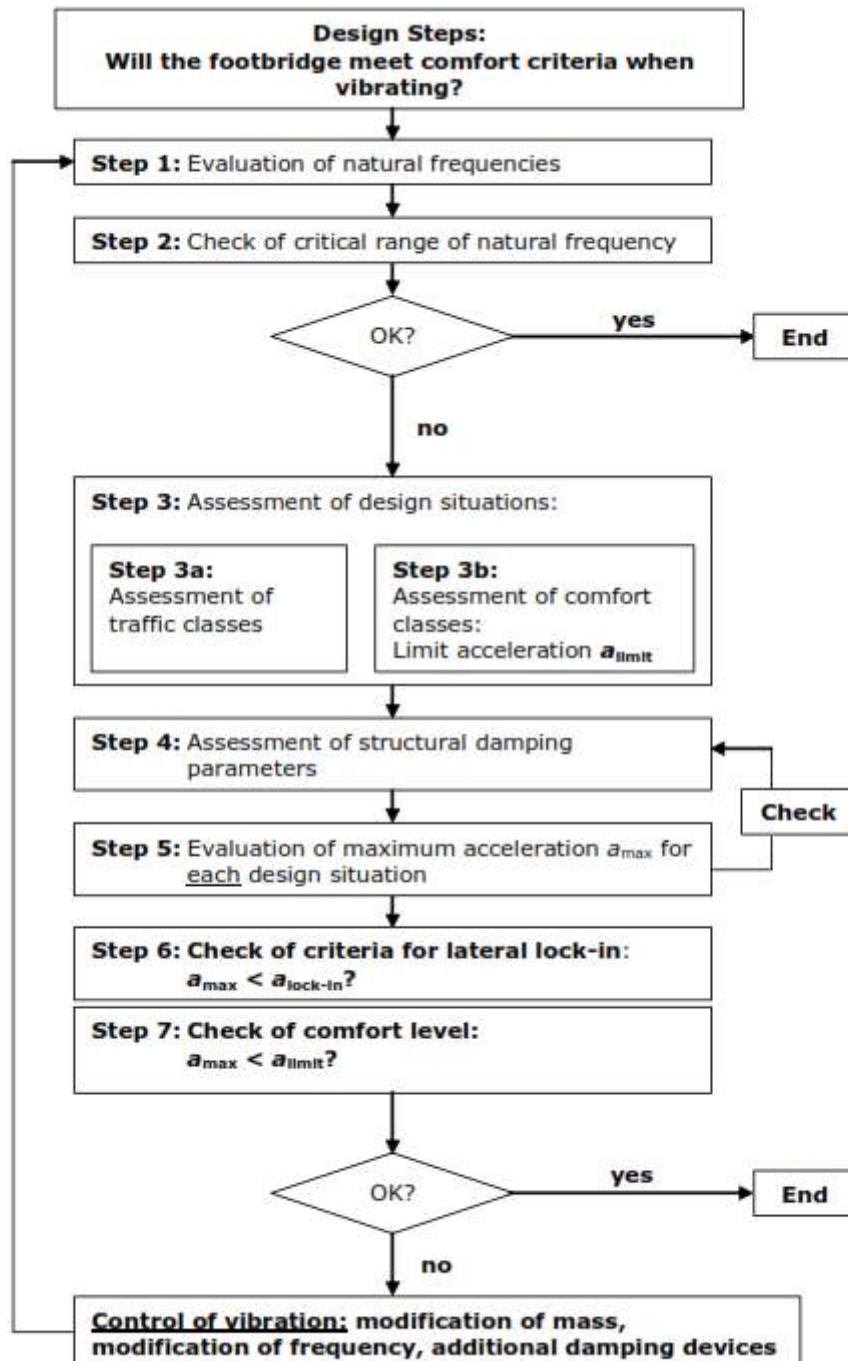


Figure 3-2: Flowchart for the use of this guideline

Ilustración 164: Diagrama de flujo de estudios dinámico

Pruebas de carga

Introducción

En este apartado se explicita el valor de la flecha previsto para la prueba de carga de la pasarela. Para la misma se establecerá una carga que sea el 60% del valor característico de la sobrecarga de uso, previsto en la IAP-11 como $\frac{5kN}{m^2}$



Ilustración 165: Botellas de agua y piscinas infantiles llenas de agua como prueba de carga en pasarelas peatonales.

Prueba de carga estática

La flecha prevista para la prueba de carga ha sido calculada y su valor será el que se muestra en la siguiente tabla

Tipo de Prueba de Carga	Flecha Prevista
Estática	0.0293 m

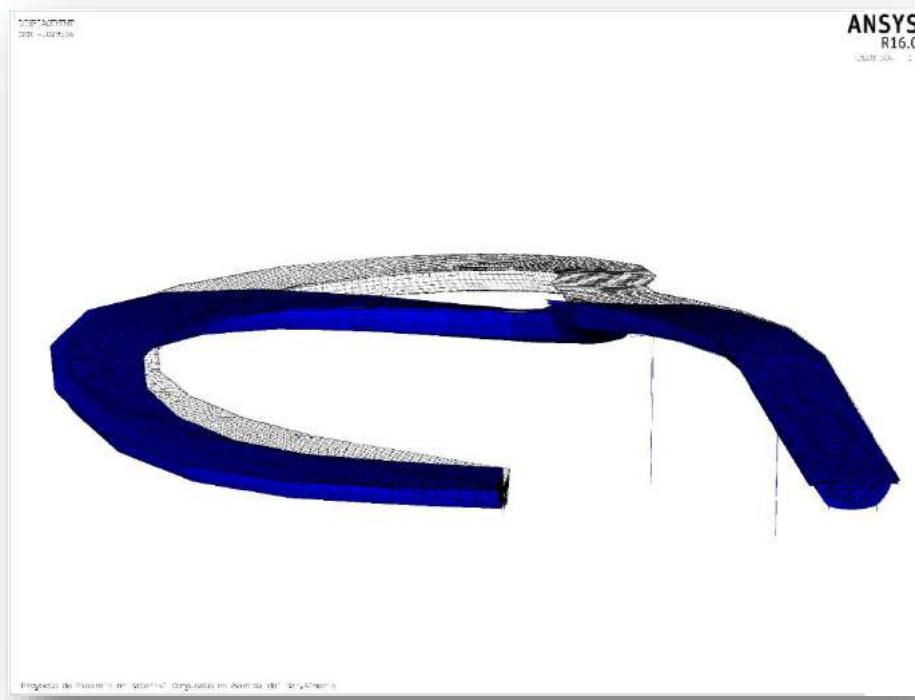


Ilustración 166 Deformada ante la prueba de carga

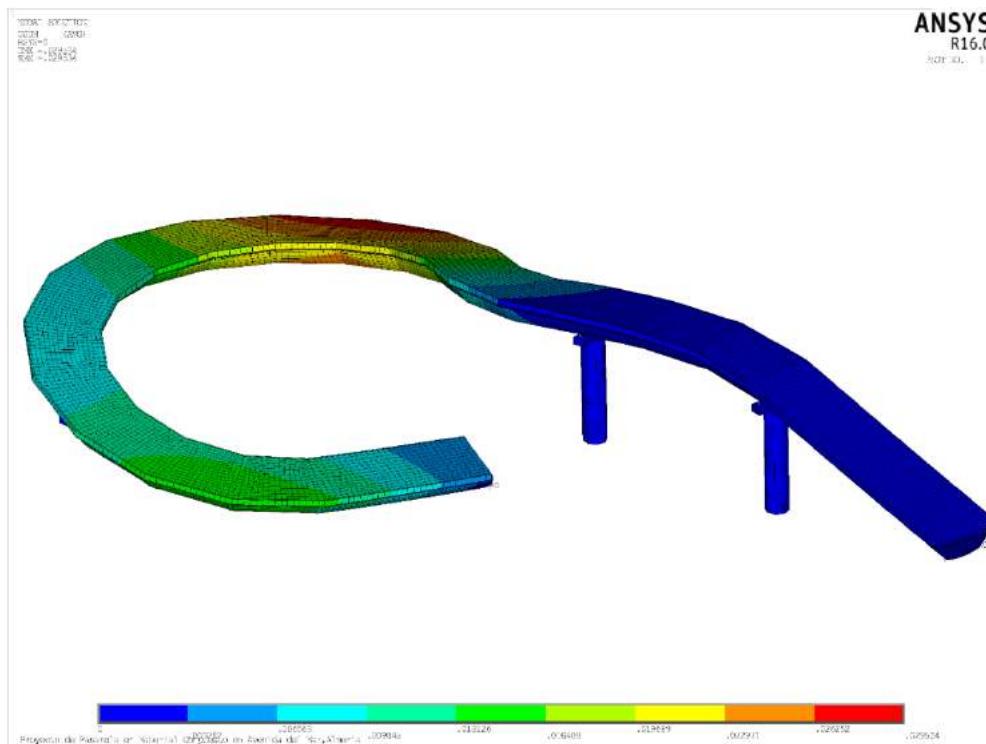


Ilustración 167: Mapa de colores de la deformada en Prueba de carga

Prueba de carga dinámica

La prueba de carga será realizada por un equipo asociado a un grupo de trabajo universitario de experiencia dilatada en el sector que verificará el cumplimiento de los grados de confort perseguidos y de los valores de la aceleración percibida por los peatones aquí calculados así como de las frecuencias naturales, modos de vibración y coeficientes de amortiguamiento aquí anticipados de acuerdo a lo previsto en (Heinemeyer, et al., 2009)

Conclusiones

Del proyecto realizado se pueden obtener una serie de conclusiones tanto de uso práctico como teórico que pasamos a exponer:

- Los materiales compuestos se perfilan para su empleo en Ingeniería Civil en obra nueva como materiales dotados de unas excelentes capacidades específicas (por unidad de masa) con lo cual aportan una mayor ligereza a las estructuras y, con ello a las subestructuras asociadas.
- Su empleo en rehabilitación y reparación viene siendo de amplia aceptación actualmente en Ingeniería estructural y de Puentes
- El alto precio del compuesto hace que requiera un estudio previo de las necesidades de proyecto, en el cual se atisbe como opción plausible la reducción drástica de peso.
- Las tres principales características de los compuestos son resistencia, buenas capacidades específicas y buenas condiciones de durabilidad. Su empleo está ampliamente recomendado en zonas marítimas o cercanas a la costa. Es la razón por la que su uso está sufriendo un fuerte repunte en zonas como los Países Bajos
- Las capacidades estéticas de los compuestos debido a su facilidad de moldeo hace que sean idóneos para formas más óptimas estructuralmente hablando así como de bella factura arquitectónica. Sus posibilidades tienen mucho potencial a día de hoy. Ello, unido a unos costes de producción cada vez más reducido harán posible una mayor experimentación en el campo
- La viga curva, como la que se plantea en el proyecto, presenta unas importantes torsiones debido a las solicitudes perpendiculares a la misma. En una pasarela, en la que el peso propio puede ser una de las opciones más reseñables, reducir el mismo es siempre un fin en sí mismo. En casos en los que este además induzca un fuerte torsor este objetivo se convierte en prioritario.
- Si bien es cierto que la falta de códigos y normativas a nivel internacional se está consiguiendo suplir poco a poco son necesarios todavía grandes esfuerzos tanto a nivel nacional como internacional para potenciar el empleo de estos materiales en construcción. En este sentido, una revisión con carácter normativo de (Clarke, 1996) se antoja necesaria.

Desarrollos futuros

- La necesidad de realizar comparativas más precisas para los distintos criterios de rotura para estados de carga triaxiales y más extrapolables a formas más complejas propias de formas empleadas en Ingeniería Civil.
- La necesidad de comprobar los criterios de optimización de laminados presentes en el programa ABAQUS, estudiar cuál es el procedimiento seguido y adaptarlos al programa ANSYS.
- La necesidad de implementar comprobaciones locales de inestabilidad asociadas a los núcleos de las estructuras sándwich.
- La posibilidad y capacidad de modelos de fallo progresivo en ingeniería civil en contraste con los modelos empleados de fallo a primer-ply.
- La necesidad de emplear la suite de compuestos Autodesk Helius de manera más completa y en especial el uso de su integración con ANSYS en estudios de Análisis de Fallos Progresivos (PFA)
- La necesidad de profundizar en los diseños de las uniones remachadas previstas para la estructura calculada, considerándose elementos finitos para su cálculo, dado que las consideraciones previstas en (Clarke, 1996) pueden mostrarse inaproximadas y/o extremadamente conservadores para nuestro caso en concreto, ampliamente tridimensional.

Bibliografía

- Mahmouda, M. K., 2007. *Fracture toughness of single-edge notched fiber reinforced composite*. [En línea]
- Available at:
http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositematerials/I_fatigue.pdf
[Último acceso: 10 mayo 2015].
- ANSYS Inc., 2014. Chapter 13: Composites. En: *Ansys Mechanical APDL Structural Analysis Guide Release 15.0*. s.l.:Ansys Inc..
- Ayuntamiento de Málaga, 2011. *Guía para la utilización de pavimentos en espacios públicos*. Málaga, Ayuntamiento de Málaga.
- Bank, L. C., 2006. *Composites For Construction-Structural Design with FRP*. New Jersey: Wiley.
- Barbero Pozuelo, E., García Castillo, S. K. & Sánchez Sáez, S., 2010. Introducción a los materiales compuestos. En: *Mecánica de Materiales Compuestos*. Madrid: UC3.
- Barbero, E. J., 2008. *Finite element analysis of composite materials*. West Virginia: CRC Press.
- Bhatt, P., McGuinley, T. J. & Choo, B. S., 2006. *Reinforced Concrete: Design Theory and Examples*. Londres: Taylor and Francis.
- Blanco Alvárez, F., s.f. Deformación elástica de los compuestos de fibra larga y de los laminados . En: *Materiales poliméricos y compuestos*. Oviedo : Universidad de Oviedo.
- Bonet, G., Bottero, C. & Fontana, M., 2011. Clase 3. Elasticidad anisótropa. En: *Estructuras de Materiales Compuestos*. Río de la Plata: Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería U.N.L.P.
- Center Landherr , J., 2008. *Dynamic analysis of a FRP deployable box beam*. Kingston: Queen's University.
- CFS, s.f. *CFSnet*. [En línea]
Available at: http://www.cfsnet.co.uk/acatalog/gelcoat_repairs.html
[Último acceso: 21 marzo 2015].
- Chandra, R., Singh, S. & Gupta, K., 1999. *Damping studies in fiber-reinforced composites- review*. Nueva Dehli: Indian Institute of Technology.

Clarke, J. L., 1996. *Structural Design of Polymer Composites-Eurocomp Design Code and Handbook*. Londres: E&FN SPON.

Composán, 2010. *Juntas para puentes*. Madrid: Composán .

Composan, 2011. *Manual de pavimentos continuos*. s.l.:Composan.

Consejería para la Igualdad y el Bienestar Social, 2012. *Documento técnico sobre el decreto andaluz de accesibilidad*. Sevilla: Consejería para la Igualdad y el Bienestar Social. Junta de Andalucía.

ConstruAprende, 2010. *ConstruAprende*. [En línea]

Available at: <http://www.construaprende.com/foros/exportar-puntos-de-autocad-a-excel-vt9594.html>

[Último acceso: 23 febrero 2015].

Degrieck, J. & Van Paegem, W., 2001. Fatigue damage modelling of fibre-reinforced composite materials: review. *Applied Mechanics Review*, pp. 279-300.

Domínguez Abascal, J., 2003. *Apuntes de Teoría de Estructuras*. Sevilla: Publicaciones Universidad de Sevilla.

Domínguez Barbero, J., 2001. *Dinámico de puentes de ferrocarril para alta velocidad: métodos de cálculo y estudio de la resonancia*. Madrid: UPM.

Federal Aviation Administration, s.f. Chapter 7: Advanced Composite Materials. En: *Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe Volume I*. s.l.:Federal Aviation Administration.

Friberg, E. & Olsson, J., 2014. *Application of fibre reinforced polymer materials in road bridges-general requirements and desing consideration*. Göteborg: CHALMERS.

Fuqiang , W. & WeiXing , Y., 2009. A fatigue damage model of composite materials. *International Journal of Fatigue*, pp. 134-138.

Gazechim Ibérica S.L, s.f. *Gazechim Ibérica*. [En línea]

Available at: <http://www.gazechim.es/>

[Último acceso: 27 marzo 2015].

Gómez Pulido, M. D., 2011. *Análisis estructural de estructuras a base de materiales compuestos*. Madrid: Curso de Estructuras FRP en Construcción.

Gurit , 2015. *Gurit Products Catalogue*. s.l.:Gurit.

Heinemeyer, C., Butz, , C., Andreas , K. & Schlaich, M., 2009. *Design of lightweight footbridges for human induced vibrations*. Aachen: JRC European Commision.

- HexCell, 2010. *HexForce Technical Fabrics Handbook*. Texas: HexCell.
- HexCel, s.f. *HexForce and HexPly selector's guide*. s.l.:s.n.
- HexCel, s.f. *HexPly Curing Epoxy M34 75ºC Curing Data*. s.l.:s.n.
- Instituto de Ciencias de Construcción Eduardo Torroja e Instituto de la Construcción de Castilla y León, s.f. *Código Técnico Web*. [En línea]
Available at: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=7>
[Último acceso: 8 mayo 2015].
- IPV Delft, 2015. *Brief dutch design manual for bicycle and pedestrian bridge*. Delft: IPV Delft.
- Jiménez Alonso, J. F., s.f. *Revisión y análisis normativo de los problemas vibratorios inducidos*. Sevilla: US.
- Jiménez Alonso, J. F. & Sáez Pérez, A., 2015. *Estimating robust optimum parameters of tuned mass dampers using multiobjective*. Sevilla, CMMoST.
- Kasapoglou, C., 2010. *Design and Analysis of Composite Structures*. s.l.:John Wiley and Sons.
- Kendall, D., 2014. FIBRE REINFORCED POLYMER FOOTBRIDGES SPANNING 300m.
Footbridge 2014 5th International conference footbridges: past, present & future.
- Kendall, D., 2014. Next Generation Footbridges in FRP Composites. *5th International Conference Footbridges: Past, present and future*.
- Kollár, L. P. & Springer, G. S., 2003. *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Laffarga Osteret, j. & Olivares Santiago, M., 1995. *Los Materiales Composites y su aplicación en la ejecución de obras arquitectónicas*. Sevilla, AEMAC.
- Madenci, E. & Guven, I., 2006. *The Finite Element Method and Applications in Engineering using ANSYS*. Arizona: Springer.
- Mandall, J. F., Samborsky, D. D. & Cairns, D. S., 2002. *Fatigue of composite materials and substructures for turbine blades*. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
- Manterola Armisén, J., 2006. Capítulo 12: Puentes rectos y curvos sobre apoyos puntuales. En: *Puentes: apuntes para su diseño, cálculo y construcción*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Colección Escuelas, pp. 563-583.

- Manterola Armisén, J., 2006. Capítulo 8: El tablero curvo. En: *Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección Escuelas , pp. 411-445.
- Margalef De Zabalo, R., 2008. *Análisis de la respuesta estructural de pasarelas curvas colgadas excéntricamente*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Marin, J., Barroso, A., Paris, F. & Cañas, J., s.f. Fatigue failure in wind turbines. En: *Wiley encyclopedia of energy* . s.l.:s.n.
- Maurer Söhne, 2011. *Tuned Mass and Viscous Dampers*. Múnich: Maurer Söhne.
- Ministerio de Fomento-Dirección General de Carreteras, 2011. *IAP-11. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. Series Normativas ed. Madrid: Dirección General de Carretera.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1982. *Recomendaciones para el proyecto y puesta en obra de los apoyos elastoméricos para puentes de carretera*. Madrid: MOPU.
- MK4, 2015. *Elastomeric bearings*. Barcelona: MK4.
- Monleón Cremades, S., 2003. *Cuadernos de modelización de análisis de puentes: Modelo emparrillado, modelos laminares y sistemas complejos. Volumen II*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Oñate, E., 2011. *Análisis con MEF de compuestos*. Barcelona: CIMMNE.
- París Carballo, F., 2001. *A study of failure criteria of fibrous composite*. Hampton: NASA.
- París, F., 2000. *Teoría de la elasticidad*. Sevilla: GERM.
- París, F., Cañas, J., Marín, J. & Barroso, A., 2012. *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Sevilla.
- Philippe, M., 1995. *Los Materiales compuestos en la construcción: estado del arte*. Sevilla , AEMAC .
- Pilkey, W., 2008. *Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices*. s.l.:John Wiley &
- Potyrala, P. B., 2011. *Use of Fibre Reinforced Polymer Composite in Bridge Construction. State of the Art of hybrid and all composite structures*. Barcelona: UPC.
- Poveda Martínez, S., s.f. *Representación Normalizada de Materiales Compuestos*. Madrid: Visual Graphic Group .

Primi, S. & Paulotto, C., 2011. *Ejemplos de aplicaciones de materiales compuestos en infraestructuras en España*. Grupo Acciona. Madrid, Curso Estructuras FRP en Construcción.

Quiminet, 2006. *Quiminet.com*. [En línea]
Available at: <http://www.quiminet.com/articulos/que-es-un-gelcoat-15004.htm>
[Último acceso: 21 marzo 2015].

Rodríguez Danta, M. & Bellver Cebreros, C., 2010. *Mecánica*. Coleccionista ed. Sevilla: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

Roohollah , S., Vassilopoulos, A. P. & Keller, T., 2012. A hybrid S–N formulation for fatigue life modeling of composite materials. *Composites. Part A*.

Salete Casino, E., 2007. *Interpretación de modelos de cálculo estructural en términos de transformaciones geométricas: aplicación al diseño de diques hidráulicos*. Madrid: UPM.

Smits, J., 2014. *Architectural Engineering of FRP Bridges*. Delft: Delft University.

Tecnyconta, 2015. *Catálogo de Elementos Prefabricados*. Zaragoza: Tecnyconta.

Titoum, M., Tehami, M., Achour, B. & Jean-Pierre Jaspart. ., 2008. Analysis of Semi-Continuous Composite Beams with Partial Shear Connection Using 2-D Finite Element Approach. *Asian Journal of Applied Sciences*, Volumen 1, pp. 185-205.

Vallecillos Portillo, A. M., 2015. *Desarrollo de un modelo constitutivo tridimensional de daño anisótropo para materiales compuestos basado en el criterio de Puck: formulación teórica e implementación numérica*. Sevilla: Publicaciones ETSI.

van Ijselmuiden, K., 2014. A Study of the Aurora Bridge with a FRP-deck instead of concrete. *37th Madrid IABSE Symposium 2014*.

Vassilopoulos, A. P., 2010. Fatigue life prediction of composite materials under realistic loading conditions (variable amplitude loading). En: *Fatigue Life Prediction Prediction of composites and composites structures*. Lausanne: CRC, pp. 293-329.

Wikipedia, s.f. *Wikipedia*. [En línea]
Available at: http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n_de_calor
[Último acceso: 8 mayo 2015].

Wood, R., 1978. *"The Reinforcement of Slabs in Accordance with a Pre-Determined Field of Moments*. Nueva York: ACI.

Younes, R., Halla, A., Fardoun, F. & Chehade, . F. H., 2012. *Comparative Review Study on Elastic Properties*. Versailles: INTECH.

Zoghi, M., 2011. *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering.*
s.l.:CRC.

