Universidad Politécnica de Madrid

POLITÉCNICA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos

De Julio César a los materiales compuestos. El Ciclo de Vida como
elemento de decisión en la búsqueda de materiales y métodos
constructivos más sostenibles en construcción de cajones.

Tesis Doctoral

Eduardo Cejuela Antero

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

2020

Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente

E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

De Julio César a los materiales compuestos. El Ciclo de Vida como elemento de decisión en la búsqueda de materiales y métodos constructivos más sostenibles en construcción de cajones.

Autor: Eduardo Cejuela Antero

Director: Vicente Negro Valdecantos.

Catedrático de Tecnologías del Medio Ambiente.

2020

AGRADECIMIENTOS

“No te rindas que la vida es eso, continuar el viaje, perseguir tus sueños, destrabar el tiempo, correr los escombros y destapar el cielo.” Mario Benedetti

Es difícil escribir estos agradecimientos sin olvidar a nadie, ya que el camino hasta llegar a este documento ha sido largo y tortuoso. Muchas personas han contribuido de manera directa o indirecta a aportar ideas y soluciones a los problemas o indefiniciones que iban surgiendo. Así que vaya por delante un enorme GRACIAS a todos ellos.

Pero en primer lugar quiero agradecer a mi familia, sobre todo a mi mujer, Carmen, y mis hijos, Jimena, Ignacio y Jaime, que han soportado estoicamente todo este tiempo, y a los que este doctorado les ha “robado” muchas horas.

También quiero agradecer a Vicente Negro, además de por toda su sabiduría, por lo más importante, su contagiosa y renovable, diría casi inagotable, energía positiva; me has dado esos chispazos para recargar pilas cuando más necesarios eran.

Gracias también a mis aitas, Inmaculada y Javier, por dejarme la mejor herencia posible, mi formación, que me acompañará siempre y hasta el último suspiro. Lejos quedan ya aquellos tiempos del internado en San Juan de Luz, el Colegio Mayor en Santander ... ahora ya con perspectiva entiendo mucho mejor el esfuerzo que tuvieron que hacer para que culminase mis estudios.

Un recuerdo especial a la memoria de mi hermana Marta, que, aunque no está en cuerpo, estará siempre en alma; como dicen en África, nuestros ancestros viven para siempre en nosotros, y ha estado conmigo en todo momento. Y a mi otra hermana, Elena, que sí que ha podido “disfrutar” este proceso en toda su extensión.

No puedo olvidarme también de mis amigos, que han seguido siempre con interés los avances, sin perder la fe en que esto llegaría a buen puerto.

Finalmente, un agradecimiento general a todos aquellos que han colaborado, aportando ideas, respondiendo a mis correos, compartiendo información ... y más especialmente en la fase final de esta tesis, en pleno confinamiento por la pandemia por el COVID-19, en el que en muchos casos he recibido información y apoyo desinteresado desde muchos puntos del planeta. Algunas inesperadas respuestas, además de enriquecer la tesis, me han hecho tremendamente feliz. Espero poder corresponder en un futuro a esa generosidad desinteresada ayudando, en la medida de mis discretas capacidades, a futuros investigadores.

Y, gracias a la vida, por permitirme seguir disfrutando de mi profesión en todas sus vertientes, y seguir con la ilusión de aprender cosas nuevas, aunque a veces esa ilusión sea excesiva y difícilmente abarcable en una sola vida.

Todo mi reconocimiento a un ente, que no por abstracto ha sido menos importante para mí, y es la propia investigación y tesis en sí, que ha sido mi salvavidas y motor interno en tiempos de incertidumbre personal, hasta en dos ocasiones. Un proyecto que empezó como un pasatiempo y me ha dado mucho más de lo que esperaba, espero haberle correspondido. No obstante, para mí, ¡Ya ha merecido la pena! A veces, de la forma menos esperada, es como encontramos el equilibrio.

Todo este proceso, aunque se ha hecho largo a veces, me ha permitido disfrutar del camino. El destino final es un regalo, pero no lo ha sido menos el trayecto. Aunque esto, no es el final ...

“Nuestro destino nunca es un lugar, sino una nueva manera de ver las cosas.” Henry Miller

Contenido

RESUMEN	19
ABSTRACT	21
1 INTRODUCCIÓN - OBJETIVO DE LA TESIS	23
2 HISTÓRICO – ESTADO DEL ARTE.....	27
2.1 Presentación	27
2.2 Los orígenes: Ingeniería romana.....	28
2.3 Ejemplos en la Edad Media: Los Vikingos	36
2.4 El resurgir: El Renacimiento (S. XV y XVI).....	37
2.5 La Ilustración (S. XVIII, el Siglo de las Luces)	42
2.6 La Revolución Industrial: Cajones Metálicos.....	57
2.7 Interacciones con la industria naval.....	63
2.7.1 Diques Flotantes	63
2.7.2 Sistema Syncrolift.....	67
2.7.3 Otros sistemas: desplazamiento neumático.....	69
2.8 Cajones de hormigón	70
2.8.1 Evolución en el S.XX	70
2.8.2 Construcción sobre diques flotantes en seco	83
2.8.3 Construcción en seco	83
2.8.4 Construcción en cajonero	88
2.8.5 Curado del hormigón	91
2.9 Tipologías de cajones singulares.....	98
2.9.1 Cajones cilíndricos:.....	98
2.9.2 Cajones perforados o antirreflejantes	99
2.9.3 Cajones JARLAN:.....	100
2.9.4 Cajones tipo ARC.....	109
2.9.5 Cajones con superestructura curvada de eje horizontal	110
2.9.6 Cajones semi-circulares.....	110
2.9.7 Cajones monobar	111
2.9.8 Cajón cilíndrico perforado.....	113
2.9.9 Cajones con ranura y bufador	113
2.9.10 Cajones sin solera.....	114
2.9.11 Cajones de hormigón rectangulares	115
2.9.12 Cajones trapezoidales	115
2.9.13 Cajones con patio.....	116
2.9.14 Cajones para la obtención de energía marina	116

2.9.15	Cajones adaptados a la recepción de generadores de energía con olas.....	120
2.9.16	Cajones de cimentación para torres eólicas	121
2.9.17	Cajones metálicos de gran tamaño.....	122
2.10	Cajones de gran tamaño	123
2.11	Últimas evoluciones: Cajones en materiales compuestos.....	125
2.11.1	Duques de Alba Puerto el Rosario	125
2.11.2	Torres de captación agua salada en Desaladoras y Ciclos combinados	126
2.11.3	Otros ejemplos de construcción con materiales compuestos en obras marítimas....	128
2.12	ANALOGÍAS HISTÓRICAS	130
3	METODOLOGÍA	131
4	RESULTADOS	141
4.1	El Ciclo de Vida y su aplicación a la ingeniería marítima	141
4.2	Casos prácticos y resultados	141
4.3	Cálculos de casos	141
4.3.1	Espaldón Escombreras	142
4.3.2	Cajón tipo I—Puerto de Valencia	147
4.4	Mejoras complementarias	151
4.4.1	Elección del cemento	151
4.4.2	Dosificación del hormigón	153
4.4.3	Utilización de árido reciclado.....	154
4.4.4	Otras mejoras: agua de mar.....	154
4.5	Información complementaria	155
5	DISCUSIÓN	163
6	CONCLUSIONES.....	169
7	NUEVAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN.....	173
8	REFERENCIAS.....	175
9	APÉNDICE 1: From Julius Caesar to Sustainable Composite Materials: A Passage through Port Caisson Technology.....	185
9.1	Aportación del artículo a la investigación.....	185
9.2	Indices de calidad.....	185
9.3	Artículo - Contenido.....	186
10	APÉNDICE 2: Recent History, Types, and Future of Modern Caisson Technology: The Way to More Sustainable Practices.....	211
10.1	Aportación del artículo a la investigación.....	211
10.2	Índices de Calidad	211
10.3	Artículo 2 – Contenido	212

11	APÉNDICE 3: Evaluation and Optimization of the Life Cycle in MaritimeWorks	241
11.1	Aportación del artículo a la investigación.....	241
11.2	Índices de calidad.....	241
11.3	Artículo 3 – Contenido	242
12	APÉNDICE 4: Cálculo de Vida Útil con LIFE 365.....	263
12.1	Vida útil Espaldón.....	263
12.2	Vida útil cajón	264
13	APÉNDICE 5 : Informe completo ATP cajón armado PRFV	265
13.1	Informe.....	265
13.2	Planos.....	276
14	APÉNDICE 6: Fichas técnicas de barras PRFV.....	279
16	APÉNDICE 7: Resultados software ONECLICK LCA	283
16.1	Cajón armado con acero y CEM I SR	283
16.2	Cajón armado barras PRFV y CEM I SR.....	286

TÍTULO: De Julio César a los materiales compuestos. El Ciclo de Vida como elemento de decisión en la búsqueda de materiales y métodos constructivos más sostenibles en construcción de cajones.

TÍTULO CORTO: De Julio César a los materiales compuestos, nuevas tecnologías constructivas de cajones.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: El puerto de Ostia tras sus sucesivas ampliaciones hasta Trajano [3].....	28
Figura 2: Esquema de cajones utilizados en asedio Brindisi [5]	29
Figura 3: Imagen correspondiente a Obras marítimas y puertos en transcripción De Architectura de Gotardus de Ponte [7].....	30
Figura 4: Imagen de dique vertical de Vitruvio [8]	31
Figura 5: Imágenes de los cajones de Cesárea Marítima [11].	32
Figura 6: Planta esquemática del dique norte del puerto de Augusto de Ostia, formado por cuatro cajones de hormigón y entre ellos dique de arcos [5].....	32
Figura 7: Planta y alzado del dique norte, formado por 4 cajones de hormigón unidos mediante arcos [5].	33
Figura 8 : Sección transversal del dique central de Portus y vista buque [3]	33
Figura 9: Sección longitudinal del barco de Calígula en el dique del Faro de Portus [3].....	34
Figura 10: Muelle romano con cajones de madera en Londres [15].....	34
Figura 11: Dibujo cajones y foto del autor exposición Artifex de las diferentes técnicas romanas en obras marítimas [16, 17].....	35
Figura 12: Cajones de madera en puerto Lechaion [19].....	36
Figura 13: Barcos utilizados en Skuldelev (Dinamarca) rellenos de piedra para cerrar esteros (Foto del autor).	37
Figura 14: Láminas de Taccola con torre remolcada y sus cimentaciones [21].....	38
Figura 15: Láminas de Francesco L. Durantino [12] y Taccola [22]	38
Figura 16: Conformación de un cajón[23].	39
Figura 17: Sección de dique con cimentación formada por barcos y cajones [23].	40
Figura 18: Imágenes de cajones en libro Juanelo [23].	40
Figura 19: Cajones de tablestacas (cassone di palancole).....	41
Figura 20: Terraplén y rompeolas para desviación del Arno [24].	41
Figura 21: Planta y secciones del dique construido para asedio de La Rochelle [27]	43
Figura 22: Imagen de Richelieu sobre el dique de su mismo nombre [25].	43
Figura 23: Cajón utilizado por Cornelio Meyer [28].....	44
Figura 24: Portada del libro de Labelye, exponiendo el contenido [29].	45
Figura 25: Cimentaciones puente de Wetsminster [30].....	47
Figura 26: (plano XXVI) vistas de un cajón con sus componentes [30].	48
Figura 27: Planos de diques de Niza y Toulon [30].....	49
Figura 28: Proceso de botadura y colocación de cajones en puente Saumur [31].	50
Figura 29: Detalle constructivos cajón de Saumur [31].....	50
Figura 30: Charpente[33].....	52
Figura 31: Planos del dique de ampliación mediante cimentación con cajones [34].....	53
Figura 32: Rada de Cherbourg Cessart [35].	54
Figura 33: Rada de Cherburgo, Wiebeking [36].....	55
Figura 34: Perspectiva cajón para Toulon sobre pontona [25].....	55
Figura 35: Planos muelle San Felipe en Cádiz [37, 38]	56
Figura 36: Planos proyecto cajones cierre Boca Chica Cartagena de Indias [40].	57
Figura 37: Cajón metálico Madrás (1893) [42].	58
Figura 38: Plano cajones de Zeebrugge [45].....	59
Figura 39: Sección cajón Zeebrugge [46].....	59
Figura 40: Planos del nuevo dique de Bilbao con cajones metálicos [47].....	61

Figura 41: Trabajos de desagüe del cajón [48].	61
Figura 42: Cajón para estación de torpedos, Toulon-Francia [46].	62
Figura 43: Botadura del cajón para Torre de Faro, Alejandría-Egipto [46].	63
Figura 44: Libro de diques y varaderos, Biblioteca del Museo Naval (Madrid) [49].	64
Figura 45: Dique flotante del tipo One sided dock, depositing type [50].	64
Figura 46: Maqueta dique deponente, Museo Naval de Madrid (Foto del autor).	65
Figure 47: Dique deponente Clark Barcelona.	65
Figura 48: Modelo de dique flotante Base de submarinos Cartagena (1924-1974), Museo Naval de Madrid (Foto del autor).	66
Figura 49: Dique flotante arsenal de Cartagena [53]	66
Figura 50: Plano general dique deponente de Barcelona [54].	67
Figura 51: Elevación longitudinal dique deponente Barcelona [55].	67
Figura 52: Sistemas de botadura de barcos [56].	68
Figura 53: Cajón del sistema MOSE sobre los raíles del Syncrolift [57]	69
Figura 54: Desplazamiento de cajones en Puerto Abidjan mediante cilindros neumáticos [58]	69
Figura 55: Plano original (izda) y modificado con cajones (dcha) [59].	71
Figura 56: Planos de detalle de los cajones contruidos [59].	71
Figura 57: Construcción en seco sobre dique deponente (Izda) y remolque hasta fondeo del cajón (Dcha) [59].	71
Figura 58: Sistema de plataforma sobre pilotes para fabricación del cajón y pontona para puesta en flotación del mismo. Puerto de Kobe, Japón (1906) [52].	72
Figura 59: Sección Del cajón de Touapsé [45].	74
Figura 60: Secciones de cajones en Rusia [45].	75
Figura 61: Remolcado de elementos en U para dique seco de puerto de Cádiz, todavía hoy en uso [39].	75
Figura 62: Secciones de los cajones puerto de Rotterdam [61].	76
Figura 63: Zona de prefabricación Merwehaven [61].	76
Figura 64: Carta de Winston Churchill exponiendo características de los puertos a fabricar (Foto del autor, exposición temporal Danish Architecture Center).	77
Figura 65: Cajones Phoenix [63].	78
Figura 66: Fabricación de los cajones Phoenix en dique seco [64].	78
Figura 67: Construcción de cajones Phoenix [65].	79
Figura 68: Vista aérea Mulberry Arromanches [66].	79
Figura 69: Imagen y alzado del taller de construcción de cajones en el puerto de Pasajes [67].	80
Figura 70: Proceso constructivo de dique con cajones y cajoneros Acciona (cortesía de Acciona) [68].	80
Figura 71: Cajones en Japón y perforados en diversos emplazamientos [51, 69, 71, 73-75].	82
Figura 72: Cajones contruidos en seco sobre cajonero en Puerto Barcelona año 2018, cajonero Kugira Acciona (Foto del autor).	83
Figura 73: Planos de uno de los modelos de cajones en ampliación puerto de Durban [81].	86
Figura 74: Sistema de deslizado de los cajones mediante cilindros neumáticos [58].	86
Figura 75: Construcción de cajones en puerto de Abidjan, empresa CHEC [58].	87
Figura 76: Cajones sistema MOSE Venecia [57, 83].	88
Figure 77: Vista sistema de gatos y detalle de uno de los gatos [77].	90
Figura 78: Ferrallado de losa para construcción del cajón (Foto del autor).	90
Figura 79: Hormigonado del cajón todavía en seco y en flotación (imágenes cortesía Acciona).	95
Figura 80: Remolque del cajón desde el cajonero y varado en el muelle (imágenes cortesía Acciona).	95

Figura 81: Cajones en dique Este puerto S.C Tenerife (imágenes cortesía Acciona).	96
Figura 82: Cajón Apolonio [91].	96
Figura 83: Cajón fondeado en el muelle para su finalización [93].	97
Figura 84: Perspectiva del cajón y de sus fases de construcción en el muelle [92, 94]	97
Figura 85: Parque prefabricación de cajones puerto de Durban, Sudáfrica 2003 [96].	99
Figura 86: Cajón perforado Jarlan en el puerto de Dieppe [97].	100
Figura 87: Ejemplos de cajones tipo Jarlan en diferentes emplazamientos [53, 71, 95].	101
Figura 88: Sección tipo de un cajón perforado [71].	101
Figura 89: Comparación entre muros perforados y cajones convencionales [71].	102
Figura 90: Cajones Jarlan puerto de Dieppe [98, 99].	103
Figure 91: Encofrados de Cajones Jarlan del puerto Tanger Med [100].	103
Figure 92: Cajones Puerto de Tánger ya colocados en sitio [101].	103
Figura 93: Perspectiva cajones Tanger Med [75].	104
Figure 94: Cajones Jarlan para Monaco (cortesía Bouygues) [102, 103].	104
Figura 95: Cajón perforado con ranuras verticales en puerto de Yobuko [71]	105
Figura 96: Cajón perforado en Puerto Takamatsu [71].	105
Figura 97: Doble cilindro perforado Puerto Shibayama [71].	105
Figura 98: Perspectiva y sección dique Beirut [75].	106
Figura 99: Imagen dique de cajones Beirut finalizado [75].	106
Figura 100: Dique puerto Torres [69].	107
Figura 101: Sección del dique curvo puerto Funakawa [73].	108
Figura 102: Plano conceptual cajón doble cilíndrico [73].	108
Figura 103: Sección y vista frontal cajón perforado con simple y doble cámara [105].	109
Figura 104: Planta y sección tipo ARC [95].	109
Figura 105: Dique y cámara amortiguadora Katsutoshi [74].	110
Figura 106: Perspectiva y sección cajón semi circular [106].	110
Figura 107: Imagen cajón semi-circular [106].	111
Figura 108: Unidades Monobar, Inferior (izquierda) y Superior (derecha) [107].	112
Figura 109: Colocación de Unidad Tipo B de cajón monobar (30 tn) [107].	113
Figura 110: Cajón cilíndrico perforado (Apolonio) [91].	113
Figura 111: Maqueta cajón con ranura y bufador.	114
Figura 112: Cajón sin solera , tipo indio [95].	115
Figura 113: Cajón rectangular fabricado con cajonero (cortesía Acciona).	115
Figura 114: Cajón trapezoidal puerto de Kobe [52].	116
Figura 115: Cajón con patio [95].	116
Figura 116: Cajón tipo A OWC, puerto Civitavecchia [108].	117
Figura 117: Conversor de energía a varios niveles [109].	118
Figura 118: Modelo experimental para puerto de Giardini Naxos (Italia) [110].	118
Figura 119: Modelo de cajón para producción de energía [111].	119
Figura 120: Cajón para alojar sistema de producción de energía con el oleaje [112].	119
Figura 121: Secciones de cajones producción de energía con el oleaje [112].	120
Figura 122: Generación por rebase, Sea-wave Slot-cone Generator (SSG) [113].	120
Figura 123: alojamiento de turbina Wavenergy en cajón.	121
Figura 124: Torres de cimentación molinos offshore.	121
Figura 125: Construcción de cimentaciones de torres en Newcastle upon Tyne [114].	122
Figura 126: Imágenes extraídas de vídeo botadura de los cajones metálicos [115].	122
Figura 127: Sección del cajón metálico.	123
Figura 128: Botadura y cimentación del cajón metálico [115].	123

Figura 129: Promedio de la fuerza del oleaje en un cajón largo [71].	124
Figura 130: Cajones de grandes dimensiones, La Condamine (izquierda) [116] y Adriatic (derecha) [68].	125
Figura 131: Cajones utilizados en el sistema MOSE de protección en Venecia [82].	125
Figura 132: Duque de Alba en materiales compuestos (cortesía Acciona).	126
Figura 133: Torre de captación en materiales compuestos (Gentileza Global Composites).	127
Figura 134: Elementos torre de captación en materiales compuestos (Gentileza Global Composites).	127
Figura 135: Vista isométrica torre de captación en materiales compuestos (Global Composites).	128
Figura 136: Compuertas de esclusas en materiales compuestos [118].	128
Figura 137: Tablestacas fibra de vidrio [119].	129
Figura 138: Pontona Rodman en fibra de vidrio (cortesía de Rodman).	129
Figura 139: Planos y dimensiones pontona en Fibra de vidrio (Cortesía Rodman).	130
Figura 140: Las infraestructuras como base del desarrollo sostenible [123].	134
Figura 141: Sección tipo del espaldón [139].	142
Figura 142: Life cycle assessment (LCA) comparación en todas las categorías.	144
Figura 143: Gráficos de burbujas de los 3 casos (ejemplo para calentamiento global).	146
Figura 144: Gráfico radar soluciones espaldón Escombreras.	146
Figura 145: Planta y sección tipo Cajón dique puerto Valencia [141].	147
Figura 146: Comparación indicadores Cajón con refuerzo Acero y PRFV.	148
Figura 147: Gráficos de burbujas, impactos por recurso en Calentamiento Global (cajones acero y PRFV).	150
Figura 148: Gráfico radar comparación diferentes soluciones en cajón.	151
Figura 149: Gráfico comparativo impacto de las diferentes clases de cemento (datos IECA) [143].	152
Figura 150: Gráfico comparativo Uso de recursos según clase de Cemento (datos IECA [143]).	153
Figura 151: Comparación de impactos entre hormigones fabricados con diferentes clases de cemento.	154
Figura 152: Evolución de los indicadores en función de la variación del contenido en escoria del cemento.	157
Figura 153: Vida útil en función de varios casos (cementos distintos).	159
Figura 154: Concentración de cloruros vs profundidad de la estructura.	160
Figura 155: Concentración cloruros vs tiempo a profundidad = 50 mm (recubrimiento)	160
Figura 156: Difusividad de la mezcla en función del tiempo.	161
Figura 157: Impactos del cajón en función de los materiales utilizados (clase cemento y tipo Refuerzo).	165
Figura 158: Comparativo cajón en función del cemento elegido.	166
Figura 159: Sensibilidad a los cambios a partir de caso base (acero y CEM I SR).	166
Figura 160: Comparación de impactos en cajón entre casos Base sin mantenimiento y 2 hipótesis de mantenimiento.	167
Figure 161: Comparación de impactos soluciones sin mantenimiento y con hipótesis de mantenimiento.	168
Figura 162: Ejemplo de torre de captación en materiales compuestos de la empresa Global Composites.	173
Figura 163: Duque de Alba materiales compuestos Acciona, Puerto del Rosario.	174

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Relación agua cemento (EHE) [85].	92
Tabla 2: Recubrimiento de armaduras (EHE) [85].	93
Tabla 3: Limitación del contenido de cloruros (EHE) [85].	93
Tabla 4: Relación Agua/Cemento en las diferentes normativas internacionales [84].	93
Tabla 5: Recubrimiento de las armaduras en las diferentes normativas internacionales [84].	94
Tabla 6: Limitación Cloruros en las diferentes normativas internacionales [84].	94
Tabla 7: Ventajas e inconvenientes diferentes sistemas constructivos.	98
Tabla 8: Dimensiones elementos monobar [107].	112
Tabla 9: Analogías históricas entre cajones.	130
Tabla 10: Tabla de indicadores Ciclo de Vida según EN 15978 [127].	137
Tabla 11: Resumen de mediciones alternativas de Espaldón Escombreras [139].	143
Tabla 12: Comparación cuantitativa soluciones 3A y 3B.	145
Tabla 13: cuadro comparativo indicadores soluciones Espaldón Escombreras.	146
Tabla 14: Mediciones más importantes de cajón tipo I Dique Valencia.	147
Tabla 15: Cuadro comparativo indicadores de impacto Acero vs PRFV.	149
Tabla 16: Valores de resultados en el Ciclo de vida para soluciones cajón.	150
Tabla 17: Desglose de mediciones cajón tipo I armado con acero [140].	155
Tabla 18: Desglose de mediciones cajón tipo I armado con PRFV (dimensionamiento ATP) [141].	156
Tabla 19: Propiedades mecánicas de las barras RWB producidas por ATP[141].	156
Tabla 20: Comparativo entre impactos solución inicial y optimizada.	164

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ADPE: Abiotic Depletion (Agotamiento recursos abióticos - combustibles fósiles)

AP: Acidification (Acidificación)

ATP: proveedor barras fibra de vidrio

B500S : Acero límite elástico 500 MPa

C₂H₄: Etileno

CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

CEM: cemento

CFC₁₁: Clorofluorocarbono

CHEC: China Harbour Engineering Company

CO₂: dióxido de carbono

DAP: Declaración Ambiental de Producto

D.C: Después de Cristo

EHE: Instrucción de Hormigón Estructural

EP: Eutrophication (Eutrofización)

EPD: Environmental Product Declaration

GFRP: Glass Fiber Reinforced Polymer

GWP: Global Warming Potential (Indicador Calentamiento Global)

HA: Hormigón Armado

HM: Hormigón en masa

IECA: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones

ILDC: International Life Cycle Data System

ISO: International Organization for Standardization

ITB: Instytut Techniki Budowlanej, organismo de certificación.

LCA: Life Cycle Assessment

MJ: MegaJulios

MOSE: Module Sperimentale Elettromeccanico

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

OPD: Ozone Layer Depletion (Agotamiento capa de Ozono)

OWC : Oscillating Water Column

PO₄: Ion fosfato

POCP: Photochemical Oxidation (Agotamiento de recursos abióticos - elementos)

PRFV: Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio.

S.: Siglo

SO₂: Dióxido de Azufre

SR: Resistente a los sulfatos (cemento)

IIIa: exposición ambiente aéreo

IIIb: exposición ambiente marino

IIIc: Exposición marea y salpicaduras

NOTACIÓN Y SÍMBOLOS

A_r: sección equivalente de barras de PRFV (mm^2)

E_r: Módulo de Young de la elasticidad del refuerzo en PRFV

ε_{fk} : Tensión de ruptura característica del refuerzo en PRFV

eq.: Equivalente

f_{rk}: resistencia a la tracción característica del refuerzo en PRFV

Φ : Diámetro

kg: Kilogramo

kW: Kilovatio

m³: Metro cúbico

mm: Milímetro

mm²: Milímetro cuadrado

MPa: MegaPascales

N: Newton

N/mm²: Newton por milímetro cuadrado

tn: Tonelada

RESUMEN

La construcción de diques portuarios con cajones es considerada una tecnología muy innovadora y que utiliza modernas técnicas de construcción, pero ha sido moderna desde tiempos de los romanos.

Tras recorrer un itinerario histórico por la evolución de la construcción de cajones en obras marítimas, se exploran las necesidades actuales en esa tipología, tanto a nivel funcional como a nivel constructivo. Este recorrido lleva hasta la utilización de los materiales compuestos.

Todo el modelo productivo en general, y la construcción de infraestructuras en particular se encuentran actualmente en entredicho, por la poca sostenibilidad de este modelo. Los objetivos de Desarrollo Sostenible marcan un hito en el desarrollo de la humanidad buscando la mejora en las condiciones de vida siendo respetuosos con el planeta y utilizando los recursos responsablemente.

Todo esto lleva a implementar dichos criterios en la investigación, para comprobar de manera cuantitativa si las soluciones con materiales compuestos llevan por el camino de un mayor respeto por el medio ambiente. Se medirán los impactos a través de la Evaluación del Ciclo de Vida de las infraestructuras, que tiene en cuenta toda la vida útil, incluyendo la demolición o reutilización de los materiales.

Las diferentes hipótesis calculadas permitirán orientar sobre las mejores opciones actuales para disminuir los impactos, así como sobre las líneas a seguir para buscar métodos constructivos aún mejores, que cumplan con los mismos objetivos estructurales y funcionales, pero consumiendo menos recursos y contaminando menos.

ABSTRACT

The construction of port docks and breakwaters with caissons is considered a very innovative technology that uses modern construction techniques, but it has been modern since Roman times.

After going through a historical itinerary through the evolution of the construction of caissons in maritime works, the current needs in this typology are explored, both at a functional and constructive level. This journey takes us to the use of composite materials.

Our entire production model in general, and the construction of infrastructures in particular are currently in question, due to the low sustainability of this model. The Sustainable Development Goals mark a milestone in the development of humanity seeking improvement in living conditions by being respectful of the planet and using resources responsibly.

All this leads us to implement these criteria in research, to check quantitatively whether solutions with composite materials lead us on the path of greater respect for the environment. We will measure the impacts through the Infrastructure Life Cycle Assessment, which considers the entire useful life, including the demolition or reuse of materials.

The different hypotheses calculated will provide guidance on the best current options for reducing impacts, as well as on the lines to follow to find even better construction methods, which meet the same structural and functional objectives, but consuming fewer resources and polluting less.

1 INTRODUCCIÓN - OBJETIVO DE LA TESIS

Esta investigación se vio inicialmente motivada por la búsqueda de materiales alternativos para la construcción de obras marítimas en zonas remotas. En efecto, la experiencia vivida por el Autor de la tesis le llevó a la construcción de un puente en materiales compuestos en una zona muy remota de África, siendo los costes en esas condiciones muy competitivos frente a las soluciones tradicionales en hormigón. Por otro lado, la existencia de embarcaciones en fibra de vidrio de grandes tamaños parecía sugerir que una forma idónea de transportar estas estructuras a dichos lugares mal comunicados sería hacerlo remolcándolas, como si se tratase de embarcaciones, por lo que la idoneidad de este tipo de solución para zonas remotas parecía merecer al menos un análisis más profundo.

Adicionalmente, la creciente necesidad de construir de una manera más sostenible y evitando los impactos nocivos para el medio ambiente, introducían una variable adicional al estudio, ya que aparentemente esta solución podía ser más sostenible, pero había que demostrarlo.

El cálculo de una estructura tipo cajón en fibra de vidrio requiere sus cálculos y conocimientos específicos en dimensionamiento con fibra de vidrio, en cambio, para confirmar si los materiales compuestos apuntan en la buena dirección en cuanto a sostenibilidad, se puede recurrir a una etapa preliminar aprovechando la gran experiencia española en cajones de hormigón en obras marítimas. Dicha experiencia se traduce en un gran número de realizaciones con cajones y en la disponibilidad de gran número de datos y proyectos constructivos. Comparando la solución habitual de armado con acero con la solución armada en fibra de vidrio, se podía tener una primera aproximación y ver la factibilidad del uso de materiales compuestos en un caso más sencillo.

Esta investigación es por tanto un primer paso para encontrar soluciones más sostenibles en la construcción de cajones, con objeto de consolidar y demostrar que efectivamente la utilización de materiales compuestos es favorable en cuanto a su respeto por el Medio Ambiente.

La confirmación de estas hipótesis permitirá concentrar esfuerzos en sucesivas etapas en las que se dimensionarán estructuras equivalentes totalmente construidas en materiales compuestos y se compararán con las construidas en hormigón armado con acero y hormigón armado con PRFV. Se podrán así comparar tres soluciones a valorar en función de diversos criterios, como son los ambientales, económicos y de mantenimiento.

Para desarrollar todo este proceso, era importante inicialmente establecer un Estado del Arte completo, en el que se pudiese ver claramente la evolución de la tecnología de cajones en las obras a lo largo de la historia, y aprender tanto de sus éxitos como de sus fracasos. El conocimiento tanto de sus inicios en la época de los romanos, como de la evolución en las formas y en los materiales que

componen los cajones utilizados en obras marítimas permiten entenderlos mejor en su funcionalidad y en su comportamiento estructural de cara a aplicar nuevas técnicas y nuevos materiales en su construcción.

Una vez realizada esta investigación preliminar, y a la luz de los fundamentos adquiridos, se han analizado las necesidades actuales, así como los materiales existentes y las restricciones (e incentivos) en materia medio ambiental para así razonar cuáles serían los materiales óptimos para futuras evoluciones en este tipo de cajones.

Las nuevas funcionalidades y usos que se están incorporando en los cajones (atenuación del oleaje, producción de energía) son un parámetro fundamental a la hora de buscar soluciones innovadoras para su construcción, y que puedan ser competitivas a nivel económico, o bien, bajo un prisma más global, su Análisis de Ciclo de Vida.

Realizado por tanto el análisis conceptual y el planteamiento de las diferentes necesidades que justificarían la construcción de cajones con materiales compuestos, se entrará a valorar la eficiencia en términos medioambientales, a través del análisis del Ciclo de Vida de la estructura. En efecto, actualmente y considerando únicamente criterios económicos en el momento de la construcción, los materiales compuestos no son aún competitivos en la mayoría de las situaciones (la excepción podrían ser las zonas remotas) pero si se analiza la estructura con un enfoque más global, la inversión puede ser mucho más eficiente y competitiva.

El objetivo final es el de dar con la solución constructiva que, a día de hoy y con los elementos disponibles, otorgue mayor flexibilidad a la hora de desarrollar nuevas tipologías de diques de cajones, y que tenga justificada su viabilidad en términos globales, y no meramente cortoplacistas como el coste de construcción.

Para ello en la Metodología se expone el razonamiento seguido para analizar los casos, así como el Método de estudio utilizado para calcular el Ciclo de Vida, basado en la metodología CML de la Universidad de Leiden. En el capítulo de Resultados se realizan los cálculos del Ciclo de Vida de varias hipótesis, empezando por soluciones tradicionales armadas en acero y terminando por las más ambiciosas en materiales compuestos, para terminar modificando también los demás materiales que conforman la estructura.

En la Discusión se valoran y comparan los diferentes resultados obtenidos y se razonan las ventajas e inconvenientes de las diferentes opciones, así como las posibilidades complementarias que nos ofrece la utilización de barras de fibra de vidrio, algunas de las cuales no se planteaban siquiera al inicio de

esta investigación. Ha sido muy enriquecedor en ese sentido ya que los resultados obtenidos han dado pie a nuevas reflexiones y puntos de vista.

Finalmente, en las Conclusiones se confirma el interés de la utilización de las barras de fibra de vidrio como refuerzo, exponiendo las ventajas, así como algunos valores destacables que cuantifican las mejoras. Se introducen argumentos a la continuación de la investigación hacia el objetivo último de este proceso, que es el de evaluar cajones para obras marítimas totalmente contruidos en materiales compuestos. En las Nuevas vías de investigación se exponen los casos actuales en los que hay que apoyarse para continuar avanzando.

Esta tesis está basada en tres artículos publicados en la revista indexada Sustainability, y en los Apéndices se incluyen en su totalidad, así como los cálculos justificativos del Ciclo de Vida en el Software oneClick LCA y el dimensionamiento y características del refuerzo con las barras de fibra de vidrio.

2 HISTÓRICO – ESTADO DEL ARTE

“ ... per mezzo della navigazione dei mari si fanno i più importante progressi e le maggiori ricchezze del mondo : o per conquista di guerra, o per traffichi in pace : la qual cosa insegna la storia” V. Scamozzi (*L’idea dell’Architectura universale*, 1615, Libro V, Cap XVII [1])

“Los ingenieros que ignoran el pasado poco pueden hacer por el futuro”. G.F.W HAUCK

Es increíble el gran número de personajes ilustres y de hechos históricos relacionados directamente con la construcción de los puertos con Cajones, y ese ha sido, al menos en toda la parte histórica hasta el desembarco de Normandía el hilo conductor, que permite ubicar mejor en un contexto histórico más general y que resalta la importancia de la ingeniería en la historia. Ingeniería e historia van íntimamente ligadas, y muchos de los ejemplos que aquí se encuentran refuerzan ese pensamiento. Sin olvidar, la ayuda que supone para los ingenieros el conocimiento de la historia, no sólo para ubicarse mejor en el mundo y tratar de entenderlo un poco mejor, sino que la propia historia de la ingeniería ayuda a conocer su evolución y hallar algunas de las claves para el futuro.

2.1 Presentación

Desde que el hombre tuvo el arroyo y la tecnología para navegar más allá de los ríos, haciéndose a mar abierto, tuvo la necesidad de refugios para sus naves, ya fueran naturales o creados artificialmente. Tanto las conquistas como el comercio fueron haciendo cada vez más necesario el dominio del mar, y como no, de los puertos.

Esto hizo que se empezasen a construir puertos con diferentes tipologías, siendo una de ellas la de diques verticales. Una forma de construirlos era la utilización de cajones o de métodos que se considerarán asimilables a estos, que se hundían en su emplazamiento definitivo para posteriormente ser rellenados de tierra, de hormigón romano (*opus caementitium*) o de materiales granulares. Los romanos desarrollaron ya esta técnica, que luego quedó olvidada hasta después del largo y sombrío período de la Edad Media.

Se retomó en el Renacimiento y ha llegado hasta nuestros días, evolucionando sus técnicas constructivas, sus materiales, tamaños, velocidad de construcción ...

En este Estado del Arte se quiere hacer una introducción a este apasionante mundo, tanto para ingenieros como para aquellos interesados en la historia de los puertos, y en concreto de la evolución

de una forma específica de construir a lo largo de los siglos, técnica que sigue aun totalmente vigente y que se ha ido adaptando con el devenir de los tiempos.

Esta investigación quiere arrojar una visión histórica lo más completa posible sobre esta tecnología, para conocer lo que ya se hizo, y que muchas veces, por olvidado o desconocido, se volvía a inventar una y otra vez; hay que evitar que ocurra eso de que “lo nuevo, es lo que ya está olvidado” [2].

2.2 Los orígenes: Ingeniería romana

La ingeniería romana es rica en ejemplos portuarios, siendo el más representativo y conocido el del puerto de Roma, Portus (Figura 1).

Figura 1: *El puerto de Ostia tras sus sucesivas ampliaciones hasta Trajano [3].*

No obstante, hay referencias de construcciones portuarias bien anteriores a los romanos, como puede ser el caso de los Fenicios y los Cartagineses, pero la primera referencia escrita que se ha encontrado de utilización de cajones (o una estructura similar asimilable al concepto de los cajones) en puertos, es en el asedio de Brindisi por Julio César en el 49 A.C. En la Guerra Civil que enfrentaba a Pompeyo y Julio César, con objeto de impedir la entrada de las embarcaciones de Pompeyo para evacuar a las tropas, Julio César construyó con gran celeridad un dique de cierre del puerto, que, aunque

infructuoso en su función de asedio, sirve para situar esta primera referencia. Esto se puede apreciar en los párrafos XXV a XXVII de Guerra Civil de Julio César [4].

“(...) trató (César) de impedirle la salida y el uso del puerto de Brindis trazando las obras siguientes: en lo más estrecho de la garganta del puerto, de ambas orillas donde era más profundo el mar, tiró un muelle y un dique. Prosiguiendo más adelante, donde por la mucha hondura no se podía echar dique, colocaba contra el muelle dos órdenes de barcas chatas de treinta pies en cuadro. Asegurábalas por las cuatro esquinas con otras tantas áncoras, para que no se moviesen con las olas. Concluidas y asentadas las primeras, unía con ellas en la misma forma otras de igual grandeza. Cubrías con tierra y fagina para entrar y correr sin embarazo a la defensa, y por la frente y los costaos las guarnecía con verjas y parapetos. De cuatro a cuatro barcas erigía una torre de dos altos, para defenderlas más cómodamente del ímpetu de los navíos y de los incendios”

(...)

“Ya César tenía a los nueve días casi la mitad de su obra, cuando vuelven a Brindis remitidas por los cónsules las naves que transportaron a Durazo el primer trozo del ejército.” [4]

El dique se construyó mediante cajones de madera que fueron transportados hasta su emplazamiento definitivo, y una vez ahí amarrados y hundidos mediante el relleno de tierra. Este relleno permitía el paso de las tropas y armamento a lo largo del dique. La Figura 2 esquematiza a la luz del texto cómo podrían haber sido estos primigenios cajones.

Figura 2: Esquema de cajones utilizados en asedio Brindisi [5]

El término utilizado para estas embarcaciones, en latín, “ratis”, se interpreta de manera diferente en la obra de Michel Reddé [6], en la que se refiere más a pontonas que a cajones. No obstante, su relleno de tierra para el paso de tropas puede hacer pensar que probablemente estas embarcaciones tocasen fondo conformando con ello un dique provisional de algo similar a cajones, que, obviamente, aún no contaban con término propio, por ser la primera vez que se utilizaban.

Figura 3: Imagen correspondiente a Obras marítimas y puertos en transcripción De Architectura de Gotardus de Ponte [7].

Se podría considerar también, que en los Diez Libros de Arquitectura de Vitruvio (Figura 3) se hace mención de este sistema, dadas las tipologías que expone de construcción portuaria, y como se puede apreciar en la Figura 4, una de las 3 tipologías de construcción de diques de Vitruvio es este dique vertical que puede ser perfectamente asimilable a la construcción con cajones. Pero según la bibliografía consultada puede haber discrepancias en esto ya que Vitruvio no hablaba expresamente de cajones prefabricados ; pero no está descaminada esta hipótesis dada la referencia de utilización de cajones por Julio César, y que Vitruvio fue tanto el Ingeniero de Julio César, como de su sucesor César Augusto, al que fue dedicado el Códice en el principio de su imperio, como reza en la dedicatoria [7] .

Este libro recogía todo el saber de la época, incluyendo las obras marítimas, y data aproximadamente del año 30 A.C. En la reedición y traducción de este libro al francés por Claude Perrault, se encuentran láminas interpretando el texto, como el dique vertical de la Figura 4.

Figura 4: Imagen de dique vertical de Vitruvio [8]

Siguiendo con las experiencias romanas documentadas de construcción con cajones, se sabe que en el puerto de Cesárea Marítima o Sebastos, construido por orden de Herodes El Grande, fueron utilizados en el año 18 A.C cajones flotantes de doble pared, que una vez hundidos se rellenaron de hormigón.

En la obra de Flavio Josefo [9] se mencionan unos bloques de enormes dimensiones en la construcción de dicho puerto, que no pueden ser otros que los cajones utilizados.

“Pero venciendo el rey con liberalidad y gastos muy grandes a la naturaleza, hizo allí un puerto mayor que el de Pireo, y más adentro hizo lugar apto y muy grande, adonde se pudiesen recoger todas las naves que viniesen. Aunque el lugar le era manifiestamente contrario, quiso él todavía contender con él de tal manera, que la firmeza de sus edificios no pudiese ser quebrada por los ímpetus de la mar, ni por el poder de la fortuna: y era la gentileza de ellos tanta, que parecía no haber sido jamás contraria la dificultad del lugar a la obra y ornamento; porque habiendo medido el espacio conveniente, según dijimos arriba, echó veinte varas en el hondo muchas piedras, de las cuales había muchas que tenían cincuenta pies de largo, nueve de alto y diez de ancho, y aun hubo algunas que fueron mayores. Habiendo levantado este lugar, que solía ser antes cubierto con las ondas, ensanchó doscientos pies el muro, de los cuales quiso que fuesen los ciento para resistir a las bravas ondas que venían y echarlas, por lo cual también se llamaron con nombre que lo significase, Proclimia.”

El desarrollo de esta tecnología en Sebastos (Figura 5) precedió a su utilización en el puerto de Roma, y, como menciona Oleson [10], era un claro ejemplo de “transferencia tecnológica a gran escala”. Los romanos no dudaban en utilizar las nuevas tecnologías en los confines del imperio donde fuesen necesarias, y en esta obra promovida por Herodes, participaron la flor y nata de los ingenieros romanos. Lo que se consiguió en el S.I A.C muestra la gran estrategia de expansión de Roma, también

a través del conocimiento. Lo allí realizado no tenía precedentes en el Mediterráneo, y ni los emperadores romanos lo lograron hasta unos 60 años después en el puerto de Roma, Portus.

Figura 5: Imágenes de los cajones de Cesárea Marítima [11].

En el libro *Building for Eternity* [11], además de un mayor número de ejemplos (aquí sólo se incluyen los considerados más representativos) se pueden apreciar gran número de detalles obtenidos a través de excavaciones arqueológicas y que permiten documentar estas hipótesis sobre los cajones y su construcción.

Figura 6: Planta esquemática del dique norte del puerto de Augusto de Ostia, formado por cuatro cajones de hormigón y entre ellos dique de arcos [5].

Figura 7: Planta y alzado del dique norte, formado por 4 cajones de hormigón unidos mediante arcos [5].

El siguiente hito en esta tecnología, y en todo un abanico de soluciones para construcción de diques fue el puerto de Ostia, Portus. Se construyeron cajones de hormigón con unas dimensiones de 20x20x10 m y un espesor de muros de 1,5 m (Figuras 6 y 7) [5] en el trayecto desde Puzzoli hasta Ostia, sobre el barco que posteriormente sería hundido conformando el núcleo del dique central según Testaguzza (Figuras 8 y 9) [3]. Se utilizaron también otras naves para conformar el resto de los diques. Dicho barco, el *Mirabilis navis*, se presume fuese el mayor barco que hubiese surcado los mares [12], y además tenía su historia: no sólo había transportado esos cajones, sino que en tiempos de Cayo Julio César Augusto Germánico, alias Calígula, había servido para transportar el Obelisco que procedente de Egipto, terminó ubicado en lo que hoy es la Plaza de San Pedro de Roma. Hay alguna hipótesis que afirma que debido a la “*Damnatio Memoriae*” contra Calígula, se hizo desaparecer todo lo que se refiriese a su paso por el mundo, y la posibilidad de enterrar su mayor barco en el fondo del puerto de Roma puede en ese caso ser comprensible, además de por la evidente utilidad del sistema en la construcción de diques (Figuras 8 y 9).

Figura 8 : Sección transversal del dique central de Portus y vista buque [3]

Figura 9: Sección longitudinal del barco de Calígula en el dique del Faro de Portus [3]

En cualquier caso, parece claro que formó parte de los diques del puerto, como así lo confirma Plinio El Viejo en su Historia natural [13].

“(…) Se vio un abeto especialmente admirable en la nave que, por orden del emperador Gayo, trajo de Egipto el obelisco erigido en el circo del Vaticano y cuatro bloques de la misma piedra para sostenerlo. Es seguro que no se ha visto en el mar nada más admirable que esta nave. Ciento veinte mil modios de lentejas le sirvieron de lastre. Su longitud llegó a ocupar en gran parte el lado izquierdo del puerto de Ostia. De hecho, allí fue hundida, bajo el emperador Claudio, con tres muelles, tan altos como torres, que habían sido construidos por completo en la nave, hechos de camino con el polvo de Putéolos y transportados allí.”

En Britania también los romanos desarrollaron algunos puertos, y tras la fundación de la ciudad de Londres, dentro de sus planes de expansión y urbanización [14], construyeron un puerto (como se puede leer en el libro SPQR de Mary Beard : “ Muchas ciudades de la moderna Gran Bretaña, incluida Londres, deben su ubicación a la elección y planificación romanas”) que habría utilizado cajones de madera en la construcción de los muelles (Figura 10) [15] .

Figura 10: Muelle romano con cajones de madera en Londres [15].

En el libro y exposición ARTIFEX [16], se pueden apreciar las diferentes técnicas romanas en la construcción de diques con cajones, y en las imágenes se ven estos diferentes sistemas (Figura 11).

Figura 11: Dibujo cajones y foto del autor exposición Artifex de las diferentes técnicas romanas en obras marítimas [16, 17].

El istmo de Corinto fue un punto estratégico para Roma, ya que constituía la alternativa a rodear en barco el Peloponeso, y por ello se construyó un puerto en Lechaion, puerto en el que recientemente y a través de excavaciones arqueológicas se están haciendo grandes descubrimientos (Figura 12). Uno de ellos es que hay evidencias claras que en este puerto se utilizaron también cajones de madera, aunque no en su reconstrucción por Julio César tras haberlo arrasado Roma un siglo antes, sino que más tarde, en la época Bizantina temprana (mediados S. V D.C) para conformar los diques exteriores mediante 6 cajones de madera con una longitud total de 56 metros [18].

Figura 12: Cajones de madera en puerto Lechaion [19].

Se ve por tanto que a lo largo de toda la época romana se encuentran ejemplos de la construcción de diques con cajones, siendo los presentados los casos más significativos y conocidos.

2.3 Ejemplos en la Edad Media: Los Vikingos

Desde la época de los romanos hasta el Renacimiento se hallan contados ejemplos de construcción de puertos por sistemas con cajones o mediante la utilización de barcos hundidos. Pero, la repetición de este patrón en diferentes lugares y en diferentes épocas, hacen pensar que se podrán encontrar muchos más ejemplos en otras épocas y otras civilizaciones. El reto es importante, y es, no sólo el de catalogar y estudiar los casos que se van conociendo, sino el encontrar si existe alguna relación entre ellos. En cierta manera, si no existiera ninguna relación, podría considerarse como un indicador del avance tecnológico en Construcción portuaria de diferentes civilizaciones. Es un campo a explorar, y que precisa aún de muchos ejemplos para poder elaborar una teoría. En esta investigación no se profundizará en este sentido, pero es un interesante dato constatar que esta tecnología se iba reproduciendo en lugares muy dispares y aislados unos de otros (o no).

La experiencia personal del autor, considerando el “enfoque sesgado” que tiene actualmente y esa mirada subjetiva que hace que todo lo interprete conforme a “su” realidad, es que allá por donde pasa e investiga un poco en materia marítima y portuaria, encuentra a menudo pequeñas experiencias locales en este ámbito, muy enriquecedoras.

Así ha ocurrido visitando el Museo Vikingo de Roskilde (Figura 13), donde se encuentran los restos de 5 naves Vikingas que fueron hundidas en el siglo XI para cegar uno de los canales de la ría de Roskilde y así facilitar la protección del pueblo ante las invasiones [20].

Según se pudo confirmar en la excavación arqueológica, dichas naves fueron llenadas de piedras y hundidas, actuando a modo de barrera para que los invasores se vieran obligados a navegar por un solo brazo de la ría, que a la postre sería el que estaría dotado de las defensas correspondientes ante las invasiones.

Se ve por tanto que los Vikingos, casi mil años después, utilizaron el mismo sistema que los romanos en Portus. ¿Pero existe alguna relación entre ambos ejemplos? A esa pregunta no se puede responder aún, pero convendría establecer la relación entre ambos casos, si ésta existiera. En cualquier caso, es interesante encontrar ejemplos en lugares tan diferentes.

Figura 13: Barcos utilizados en Skuldelev (Dinamarca) rellenos de piedra para cerrar esteros (Foto del autor).

2.4 El resurgir: El Renacimiento (S. XV y XVI)

Tras un largo período en el que no se hallan evidencias de la construcción de puertos con cajones, hay un Renacimiento no solo en las artes, sino también en el ámbito portuario, y en parte, esto es debido a la reedición de la *Architectura* de Vitruvio como afirma Enrico Felici en el artículo *La Ricerca sui porti Romani in Cementizio* : “con las reediciones en el Renacimiento del libro de Vitruvio, las técnicas para construir muelles y banquetas directamente en agua fueron objeto de un continuo y atormentado análisis” [12] .

El mundo de los cajones no es ajeno a esta nueva corriente, y empiezan a renacer ideas o conceptos ya manejados por los romanos, pero que en muchos casos se consideran como novedosas, dentro de la nueva corriente de replantearse el mundo y buscar nuevas soluciones a los problemas.

Se empiezan en este período a encontrar nuevos ejemplos de construcción de cajones, siendo un exponente importante el ingeniero italiano Mariano Di Jacopo, alias Taccola, conocido en el Quattrocento como el *Archimedes senese*. En sus libros *De Ingeineis* y *De Machines*, retoma el concepto de los cajones flotantes, y expone algunas láminas de estructuras completas transportadas por mar para ser colocadas en emplazamientos cimentados en roca [21] , que recuerdan en cierto modo a una cimentación de cajones (Figura 14).

Figura 14: Láminas de Taccola con torre remolcada y sus cimentaciones [21]

También en la obra de Francesco Di Giorgio Martini (Plataforma para construcción submarina) y de Francesco L. Durantino se pueden encontrar láminas sobre cajones, como se puede apreciar en la Figura 15.

Figura 15: Láminas de Francesco L. Durantino [12] y Taccola [22].

Pero, el primer tratado que analiza en profundidad los temas portuarios es el Manuscrito atribuido a Juanelo Turriano, y encargado por el Rey de España Felipe II, llamado *Veintiún Libros de los Ingenios*

y de las Máquinas [23]. Es considerado por los expertos como el primer tratado de hidráulica conocido en el mundo, y el primero con una descripción tan completa de la tecnología portuaria de la época [5] y de las diferentes soluciones posibles en la construcción de diques. En los libros 19 (*“Libro de Edifficios de mar y de cómo se an de hazer y acomodar en diversas maneras”*) y 20 (*“De hazer defensas a puertos para que armadas no puedan entrar”*), se recogen varios sistemas para el uso de cajones en la cimentación de estructuras marítimas. En estos sistemas se trasladan las cimentaciones flotando hasta su emplazamiento definitivo, y una vez allí se hunden para ser rellenados por materiales granulares principalmente y conformar la cimentación o el núcleo de diques y/o muelles (Figuras 16-18).

Inicialmente prefiere la opción del hundimiento de buques (que también se expone en el tratado) pero es consciente de la limitación en la disponibilidad de buques para este cometido, por lo que propone la utilización de cajones de madera fabricados expresamente para esta función. En el documento se exponen con todo detalle los diferentes pasos a seguir, desde la conformación y construcción de los cajones, su protección mediante calafateado, hasta incluso el procedimiento a seguir en el hundimiento, mediante unos orificios en el fondo del cajón (denominados A y B en la Figura 16).

Figura 16: Conformación de un cajón[23].

En este tratado Juanelo Turriano se atribuye la paternidad de la idea, lo que no es exclusivo de este manuscrito y autor, como se puede apreciar en las diferentes épocas en que “reaparece” esta tecnología en sus diferentes evoluciones.

Sobre la utilización de barcos a continuación un extracto del tratado:

“Pero si fuesse de peña (el suelo) usarse a de otro artificio, el qual será en la forma siguiente . Tomaran unas barcas viejas, o naos, o , qualquier otro genero de vassillo y hinchirlos an de piedras las mas gruesas que se hallen y los vasos han (fol. 423 v) de ser agujerados para poder llevar después a su lugar, y entonces destapar el agujero y así se ira al fondo, y assi ponerlos por su orden como se á dicho y esta señalado y desta manera se iran los barcos al fondo. Las barcas o naos son las quae están señaladas en A. Las piedras son B, y la segunda es C y las piedras D, las quales han de ir puestas en regla, como quien haze una pared; y ponerse an dos, o , tres ordenes de barcas según ellas fueren grádes o, pequeñas, y có esta invencion se ira rodeando todo el circuito que se havra señalado.”

Figura 17: Sección de dique con cimentación formada por barcos y cajones [23].

Y sobre la necesidad de buscar un método alternativo dada la limitación de disponibilidad de barcos exponía lo siguiente:

“Paresceme que muchas vezes offresciendose haver de fundar dentro del agua con vasillos muy viejos, los quales pocas vezes se hallaran tantas barcas, o , naos viejas que abastasen ha nos de rodear un puerto , o , para haver de tomar un patio para hazer un castillo, de modo que yo he cosiderado otra invención y muy mejor que no las naves ni las barcas; y es que se hagan unas á modo de cajas, las quales han de ser tan largas quanto es un madero de largo, o , mas y han de ser de lo mismo de ancho y hace de hazer la armadura de maderos ni teniendo tanta cuenta con la forma queanto con la invención las quales arcos servirán de barcas, en este lugar conviene que ellas sean capaces de muy gran cantidad de piedra y si quissieren assentar (flo. 429 v) la piedra a modo de pared en las barcas se podrá hazer con tal que en el suelo conviene agujerarlas y después ponerles su tapador para que cierre y destas cajas se pueden juntar unas con otras hasta que se haya hecho todo el rodeo del encerramiento y estas cajas que assi las llamaremos se podrán hazer tan altas queanto las paredes fueren de alto y en el mismo lugar armas las unas con las otras, y hinchirlas de piedras como tengo dicho y al tiempo que se quera hazer calar al suelo a cada uno de los agujeros tener un hombre que vaya destapando los agujeros para que esta armadura vaya calando toda junta a ú mismo tiempo”

Figura 18: Imágenes de cajones en libro Juanelo [23].

Se ha buscado también entre la bibliografía del genio del Renacimiento, Leonardo Da Vinci, si tiene alguna referencia a obras marítimas con cajones, aunque sin éxito. Si bien realizó trabajos en el campo de las obras marítimas (algunos ejemplos en las figuras 19 y 20 a continuación), de momento, no ha habido fortuna en esta búsqueda. Y digo bien de momento, ya que muchos personajes ilustres están relacionados con el mundo de los cajones, y el de Leonardo da Vinci no sería de extrañar que estuviese también relacionado.

Figura 19: Cajones de tablestacas (cassone di palancole).

Figura 20: Terraplén y rompeolas para desviación del Arno [24].

2.5 La Ilustración (S. XVIII, el Siglo de las Luces)

A continuación del Renacimiento, en el que, como se ha comentado, se retornó a técnicas utilizadas por los romanos en diversos ámbitos, en la Ilustración se evolucionó, y no solo se siguieron utilizando estas técnicas, sino que se completaron, mejoraron, y lo que es muy importante hoy en día: se documentaron con gran lujo de detalles. Este capítulo se centrará en los casos más representativos que se han podido encontrar; la profusión de detalles es cada vez mayor.

Al adentrarse en este período se encuentran muchos más casos de construcción de puertos o de cimentaciones de puentes con cajones, y además los ejemplos que se encuentran son ya concretos, y en algunos casos se dan todas las instrucciones necesarias para la ejecución de las obras, e incluso se analizan los problemas posibles o que han existido y han sido resueltos durante la construcción.

Como enunciado en la cita inicial, la tecnología marítima se ha desarrollado en la historia ya sea por necesidades comerciales o bien por las militares. Esto fue una vez más en el caso del asedio de la Rochelle, en el año 1627: en él se construyó un dique que impidiese tanto el acceso como la salida de barcos del puerto. Este dique fue diseñado por Clément Métezeau, y se llamó dique Richelieu. Se construyó el dique mediante el hundimiento de barcos de madera, que fueron rellenos de escollera y sirvieron como base a una estructura de madera que conformó el resto del dique (Figuras 21 y 22). Este dique evitó que los protestantes asediados en la ciudad de la Rochelle por las tropas de Luis XIII y el Cardenal de Richelieu (entre ellos estaban sus mosqueteros) pudieran eludir el bloqueo al que se estaban siendo sometidos [25, 26]. Este cierre de un puerto recuerda mucho al que hizo Julio César en su momento para bloquear el puerto de Brindisi e intentar impedir la salida de los barcos.

En el posterior resurgir de La Rochelle tras su rendición, el propio Cardenal de Richelieu jugó un papel muy activo, y quiso transformar dicho dique en la pieza fundamental de expansión del nuevo puerto y de la actividad comercial de la ciudad, pero esto no fue posible debido a los aterramientos que producía y tuvo que ser atravesada para la construcción del canal de acceso al puerto.

Figura 21: Planta y secciones del dique construido para asedio de La Rochelle [27].

Figura 22: Imagen de Richelieu sobre el dique de su mismo nombre [25].

El cajón puede ser utilizado de varias maneras, y una de ellas es la de servirse de él para facilitar la construcción in situ de las cimentaciones. Así, Cornelio Meyer en 1685 [28] mediante la construcción de un cajón de madera de doble pared (Figura 23), conseguía que se construyera en seco en su interior los muros de mampostería que irían conformando el dique vertical. (A medida que se iban levantando esos muros, el cajón se iría hundiendo, tal y como ocurre actualmente en la construcción de cajones sobre cajonero, como se verá más adelante).

Figura 23: Cajón utilizado por Cornelio Meyer [28].

Como se ha comentado, el grado de detalle y de explicaciones que se encuentran en este período, permiten imaginar no sólo como se realizaba la construcción de dichos elementos, sino que avisa de los posibles inconvenientes que se encontrarán a lo largo de la construcción, ya sean de tipo técnico, como de tipo administrativo o “político” como se explica en el libro de Charles Labelye (Figura 24), sobre la construcción del antiguo Puente de Wetsminster [29]. Este libro fue posteriormente muy citado por otros autores en muchas obras, y en él describe con gran detalle todas las operaciones realizadas para acometer la construcción del puente. Así, entre otras cosas habla de la construcción de las cimentaciones del puente mediante el procedimiento de cajones, y argumenta su decisión. Es importante su argumentación ya que, a pesar de los ejemplos que se están viendo aquí, como ya ha ocurrido en muchos períodos con este sistema, se consideraba tan novedoso el sistema de cajones, que Charles Labelye lo tuvo que defender frente a un tribunal de expertos, y por eso se puede disfrutar hoy de tanto lujo de detalles.

Figura 24: Portada del libro de Labelye, exponiendo el contenido [29].

Labelye eligió este sistema debido a la complejidad del emplazamiento, ya que añadía a su gran profundidad, las corrientes del río Támesis, y los fuertes vientos y grandes olas que se podían llegar a formar. Como se ha dicho, Labelye tuvo que realizar una gran labor didáctica para hacer entender a toda la comisión que juzgaba su proyecto, que éste era el sistema idóneo para la construcción de las cimentaciones del puente, frente al sistema de pilotado de cada una de las pilas. En su exposición, además de confirmar la viabilidad técnica del sistema, expone el gran ahorro económico y de tiempo que supondría, de utilizarse. Por otro lado, expone la reversibilidad del sistema hacia uno de pilotes, en el caso que, por las razones que fuera (avería o cualquier otro motivo), quisieran cambiar de una cimentación ya construida en cajones a una de pilotes.

“What I cannot omit, even in this short Account, is, That by Building thefe Shafts of Stone over the broad Stone Piers, a great deal of Time and Money would be faved ; and yet, if at any Time hereafter, the Commiffioners thought proper to finifh this Bridge with Stone, (which they did in lefs than two Years after) the Arches might be turned, without pulling down any Part of either thofe Shafts, or of the broad Piers, as it muft have been done, if the broad Piers, had been continued of the fame Breadth, quite up to the Height above High- water Mark.”

Es tal el detalle del libro, que incluso describe todo el procedimiento necesario para realizar la prueba de los cajones y la verificación del lecho marino, mediante el hundimiento del cajón en el emplazamiento definitivo, y su posterior reflotado antes de realizar el hundimiento definitivo.

“The Tides, and all Other Circumftances attending the River Thames, and the Nature of the Ground under its Bed, being duly confidered, the Method of laying the Foundations of the Piers, which I thought moft likely to fucceed, was that which I had the Honour of explaining twice upon working Models, before the Commiffioners, a fhort Account of which is as follows. ' That the Foundation of every Pier fhould be hid on a ftrong grating of Timber, planked underneath. — - That this Grating of Timber fhould be made the Bottom of a Veffel, fuch as is called Caiffon, by the French; (which Term I fhall make Ufe of) That the Sides of this Caiffon, fhould be fo contrived, as to be taken away, after the Pier fhould be finifhed : That the Bed of the River fhould be dug to a fufficient Depth, and made level, in order to lay thereon the Bottom of the Caiffon : That wherever the Ground, under the Excavation, or Pit, fhould prove good, there would be no Neceffity for piling it ; but that in Cafe the Ground under the Foundation Pit, fhould not prove of a fufficient Confiftence, it fhould be piled all over as clofe as neceffary, the Heads of thofe Piles fawn level, clofe to the Bottom of the Pit, and on the Tops of thofe Piles, the Grating, and Foundation of the Pier, fhould be laid as is ufual in fuch Cafes ; and there is no thing uncommon, or very difficult, in perform ing thefe Operations, tho' always attended with a confiderable Expence of Time and Money.”

También expone sus criterios de ahorro, como es la reutilización de la madera de las paredes de los cajones, mediante desmontado y montado del mismo. Se ve igualmente su intención de utilizar un proceso constructivo lo más económico posible al utilizar los cajones lo más bajos posibles, ya que, pese a que el nivel de la marea alta era superior, no les afectaba en la construcción y en cambio permitía grandes economías en la construcción del propio cajón. Se puede apreciar esto en los párrafos siguientes:

“As the Caiffon was purpofely built but 16 Feet high to fave ufelefs Expence, the high Tides flowed fome Feet higher than the Top of its Sides, but without the leaft Damage or Inconveniency to our Works.”

“The Sides of the Caiffon were floated off over the Sides of the Pier on the 30th of March, to ferve the fame Purpofes for the Caiffon of the other large Pier, the Bottom of which was launched off from the Tops of the Frames on, which it was built, on the 11th Day of April; and two Days after, the faid Bottom was laid Level upon the Heads of the Stakes or Piles, which fupported the Frames, in order to receive the Sides which were floated near, and haul'd into their true Place on the 19th Day of April, 1739.”

El primer cajón fue colocado en 1738, y el puente fue inaugurado en 1747; se tardaron 7 años y nueve meses en terminar todos los trabajos.

Figura 25: Cimentaciones puente de Wetsminster [30].

En el siglo XVIII, el libro de referencia fue la *Architecture Hydraulique* de Bélidor [30], en el que se pueden encontrar los planos de cimentación del puente de Wetsminster de la Figura 25.

En el libro III de dicho tratado, se halla el capítulo “dónde se enseña la construcción de todos los trabajos que pertenecen a plazas marítimas “ (*“QUI COMPREND L'ART DE DIRIGER LES EAUX' de la mer & des rivières à l'avantage de la défense des Places du Commerces.: de l'Agriculture.”*) , y en su capítulo XI muestra la forma de cimentar en mar abierto o en los ríos por encajonado en seco (*“De la manière de fonder en pleine mer & dans les fleuves, par encaiffement et à fec.”*)

En este apartado se muestran varios casos de construcción con cajones, sea para la cimentación de un puente (Wetsminster) o bien para la construcción de los diques de Niza y Toulon (Figuras 26 y 27).

Se expone en este libro el procedimiento seguido para la construcción de un muelle y de un dique seco mediante el procedimiento de cajones. A través de las diferentes vistas y secciones del cajón, presenta su construcción, utilizando términos náuticos en lo referente a las diferentes partes del cajón, ya que su construcción se asemeja a la de un buque de la época:

“851 Tandis que l'on étoit occupé à ce travail , on fit des caiffes de charpente d'environ dix toifes (1 toise = 6 pieds) de longueur fur douze pieds de largeur dans œuvre, & de vingt trois pieds de hauteur bien calfatées & enduites de goudron. La Figura 6 représente le plan du bout d'une des caiffes ; la feptième , fon profil coupé en travers ; la quatrième, la partie d'une des faces vue intérieurement ; & la cinquieme , cette même face apperçue extérieurement. A l'aide de ces développemens, où l'on diftingue feniblement les poteaux A, les varangues B, les baux C, les quilles D, le bordage E, les courbes F, & les étréfillons G fervant à fortifier les angles, on aura une idée affez juste de ces fortes caiffes ; leur largeur doit être d'environ quatre pieds de plus que la bafe du mur n'aura d'épaiffeur, afin de ménager un intervalle de deux pieds entre les cloifons , & les paremens de la maçonnerie que l'on veut y élever.”

Figura 26: (plano XXVI) vistas de un cajón con sus componentes [30].

Se percibe también en este libro la importancia de economizar en la construcción ya que exponen también que se recuperarán todos los elementos de madera de las paredes laterales para ser reutilizados en sucesivos cajones. El elemento del fondo se considerará como encofrado perdido.

“Ces caiffes fe font de manière à pouvoir démolir commodément leurs quatre faces lorfque la maçonnerie eft achevée, afin que toutes les pièces de charpente, excepté celle du fond, puiffent fervir encore à former les cloifons d’une autre ; c’eft pourquoi il fuffit de ne faire de cloifons que pour deux ou trois caiffes seulement, afin de n’embraffer à la fois que trente ou quarante toifes d’ouvrage, & de mettre à profit le tems calme qu’au aura pour l’achever entièrement. ”

En el caso de este puerto, se irían construyendo los muros de mampostería y, a medida que el cajón iba ganando peso, se iría hundiendo, hasta llegar al fondo. Una vez terminado es cuando recuperaban los paneles de madera para nuevos cajones. Este es el mismo principio utilizado que en la construcción en cajonero en la actualidad, donde el empuje va compensando el peso de la estructura. En el caso de estos utilizados para construir en mampostería, se recomienda la construcción sin parar, como en la actualidad, aunque esgrimen razones de seguridad, al evitar retrasos en la construcción que podrían ser fatales.

Un sistema similar expone fue utilizado por los Piemonteses en el puerto de Niza, donde utilizaron cajones cuadrados contiguos de 7 toesas de lado (13,64 m) y una profundidad de 33 pies (10 m). (Figuras 2 y 4 de plancha XXII – Figura 27)

Figura 27: Planos de diques de Niza y Toulon [30].

Para la construcción del dique seco de Toulon se utilizaron cajones flotantes que se hundían progresivamente a medida que se iban construyendo nuevas hiladas del muro de mampostería; este equilibrio entre peso del cajón y su flotación es el mismo sistema que se utiliza actualmente en la construcción de cajones sobre diques flotantes. Las paredes de madera de dichos cajones se construyen de forma y manera que puedan ser retiradas fácilmente una vez terminado el muro y se pueden así reutilizar. Sólo quedaría como encofrado perdido en la zapata la base del cajón, por lo que tan sólo sería necesario disponer de paredes de madera para dos o tres cajones, con el consiguiente ahorro de materiales en la ejecución de la obra.

En el Volumen I del tratado de Cessart "*Description de Travaux Hydrauliques*" , se puede encontrar otro ejemplo de construcción con cajones, en este caso el de las cimentaciones de las pilas del puente de Saumur (Figuras 28 y 29) [31]. Se pueden ver en las figuras las diferentes fases del proceso de botadura, remolcado y hundimiento del cajón en su emplazamiento. Es especialmente interesante la técnica de balanceo del cajón para su introducción en el lugar deseado, técnica que viene explicada en el libro.

Figura 28: Proceso de botadura y colocación de cajones en puente Saumur [31].

Figura 29: Detalle constructivos cajón de Saumur [31].

En la traducción al español del libro de John Muller, Tratado de Fortificaciones [32], en su tomo segundo, parte IV (“De las obras que se construyen en el agua”), podemos encontrar una descripción

pormenorizada del “Método para fundar en el agua con cajones”, dónde se explica desde la forma de amarrado y remolcado del cajón hasta su emplazamiento definitivo, hasta la forma en que deben proceder los albañiles en la construcción del cajón . Al igual que el anterior, este libro hace también referencia a la obra de Charles Labelye, y emplaza a visitar la obra de dicho autor para conocer con mayor detalle la técnica de construcción con cajones.

A continuación, se ofrece una descripción de la construcción del cajón:

“Arreglado el fondo de la excavación, fe prefento fobre ella el encaxonado, afegurandolo en fu debida poficion, por medio de diverfos cables, y maromas con que fe amarro a las Eftacas o Pilotes inmediatos. Defpues de efta maniobra, afentaron los Albañiles dentro del Caxon la: 'primera hilaa de Piedra, que confití ...

tuye la bafe del CimientO; y concluida, al tiempo que las aguas fe hallaban en fu mayor menguante, - Ce abrio una pequeija compuerta, fabricada en las paredes del mifmo Ca- . xon, para que todo fe fuefe al fondO; en cuyafituacion.fe volvi6 a 'examinar fi la Obra quedaba de nivel.”

Es de destacar el comentario en el que se dice que desmontan y reutilizan el cajón, así como el párrafo en el que dan diferentes recomendaciones de utilización de cajones, en función que el fondo sea de roca, o bien que se trate de grandes profundidades. Alerta además sobre los posibles problemas de durabilidad de la madera y de la “broma”, que ya hacía en la época gran mella en los buques de madera.

Por tanto, en este período, no sólo cada vez hay mayor grado de detalle en los planos, sino también en las explicaciones y justificaciones de la obra. Además, van un paso más allá y se permiten críticas, recomendaciones y propuestas, de manera que se pueda seguir evolucionando y optimizando el sistema.

Otra prueba de la importancia de esta tecnología ya en esa época, es la mención que hace la Enciclopedia de Diderot y D’Alembert [33] , obra cumbre que reunía el saber de su época. En su acepción “*Charpente*” se hace eco del sistema mediante la presentación de una lámina en la que se aprecia un cajón que servirá como cimentación de un puente (Figura 30). Tal y como reza en el subtítulo, es una gran caja para la construcción de pilas de puentes.

Figura 30: Charpente[33].

Pero no toda la documentación de la que se dispone son proyectos que vieron la luz, en algunos casos se concibió inicialmente la solución en cajones, pero por diversas razones luego no vieron la luz. Es el caso de la ampliación del puerto de San Sebastián en 1773 (Figura 31), diseñada por Pedro de Lizardi y posteriormente revisada por Julián Sánchez Bort, discípulo del insigne navegante y cartógrafo Jorge Juan. Estos planos, se guardan actualmente en el Archivo General de Simancas, primer y más antiguo archivo oficial de la Corona de Castilla.

Figura 31: Planos del dique de ampliación mediante cimentación con cajones [34].

Hubo otros casos, que sí que fueron ejecutados, pero no siempre con unos resultados óptimos. Diversas vicisitudes sufrió el dique de la Rada de Cherburgo, emplazamiento estratégico para los intereses de la corona de Francia. El rey de Francia Luis XVI encargó un dique en dicha localidad, de manera que se creara una dársena que permitiera albergar la totalidad de la flota que invadiera Inglaterra. El proyecto inicial fue redactado por Cessart [31], y en él se conformaba el núcleo del dique mediante 90 conos de madera de 20x20, que se hundirían y rellenarían con escolleras (Figura 32). Este proyecto contó con la oposición y diseño alternativo de La Bretonnière, que proponía el hundimiento de barcos para la realización de la cimentación del dique. Como ya se sabe y ha quedado evidenciado a lo largo del texto, ambos procedimientos, ya gozaban de amplios antecedentes históricos.

Figura 32: Rada de Cherbourg Cessart [35].

Los primeros conos fueron destruidos por un temporal, y más adelante, la obra no resistió, por lo que Napoleón Bonaparte decidió retomar la obra según el sistema de La Bretonnière, después de la Revolución Francesa de 1789. El dique se terminó 70 años después de su comienzo y tras varias interrupciones, en 1853, ya bajo Napoleón III. Sobre este proyecto se encuentra amplia documentación gráfica en el libro de Cessart publicado a principios del S.XIX [31] y en el que muestra el proceso constructivo de los conos, así como el proceso de remolcado, amarrado y hundimiento.

Igualmente se encuentran unas fabulosas láminas de Wiebeking con planos de las cajas cónicas utilizadas en el puerto de Cherburgo (Figura 33).

Figura 33: Rada de Cherburgo, Wiebeking [36].

Son un deleite otras láminas del propio Wiebeking en las que aparece la tipología de cajones, dentro de su prolífica obra de láminas sobre obras marítimas (Figura 34).

Figura 34: Perspectiva cajón para Toulon sobre pontona [25].

En el nuevo mundo, también hubo una tentativa de construir en Cartagena de Indias, en el estratégico cierre de Boca Grande un dique con cajones, por el Ingeniero Ignacio Sala, pero su propuesta no fue retenida y se prefirió otra opción. Este ingeniero, ya había puesto en práctica la solución en Cádiz, en la construcción del muelle de San Felipe. De este muelle, además, hay constancia de la resistencia de la solución según planos que lo acreditan, ya que una parte del dique sufría avería por temporales, permaneciendo los cajones en su emplazamiento, como lo acredita la auscultación a lo largo de los años.

Se presentan en primer lugar algunos planos del ingeniero Ignacio Sala del muelle de San Felipe de Cádiz (Figura 35). Se encuentran ya varios planos con las cimentaciones de dicho muelle de San Felipe, así como los perfiles de la obra realizada en el año 1731.

Figura 35: Planos muelle San Felipe en Cádiz [37, 38] .

En Cartagena de indias, el ingeniero Lorenzo Solís también utilizó la solución de cajones [39], entre los años 1753 y 1759 utilizando 60 cajones flotantes rellenos de piedra y fajina, pero fue infructuoso al destruir la broma la madera, desmoronándose. Dicha solución aparece descrita en el plano del

Ingeniero Antonio de Arévalo en los planos del cierre de la otra boca, el cierre de Bocachica (Figura 36).

Figura 36: Planos proyecto cajones cierre Boca Chica Cartagena de Indias [40].

2.6 La Revolución Industrial: Cajones Metálicos

La Revolución industrial avanza, buscando optimizar procesos y utilizar nuevos materiales cada vez más resistentes y menos costosos, y la industria de las construcciones portuarias no es ajena a estas innovaciones. La gran necesidad de ampliaciones de puertos en España en el Siglo XX hará que sus constructoras desarrollen técnicas muy avanzadas a nivel mundial, optimizando sobremanera los rendimientos y los costes, y fabricando cada vez cajones de mayor tamaño.

En el Congreso de Navegación de Milán de 1905 [41] ya se mencionan los lugares donde fueron utilizados los cajones metálicos por primera vez, como son las obras de reparación del puerto de Madrás en la India , Bizerta , Zeebrugge y en la ampliación del puerto de Bilbao.

La primera experiencia en este tipo de cajones se halla en la reparación del puerto de Madrás en 1893; se utilizaron en el morro del dique cajones metálicos cilíndricos de 12 metros de diámetro y más de 12 metros de altura [42]. Estos cajones se componen en las paredes y en el fondo de planchas de hierro de 6 milímetros de espesor; dichas paredes están reforzadas por nervios formados por vigas de celosía, colocadas tanto en dirección horizontal como vertical. No obstante, no hay que olvidar que los espacios vacíos de dicho cajón se rellenaron de hormigón (dentro de las capacidades de resistencia del acero) [43]. En la Figura 37 se pueden apreciar los planos de dichos cajones.

Para proceder a su hundimiento estaba dotado de 4 válvulas de compuerta, y posteriormente se fue rellenando con varias tongadas de hormigón, para a continuación, en su emplazamiento definitivo, rellenarlo de bloques de hormigón y en última instancia solidarizar el conjunto mediante el vertido de hormigón para rellenar los huecos. Una vez relleno este cajón, su peso era de 5.500 toneladas, y fueron necesarios 6 meses para concluir su construcción.

Figura 37: Cajón metálico Madrás (1893) [42].

Según se expone en un ejemplar de la Revista de Obras Públicas de 1907 [44], se construyeron en la ampliación del puerto de Zeebrugge cajones formados por un armazón metálico, reforzado con hormigón . Se construyen por tanto en seco grandes cajas metálicas que componen el refuerzo de dichos cajones, actuando como armaduras exteriores. Las cajas no quedarán totalmente rellenas de

hormigón, sino que se utilizará éste para dar suficiente peso y resistencia al conjunto. Una vez hundido el cajón se procederá a agotar el agua y rellenar con hormigón. Estos cajones tenían una longitud de 25 metros, un ancho entre 7,5 y 9 metros, para una altura de 9 metros (Figura 38). Las paredes de chapa de 3 mm estaban reforzadas por hormigón, y el cajón disponía de unos refuerzos transversales en hormigón para asegurar la rigidez de éste.

Finalmente, en lo que se refiere al relleno, a diferencia del caso de Bilbao, en estos cajones se rellenó mediante hormigón sumergido, una vez el cajón fondeado en su posición definitiva.

Figura 38: Plano cajones de Zeebrugge [45].

Se encuentra también una sección del dique de Zeebrugge (así como otra del puerto de Bilbao) en una publicación de la Society of American Military Engineers (SAME) publicada en 1915, como se puede apreciar en la Figura 39 [46].

Figura 39: Sección cajón Zeebrugge [46].

Es interesante el comentario que aparece en este libro en cuanto a la evolución hacia los cajones de hormigón en la tecnología de cajones : *“ it is self-evident that floating concrete caissons were, as already stated, , simply a step in advance of floating iron concrete caissons, a step that would naturally follow with a wider development of uses of concrete”* [46].

También afirman, que, si bien la concepción de los cajones de hormigón armado se originó en América, su primer uso práctico se llevó a cabo en España, en el puerto de Barcelona, y se expuso en el Congreso de Navegación de Milán de 1905.

En lo correspondiente al puerto de Bilbao, fue el ingeniero Evaristo de Churruca (al que Alfonso XIII le concedió el título de Conde de Motrico por la labor desempeñada en la construcción del Puerto Exterior de Bilbao, y en memoria de su tío Cosme Damián Churruca, héroe de la batalla de Trafalgar e insigne navegante) quien lideró la construcción en cajones metálicos.

Tras la avería sufrida en un temporal por el dique exterior del puerto de Bilbao, Churruca optó como medida más económica por construir un nuevo dique, protegido por el antiguo, y que estaría conformado por cajones metálicos [47]. Se utilizó esta solución en 1895-1896 ya que el sistema tradicional de escolleras había sufrido graves averías en el dique en los temporales acaecidos durante su construcción (Figura 40).

En palabras del ingeniero Churruca, con este sistema: *“se hizo una importante modificación en el sistema de construcción de la superestructura, empleando grandes cajones de hierro, que en ninguna obra de esta clase se han empleado hasta ahora, y que si bien aumentará bastante el coste de la misma, reducirá notablemente los gastos de conservación que con arreglo al sistema primitivo hubiera tenido, y facilita mucho su ejecución”*.

Los cajones tenían unas dimensiones de 13 metros de longitud, por 7 de ancho y 7 de alto, y estaban asentados a una profundidad de 5 metros [42], pesando estos cajones tan sólo 28 toneladas y siendo lastrados en el agua con una tongada de hormigón de 1,5 metros de altura.

Figura 40: Planos del nuevo dique de Bilbao con cajones metálicos [47].

Para proceder al llenado de agua del cajón, se utiliza una bomba de agua suspendida de una grúa titán (Figura 41), complementado por una compuerta alojada en el cajón. Finalmente se termina el relleno del cajón mediante bloques cúbicos de 30 m³ de hormigón, rellenándose los huecos con hormigón. De esta manera, cuando el hierro se oxide por efecto del mar y del tiempo, el bloque interior será sólido y homogéneo. Se estimó en este caso que la cuantía del hierro era de 44 kg por metro cúbico de hormigón.

Figura 41: Trabajos de desagüe del cajón [48].

Volviendo al libro de Society of American Military Engineers [46], mencionan también casos en otros lugares, además de los más conocidos por todos.

Así en Rotterdam en 1905 se utilizaron cajones para la reconstrucción de los muros de un muelle.

Se realizó una primera fase de la reparación mediante 6 cajones, siendo las dimensiones del primero de ellos de 75 pies de eslora, 18 de manga y 4,5 de profundidad. Debido al éxito obtenido en esta primera fase, se reparó la totalidad del muro mediante 5 cajones adicionales de 120 pies de eslora y 30" de manga. Desde entonces se construyeron en Rotterdam gran número de muelles mediante el procedimiento de cajones flotantes de hormigón.

En Dinamarca también se utilizaron cajones en el puerto de Norre-Sundby.

En Francia en el año 1909 ya se encuentra un ejemplo de construcción de un cajón singular, que sería utilizado como estación de prueba de torpedos cerca de Toulon en Francia (Figura 42).

Figura 42: Cajón para estación de torpedos, Toulon-Francia [46].

Este cajón tenía en su base unas dimensiones de 77 pies de largo y 55 de ancho, por una altura de 51 pies y fue construido en un dique seco [46].

Pero no es el único caso en Francia, ya que hay más ejemplos, como la realización en París de las cimentaciones para un puente de ferrocarril, mediante 4 cajones de hormigón armado.

En la construcción del dique Oeste de Le Havre también se utilizaron cajones, esta vez con unas dimensiones de 82 pies de eslora, 19,68 de manga y una altura de 18,86 pies.

Se encuentran ejemplos incluso en el norte de África: en Egipto se construyó en 1911 un faro de hormigón armado (Figura 43) tal y como se venían construyendo los cajones de hormigón armado, y se remolcó hasta su emplazamiento definitivo a 4 millas de su lugar de construcción. Este proceso recuerda a las láminas de Taccola con el transporte de torreones construidos en tierra, flotando hasta su emplazamiento definitivo. La totalidad de la estructura tenía un peso de 1.700 toneladas.

Figura 43: Botadura del cajón para Torre de Faro, Alejandría-Egipto [46].

Hay igualmente ejemplos en Italia (Génova), Rusia (construcción de dique en el puerto de Touapsé en el mar Negro), donde los cajones tenían una eslora de 56 pies.

2.7 Interacciones con la industria naval

2.7.1 Diques Flotantes

A finales del siglo XIX, las crecientes necesidades de construcción, y, sobre todo, de mantenimiento de los buques a lo largo y ancho del globo, precisaban de un aumento de los emplazamientos adecuados para la reparación de buques, principalmente con usos militares. Esta necesidad llevó a la construcción de enormes diques flotantes, que permitiesen la reparación y mantenimiento de naves de guerra allá donde los conflictos o las colonias lo requiriesen. Por ello se desarrolló toda una tecnología de diques flotantes, y en el año 1896 [49] , aparece un listado de ubicaciones y características de diques y varaderos (Figura 44); se contaban 116 diques flotantes . El de mayor eslora, 283 metros, era un dique flotante en el puerto de Birkenhead, en Gran Bretaña. Este caso era muy excepcional, pero en cambio había varios diques flotantes en torno a los 140 metros de eslora admitiendo barcos de unas 5.000 tn de desplazamiento.

Figura 44: Libro de diques y varaderos, Biblioteca del Museo Naval (Madrid) [49].

En Floating docks [50] de Lyonel Edwin Clark (Figura 45) se describen las diferentes tipologías de diques secos flotantes, y su motivación principal es la exposición de la fiabilidad y robustez del sistema: “*the floating dock is nowadays no longer a makeshift, but is a thoroughly reliable machine*”. Los diques Clark eran los más perfeccionados y de mayor renombre de la época, referencia indiscutible en este tipo de diques.

Se enumeran sin entrar en detalle los diferentes tipos de diques flotantes que se contemplan en el documento de Clark:

- Box Dock
- Sectional Dock
- Sectional Pontoon Dock
- Havana Dock
- Bolted Sectional Dock
- One sided Dock: “Depositing” Type
- One sided Dock: “Off shore” Type
- One sided Dock: “Combined” Type

Figura 45: Dique flotante del tipo One sided dock, depositing type [50].

Entre las tipologías que muestra está la denominada “One sided dock : Depositing type “ (Figura 45) utilizada por primera vez por el Almirantazgo ruso en Nicolaieff en 1876 con claras similitudes al utilizado en la construcción de los cajones del puerto de Kobe en Japón y al dique Deponente de Barcelona (Figuras 46 y 47) [51-53].

Figura 46: Maqueta dique deponente, Museo Naval de Madrid (Foto del autor).

Figure 47: Dique deponente Clark Barcelona.

Figura 48: Modelo de dique flotante Base de submarinos Cartagena (1924-1974), Museo Naval de Madrid (Foto del autor).

La utilización de los primeros diques flotantes conocidos por el autor se remonta a 1866, siendo uno de los más destacables el de Cartagena (con 100 metros de eslora y pudiendo levantar 6.500 tn) que comenzó a funcionar en 1859 (Figuras 48 y 49).

Figura 49: Dique flotante arsenal de Cartagena [53] .

El más grande dique flotante al que hace mención tiene una capacidad de izado de 18.000 tn, para una eslora de 525 pies (160 m) en Nueva Orleans.

A continuación, se presentan los planos del dique deponente de Barcelona que aparecen en la memoria de dicho puerto del año 1902, dique que realizó su puesta en servicio en el año 1882 (Figuras 50 y 51).

Figura 50: Plano general dique deponente de Barcelona [54].

Figura 51: Elevación longitudinal dique deponente Barcelona [55].

La construcción de cajones gozó (y lo sigue haciendo) de un importante aliado en los diques flotantes, ya que facilitaban de manera importante la puesta a flote de unos cajones de cada vez mayores dimensiones y con procesos constructivos en seco más complejos, al precisar de armadura para el hormigón y encofrados. Los cajoneros actuales funcionan de la misma manera que los diques flotantes que permitían el carenado y reparación de los buques desde finales del siglo XIX.

2.7.2 Sistema Syncrolift

Actualmente, además de la utilización de los tradicionales diques secos o rampas de varada para la construcción y botado de buques, así como los diques flotantes que se continúan utilizando, existen otras soluciones que dotan de mayor versatilidad a los astilleros a la hora de aprovechar sus superficies.

Uno de ellos es el denominado Syncrolift, que es un sistema de desplazamiento de grandes cargas mediante railes y gatos hidráulicos, que permiten desplazar los buques hasta una plataforma que bajando de nivel se hundirá en el agua permitiendo así el botado del buque de una manera sencilla (Figura 52).

Este sistema permite el desplazamiento de enormes buques, y supone un gran ahorro de espacio para los astilleros, además de evitar la construcción de los costosos diques secos. Se trata de una plataforma articulada formada por vigas transversales, según su definición por el fabricante:

“A ship lift consisting of an articulated platform: a series of transverse beams supported on each end by electro-mechanical hoists and connected longitudinally by non-rigid structural members. The platform is raised and lowered by a large number of synchronised wire drum winches arranged on each side of the dock. It is a relatively simple task to add length to the platform and only slightly more complex one is to add intermediate beams to increase the capacity. The platform is handled by a heavy rail system and accommodated in its own dock. The Syncrolift shiplift system was invented in 1954 by Raymond Pearlson, the founder of Syncrolift Inc.”

Existen ejemplos de este Sistema con capacidad de desplazamiento máximo de 23.320 tn y una eslora de 188 metros.

En cuanto a los mayores cajones que han utilizado este sistema, son los cajones del Consorzio Venezia Nuova, para los que se utiliza una plataforma syncrolift de 70 metros de largo y 50 metros de ancho (Figura 53), para desplazar cajones de 22.500 tn utilizados en la barrera de Malamocco.

Este sistema además es mucho más rápido que el de un dique seco.

Figura 52: Sistemas de botadura de barcos [56].

Figura 53: Cajón del sistema MOSE sobre los raíles del Syncrolift [57] .

2.7.3 Otros sistemas: desplazamiento neumático

Siguiendo con las analogías con el mundo naval, recientemente, en las obras de ampliación del Puerto Autónomo de Abidjan por la empresa China CHEC, los cajones construidos en tierra se desplazaron mediante un sistema de rodillos neumáticos hinchables (Figura 54), tal y como se desplazaban sobre camas de troncos los barcos varados en las playas desde hace siglos.

Figura 54: Desplazamiento de cajones en Puerto Abidjan mediante cilindros neumáticos [58] .

2.8 Cajones de hormigón

Tras las experiencias con cajones metálicos, ya en las postrimerías del siglo XX comenzaron a construirse los cajones en ese material que ya se llevaba algún tiempo utilizando: el hormigón armado. Se repasará en este capítulo la evolución de los cajones de hormigón armado a lo largo del siglo XX y lo que llevamos de siglo XXI, a través de gran número de ejemplos, muchos de ellos muy conocidos y representativos. La lista de diques realizados con cajones de hormigón armado es ya muy larga, por lo que se intentará mostrar con exhaustividad un máximo de ejemplos característicos, pero en ningún caso se aspira a poder exponer aquí todos los diques realizados con cajones de hormigón armado. Sí que se introducirán ejemplos de diferentes países de manera que se pueda apreciar la internacionalización de esta tecnología y su uso muy extendido. Se repasarán también las diferentes técnicas constructivas que se están utilizando, tanto en seco como curando el hormigón con el agua de mar.

2.8.1 Evolución en el S.XX

En el puerto de Barcelona, y conocida la experiencia con cajones metálicos de los puertos de Bizerta, Zeebrugge y Bilbao, el Ingeniero director de las obras, don Carlos Angulo, se inspiró en esta tecnología para resolver los problemas constructivos que él tenía en la ampliación del dique del Este del Puerto de Barcelona [59]. Se modificó la sección tipo existente para adaptarla a la solución con cajones en enero de 1904 comenzando seguidamente con la construcciones de dichos cajones. Los cuatro primeros cajones experimentales se construyeron en el año 1905, y una vez convencidos de su idoneidad y menor coste que las soluciones habituales, se buscó la industrialización del proceso [59], para construirse de una manera más ágil y eficiente desde 1906. Las obras se prolongaron varios años, y los cajones se construyeron en seco sobre el dique deponente propiedad del puerto de Barcelona, del que ya se ha hecho mención. Inicialmente las dimensiones de los cajones fueron de 18,60 metros de eslora, 6 de manga y 7 metros de altura, pero se llegaron a construir cajones de hasta 25 metros de eslora [60]. Este proceso constructivo fue presentado internacionalmente en el IX Congreso de Navegación de Milán en 1905 [41] y en el X Congreso de Navegación de San Petersburgo en 1908 [45].

En las figuras a continuación se pueden ver los planos originales y la sección tipo modificada, así como los planos de los cajones finalmente contruidos (Figuras 55 y 56).

En las fotos se puede apreciar también un momento de la construcción en seco del cajón sobre el dique flotante deponente, y el remolcado de uno de los cajones, así como una vista del avance del dique del Este (Figura 57).

Figura 55: Plano original (izda) y modificado con cajones (dcha) [59].

Figura 56: Planos de detalle de los cajones contruidos [59].

Figura 57: Construcción en seco sobre dique deponente (Izda) y remolque hasta fondeo del cajón (Dcha) [59].

En el otro extremo del planeta y casi simultáneamente, utilizando un dique flotante muy similar, se procedía en las obras de ampliación del puerto de Kobe en 1906 a la construcción de cajones trapezoidales de hormigón con unas dimensiones de 35,85 metros de eslora, un puntal máximo de 12,65 metros y una manga media en la base de 10,80 metros. Estos cajones se fabricaban en 3 meses [52]: “ Estos cajones-bloques se construyen en la orilla, se elevan y arrojan por un dique flotante especial, remolcándolos después y llevándolos a su sitio, donde se descenden al fondo y se rellenan de hormigón” (Figura 58).

El sistema no es muy diferente del utilizado hoy en día, todo en la misma plataforma. El proceso de fabricación y flotación era novedoso, ya que se procedía a fabricar el cajón sobre una plataforma cimentada en pilotes, de manera que el pantalán flotante fabricado por los talleres de construcciones navales Kawasaki de Kobe, viniese a tomar por debajo el cajón (como si de una carretilla elevadora tomando un palet se tratase), y llevárselo sobre esta plataforma flotante hasta un lugar con la profundidad adecuada donde permitir el hundimiento del pantalán y dejar a flote el cajón.

Figura 58: Sistema de plataforma sobre pilotes para fabricación del cajón y pontón para puesta en flotación del mismo. Puerto de Kobe, Japón (1906) [52].

Como nuevo sistema que era, no todo el mundo era favorable a esta técnica. Concretamente, en el Congreso de Navegación de San Petersburgo se hace mención a la poca seguridad que les daba a algunos técnicos en hormigón el contacto con el agua de mar, por lo que tenían sus reticencias al sistema [45].

Este congreso fue muy rico en ponencias sobre la construcción con hormigón armado en obras marítimas, y se muestran gran número de ejemplos de la aplicación de este material, siendo uno de los casos importantes el de la construcción de cajones. Por ello analizaron en el momento de la conferencia, todos los proyectos en construcción o en preparación con dicha técnica. Para muchos de ellos la referencia era la construcción de cajones en Barcelona, pero se encuentran en los textos toda

una serie de emplazamientos donde se han utilizado cajones y que no son excesivamente populares. Se enumeran los que allí aparecen, ya que, dado el momento inicial de esta tecnología en hormigón armado, parece importante tener en cuenta todas las referencias a las que se dio publicidad en este congreso. Los lugares en que se construyeron o en los que se esperaban construir cajones son los siguientes:

- **FRANCIA:**

Hay ejemplos en el puerto de Marsella (1902-1903) se utilizaron pequeños cajones en la dársena de la Pineda.

En el puerto de Dieppe, mediante cajones de hormigón armado hincados en el suelo se realizaron los diques. Estos diques iban revestidos in situ por un muro de mampostería. Se preveía que los nuevos diques a realizar en Dieppe se construyeran también con cajones de 7 metros de altura y 8 metros de ancho.

- **ARGELIA:**

En el puerto de Tenes se comenzaron a utilizar cajones, que se preveía fuesen un encofrado perdido, ya que en la época consideraban que el cajón no era más que el envoltorio provisional y era previsible que desapareciera. Un accidente independiente del sistema constructivo terminó con el ensayo.

En el puerto de Dellys (1906-1907) se realizó el dique mediante hormigón vertido en encofrados de madera (al más puro estilo romano). En una segunda fase, en ejecución aún en las fechas del congreso, se utilizaron 10 cajones de hormigón armado de 8 metros de eslora y 5 de ancho, que posteriormente serían rellenados de hormigón.

- **RUSIA:**

En Rusia, país sede del congreso, también se exponen varios casos de construcción con cajones, y se incluyen en las ponencias planos de dichos ejemplos.

Uno de ellos es en Touapsé, al borde del mar negro, donde se utilizaron cajones sobre escollera, siendo estos de 4 dimensiones diferentes. Dichas dimensiones se presentan en una unidad pintoresca en la actualidad, los “sagènes”¹. Las esloras son de 8 sagènes, para una altura de 3 sagènes. Las alturas por su parte son de 6,12,19 y 223 pies ingleses, siendo el mayor cajón de 268 toneladas y, una vez relleno

¹ La sagène (ou sajène ; en russe : сажень) est une ancienne unité de mesure russe.Elle équivalait à 3 archines, ou encore à 12 tchetverts.Depuis un oukase de Nicolas Ier du 11 octobre 1835, la longueur de la sagène a été fixée à 7 pieds anglais (6 pieds français), soit sensiblement 2,1336 mètres.Avec les autres unités traditionnelles russe la sagène est abolie en 1918.(Wikipedia)

de hormigón, de 1600 toneladas. Se proponen dimensiones de cajones que se consideran las adecuadas para las condiciones de oleaje del Mar Negro (Figura 59).

Dado lo novedoso del sistema, se comenzó por la construcción de un dique de menor entidad (420 metros de longitud) en el mismo puerto, en zonas con profundidades de un máximo de 8 metros. Las dimensiones de estos cajones alcanzaron los 16 metros de eslora, 6,4 de manga y una altura 6,50 metros. Con objeto de conseguir el peso suficiente en dichos cajones, las celdas exteriores se rellenarían de hormigón, y las interiores con material granular.

En este congreso, no obstante, Alexandre Nikolsky afirma que dicho procedimiento no tiene mucho futuro, ya que la fuerza del oleaje irá erosionando el hormigón hasta llegar a destruir el cajón en plazo no muy largo. Así, consideran el cajón de hormigón como un procedimiento adecuado por su rapidez y economía para las obras provisionales del dique, pero siendo la estructura que protegería la ejecución y soportaría la definitiva del dique. Afirman, además, que hay que reducir los muros interiores que separan el cajón en celdas, ya que estos muros representan una zona de fragilidad para la estructura del cajón. En sus conclusiones, y debido a que, según su consideración “dado que el mortero de cemento será inevitablemente destruido por el agua de mar, sólo se podrá utilizar el hormigón armado si las partes sumergidas sólo han de durar un pequeño período.”

Figura 59: Sección Del cajón de Touapsé [45].

Se presentan a continuación las secciones de cajones expuestas en este Congreso para los casos rusos (Figuras 59 y 60). (Conferencia : Application du Béton Armé aux constructions hydrauliques, P. Vosnessenski).

Figura 60: Secciones de cajones en Rusia [45].

Se inventan sistemas que permiten fabricar cajones más grandes cada vez y más rápido, la carrera tecnológica de los cajones ya está totalmente lanzada. En el siglo XX hay muchos casos dignos de mención, se resaltarán los más significativos que hayan aportado alguna innovación a la tecnología.

Un claro ejemplo de estructuras cada vez mayores y más ambiciosas es la del dique seco del puerto de Cádiz, comenzado a construir en el año 1929 [39]. Las restricciones de tamaño de los diques flotantes de la época llevaron a descomponer en cajones de sección en U de hormigón armado de unas dimensiones de 53 x 17 x 6,50 y 3200 tn de desplazamiento que fueron posteriormente unidos a otros bloques (Figura 61) y remolcados hasta su emplazamiento definitivo donde fueron hundidos.

El proyecto de los cajones fue del Ingeniero Ribera; Eduardo Torroja realizó el cálculo justificativo del hormigón armado. Las dimensiones eran ya enormes, y se iban superando récords sin parar.

Figura 61: Remolcado de elementos en U para dique seco de puerto de Cádiz, todavía hoy en uso [39].

En ese mismo año, se adjudicaba en el puerto de Rotterdam la ejecución de los muelles de la dársena de Merwehaven (Figura 62). Es de destacar que para la construcción de estos cajones se habilitó toda una zona de prefabricación (Figura 63), en la que, mediante un sistema de plataformas flotantes de hormigón, se iban construyendo los cajones. Así en las primeras fases se trabajaba con el cajón sobre la plataforma, que se iba hundiendo con el peso de éste (se fabricaba en 6 etapas: losa y 5 fases de

2,85 m de altura de hormigonado en cajón de 12 m de alto). Tras poner a flote el cajón se terminaba en un emplazamiento contiguo, empleando unos sistemas con puentes grúa por los que también accedían los trabajadores. Se producía aproximadamente un cajón de 40 metros de eslora por semana [61].

Figura 62: Secciones de los cajones puerto de Rotterdam [61].

Figura 63: Zona de prefabricación Merwehaven [61].

Seguían aumentando los tamaños de los cajones, y, en la Segunda Guerra Mundial, la necesidad de construir para el desembarco de Normandía sendos puertos en un tiempo récord, así como la carencia de acero debido a la guerra, llevó a construir en Gran Bretaña enormes cajones de hormigón en diques secos.

Dado que el puerto de Cherburgo, mencionado anteriormente, estaba fuertemente protegido por los alemanes, era necesario un puerto para permitir el desembarco de las tropas y materiales, siendo necesario construirlo en el menor tiempo posible. Esto se consiguió hundiendo dichos cajones de

hormigón en los Arromanches y Saint Laurent Sur mer; se fabricaron en 8 meses 230 bloques en Inglaterra, por un equipo de ingenieros ingleses y americanos, siendo el mayor cajón de una longitud de 60 metros y 20 metros de altura.

El nombre en clave de estos puertos artificiales fue “Mulberry” y fue una de las mayores hazañas de la Segunda Guerra Mundial. No había elección, ya que se necesitaban puertos para llevar a cabo la invasión, y como los existentes estaban muy protegidos, había que construirlos.

Ya muy pronto se dieron cuenta de esta necesidad, y Winston Churchill redactó el “Pliego de Condiciones” de dichos puertos, como se puede ver en su carta de mayo del 1942 (Figura 64).

Figura 64: Carta de Winston Churchill exponiendo características de los puertos a fabricar (Foto del autor, exposición temporal Danish Architecture Center).

De hecho, Churchill ya conocía esta tecnología ya que en Julio de 1917 (en la Primera Guerra Mundial) había sugerido en un Memorándum para Lloyd George, Primer Ministro de Reino Unido, la construcción de cajones de hormigón para facilitar la invasión de las islas Frisias:

“construction of a number of flat bottomed barges or caissons, made not of steel but of concrete”, estos elementos podrían flotar estando vacíos y ser remolcados para su hundimiento en Horns Reef [62].

Se sabe, además, que también se utilizó la antigua técnica de hundimiento de barcos, el mismo día D del desembarco, los denominados gooseberries, para crear una primera protección, previa a la de los

cajones Phoenix (Figura 65). Se comprueba pues que la historia es cíclica, se repiten conceptos, guerras ... Julio César, Richelieu, La Guerra mundial ... lamentablemente demasiadas referencias bélicas que muestran los hitos en la evolución de las tecnologías.

Figura 65: Cajones Phoenix [63].

En el archivo fotográfico del **Imperial War Museum** se pueden encontrar imágenes de la construcción de dichos diques, como se puede observar en las imágenes a continuación (Figuras 66-68).

Figura 66: Fabricación de los cajones Phoenix en dique seco [64].

Figura 67: Construcción de cajones Phoenix [65].

Figura 68: Vista aérea Mulberry Arromanches [66].

Pasando ya a usos civiles, en España se seguían acumulando experiencias en la construcción de cajones de hormigón, industrializando el proceso y buscando técnicas para optimizarlo.

En el puerto de Pasajes, en el año 1958, se construyeron 65 cajones de hormigón de una altura de 16 metros, longitud de 17,25 metros y un ancho de 8,50 metros. El montaje de un taller de construcción de cajones permitió la botadura de dos cajones por mes (Figura 69) [67].

Figura 69: Imagen y alzado del taller de construcción de cajones en el puerto de Pasajes [67].

Toda esta evolución conduce hasta a las modernas técnicas de construcción de cajones de hormigón, en las que, mediante la utilización de diques flotantes, se pueden construir cajones de muy grandes dimensiones, como es el caso del cajonero Kugira de Acciona, que en un plazo de diez días puede fabricar cajones de hasta 68x38 y 21 metros de calado (hasta un máximo de 65x35x37), fabricándose de manera continua desde que se comienzan hasta su finalización (Figura 70). Se entrará en mayor detalle en el apartado correspondiente a la técnica de construcción de cajones sobre cajoneros.

Figura 70: Proceso constructivo de dique con cajones y cajoneros Acciona (cortesía de Acciona) [68].

En la historia reciente de los cajones, han sido Italia, Japón y España los países que más ejemplos tienen de construcción en esta tipología, por lo que se prestará especial atención a los inicios en estos tres países.

El arranque de esta tecnología **en Italia** se produjo en los años 1925-1927, con algunos trabajos menores en los puertos de Nápoles, Génova y Capri, aunque aparecen también referencias en Alghero (1915) y Civitavecchia (1931-1936); pero, el desarrollo de esta tecnología se dio principalmente después de la Segunda Guerra Mundial [69, 70].

Pese a ello, existe el llamativo ejemplo del puerto de Génova, en el que fueron fabricados 42 cajones en 1938 que no pudieron ser instalados en su emplazamiento definitivo debido al comienzo de la Segunda Guerra Mundial. Estos cajones fueron reflatados y recuperados después del conflicto en óptimas condiciones, y reutilizados para conformar el relleno del aeropuerto de Génova [69].

Hay numerosas referencias en Italia en cuanto a diques y muelles realizados con cajones, y se encuentran numerosas también con formas singulares, como cajones perforados para mitigar los efectos de reflexión del oleaje.

En Japón, comenzaron con los cajones de hormigón en el puerto de Kobe a principios del siglo XX, y no dejaron de utilizar esta tecnología hasta nuestros días, desarrollando gran número de soluciones (Figura 71). En 1994, había en este país 800 km de rompeolas, la mayoría contruidos mediante el sistema de cajones, estando asociados a profesores como Hiroi, Mitsoyashu, Tanimoto, Goda o Takahashi [71].

A Kobe siguió el dique-isla de Otaru (1912-1917) cuyo relleno se realizó íntegramente en hormigón para obtener mayor durabilidad y estabilidad [72]. Este dique ha llegado hasta nuestros días. La técnica de relleno fue evolucionando en aras de la rapidez y el ahorro, y en el puerto de Onahama se utilizaron bloques de hormigón para proceder al relleno de los cajones [72]. El relleno tradicionalmente utilizado antes de la finalización de la Segunda Guerra Mundial era el hormigón, pero fue variando hacia los materiales granulares y posteriormente a los rellenos de arena en los cajones del puerto de Yokohama, contruidos en el período 1928-1943. Aunque inicialmente se utilizaba la arena tan sólo en zonas de poco oleaje, después de la Guerra Mundial esta práctica ya fue la habitual en el relleno de los cajones [72].

Figura 71: Cajones en Japón y perforados en diversos emplazamientos [51, 69, 71, 73-75].

La tecnología de los cajones es muy utilizada en Japón, y se construyen diques de esta tipología para la protección ante Tsunamis [72]. A este efecto, en su momento el dique de Ofunato fue el más profundo, con 30 metros de profundidad, siendo actualmente el más profundo el de Kamaishi que llega hasta los 60 metros de profundidad.

Dentro de la gran experiencia Nipona, se encuentran como cajones singulares el del puerto de Hedono (Figura 71), como el más ancho construido, con 38 metros de manga; el más largo, el dique temporal para el puerto de Kochi, con 100 metros de eslora [72]. Estas longitudes, abren una nueva etapa en el diseño de diques, ya que, a partir de unas ciertas longitudes de cajones, éstos ganan en estabilidad al recibir una fuerza media del oleaje cuando su incidencia es oblicua. *“The long caisson is expected to receive a reduced mean wave force per unit length for obliquely incident waves because of the phase difference along the extension.”*[71-73].

Se han realizado gran número de diseños y nuevas tipologías, con objeto de mitigar la reflexión del oleaje e incluso de alojar turbinas para producción de energía (Figura 71).

En España los cajones en diques más profundos han sido en Punta Lucero, en el puerto de Bilbao, con cajones de 39 metros de puntal y dique cimentado a la -32. Los cajones más grandes han sido los fabricados por el cajonero Kugira, de la constructora Acciona con 66,85 metros de eslora, 24 de manga y 34 de puntal [76, 77].

Como se ha mencionado anteriormente, la evolución de las tipologías de los cajones conduce a diseños de formas más complejas, optimizando la utilización de los materiales; por otro lado, atenúa los inconvenientes de los diques verticales, como puede ser la reflexión del oleaje.

A través de las formas, como el cajón trapezoidal, los cajones con coronación curva, o bien los cajones cilíndricos (Figura 71), se busca mayor estabilidad de la estructura gracias al propio efecto de las olas sobre la forma del cajón, y por tanto cajones menos pesados o solicitados [73].

2.8.2 Construcción sobre diques flotantes en seco

Inicialmente los diques flotantes se utilizaban de la misma manera que se utilizaban con los buques, es decir como una zona para poder trabajar en seco. Así se construyeron los cajones del puerto de Barcelona y de Kobe, utilizándose el dique flotante posteriormente para realizar la botadura de dichos cajones, una vez terminados en seco y realizado el curado de estos.

Esta técnica se sigue utilizando aún (Figura 72), ya que en muchos países no es posible curar con el agua del mar debido a la normativa, por lo que se construye tal y como se hizo en el puerto de Barcelona, lo que limita en gran medida las dimensiones de los cajones que se pueden construir sobre estas estructuras. El tamaño del cajón que se pueda construir irá directamente ligado a la flotabilidad del cajonero, siendo mucho más restrictivo que si se pudiese trabajar con el cajón en flotación.

Figura 72: Cajones contruidos en seco sobre cajonero en Puerto Barcelona año 2018, cajonero Kugira Acciona (Foto del autor).

2.8.3 Construcción en seco

Actualmente la evolución en la construcción de cajones sigue dos caminos bien diferenciados. El concepto, en cambio, sigue inmutable a lo largo de la historia, como se ha podido apreciar.

Una de las tendencias está relacionada con la evolución en las características de los materiales, especialmente en el hormigón, mejorando sus resistencias mediante el uso de fibras, así como la incorporación de materiales más sostenibles procedentes del cemento, entre otros avances en este campo.

Por otro lado, la introducción de nuevos materiales, como los materiales compuestos, por ejemplo, que colaboran en gran medida con la sostenibilidad, y marcan un hito en la continua innovación en la tecnología de construcción de cajones.

En lo que se refiere a la relación entre la sostenibilidad y la utilización de materiales relacionados con el cemento en estructuras marítimas en general y en los cajones en particular, las mejoras están principalmente enfocadas a la reducción de las emisiones de CO₂ [78]. Se ha establecido que la producción de una tonelada de Clinker (principal componente del cemento Portland) produce unas emisiones de aproximadamente 0,89 toneladas de CO₂ a la atmósfera [79]. Es por ello por lo que la utilización de materiales basados en cemento o adiciones, que reemplacen totalmente el Clinker permitirían una disminución importante en la emisión de gases de efecto invernadero.

En el caso de las obras marítimas el impacto es destacable, debido a la gran cantidad de hormigón utilizado. La utilización de residuos de otras industrias, como las adiciones, tienen un impacto importante desde el punto de vista medioambiental, ya que su reutilización resuelve parcialmente el problema de su almacenaje o acopio en vertedero [80].

La alternativa a construir los cajones sobre los diques flotantes en seco es construirlos o bien en un dique seco, o bien sobre una explanada, para la que se deberá prever un sistema de botado de los cajones construidos. El hecho de construir en tierra hace que el proceso constructivo sea similar al de cualquier otra estructura de hormigón construida en seco, es decir, mediante encofrados estándar o trepantes, y utilizando medios auxiliares tradicionales, sin ninguna especificidad para obras marítimas.

En muchos países es todavía el único sistema factible, ya que la normativa no autoriza bajo ningún concepto el curado con agua de mar, y por tanto sistemas como el del cajonero quedan automáticamente descartados. Se han de curar los cajones con agua dulce durante 28 días, por lo que ese es el tiempo que permanecerán dichos elementos sin contactar con el agua de mar.

En algunos casos, el excesivo tamaño del cajón o bien la particularidad de sus formas (hecho cada vez más habitual) hacen que el proceso constructivo no permita el deslizado de los encofrados, rasgo importante en la construcción con cajoneros.

Se fabricaron en seco en los puertos de Durban (Figura 73) y Ngqura en Sudáfrica, y se sigue de esta manera en el proceso de licitación de la ampliación del puerto de Durban por la National Ports

Authority de Sudáfrica, ya que, siguiendo las British Standards y la normativa sudafricana: *“Under no circumstance shall seawater be used for mixing or curing concrete”* [78].

No solo en este caso hacen mención del tipo de agua, ya que en otro artículo del pliego dicen lo siguiente:

“4.2.2 Water for Concrete

4.2.2.2 It shall be fresh, clean, potable and free from injurious amount of acids, alkalis, organic matter and other substances that may impair the strength or durability of concrete.

4.2.2.5 The chloride and sulphate content of the water shall be included in the assessment of the total chloride and sulphate content of the proposed concrete mix.”

Mostrando así la gran preocupación existente en este país con respecto al agua de mar y su influencia en las estructuras marítimas.

“4.5.12 Curing and Protection

4.5.12.2 All water for curing shall be clean, fresh water and under no circumstances will seawater be permissible. “

Y en el caso de que no quedase totalmente claro que no quieren influencia del agua marina en estos cajones, subrayan en este párrafo que el hormigón deberá tener unas resistencias mínimas antes de poder ponerlo en contacto con el agua de mar:

“The caissons shall not be launched into the water prior to concrete surrounding the proposed towing attachment points achieving its full design strength and the concrete from the last pour for the caisson walls achieving a minimum strength of 32 MPa.”

El gran tamaño y peso de los cajones contruidos en seco es un inconveniente, que se salva, cuando no se trata de un dique seco, con la utilización del sistema denominado como Syncrolift. Este sistema permite el desplazamiento de grandes cargas mediante railes y gatos hidráulicos, que permiten desplazar los buques hasta una plataforma que, bajando de nivel, se hundirá en el agua, permitiendo así el botado del buque de una manera sencilla. El sistema fue inventado en 1954 [79, 80]. Este sistema permite el desplazamiento de enormes buques, y supone un gran ahorro de espacio para los astilleros, además de evitar la construcción de los costosos y más lentos diques secos y se puede utilizar también con cajones. Existen ejemplos con capacidad de desplazamiento máximo de 23.320 tn y una eslora de 188 metros.

Figura 73: Planos de uno de los modelos de cajones en ampliación puerto de Durban [81].

La empresa China CHEC, en la ampliación que se está realizando actualmente en el puerto de Abidjan en Costa de Marfil, está fabricando los cajones en seco para botarlos a continuación con la ayuda de un dique flotante. Para el manejo de los cajones sobre la explanada utilizan grandes cilindros hinchables que girando hacen que los cajones se desplacen (Figuras 74 y 75).

Figura 74: Sistema de deslizado de los cajones mediante cilindros neumáticos [58].

Figura 75: Construcción de cajones en puerto de Abidjan, empresa CHEC [58].

Una experiencia muy reciente de construcción de cajones en dique seco, con unas dimensiones bastante importantes y fabricando gran número de elementos se ha realizado en Venecia, en la construcción del sistema de protección de Venecia frente a las subidas del nivel del mar. Este sistema, denominado MOSE (*Modulo Sperimentale Elettromecanico*) están formado por cajones que alojan las compuertas que cerrarán la laguna de Venecia en caso de subida excesiva del nivel del mar (Figura 76). Los cajones más grandes utilizados tienen una longitud de 60 metros, 48,3 metros de ancho y 11,5 metros de altura y fueron desplazados mediante el sistema Syncrolift, con la plataforma más grande del mundo para este tipo de operaciones [57, 82].

Para cerrar los tres canales de entrada al puerto se han utilizado 35 cajones, de dos tipos diferentes, los posicionados en los extremos y todos los demás que componían el “núcleo” de las diferentes barreras.

Figura 76: Cajones sistema MOSE Venecia [57, 83].

Los cajones de grandes tamaños también se fabrican en dique seco, pero se mencionarán algunos ejemplos más adelante en un apartado dedicado a este tipo de cajones.

2.8.4 Construcción en cajonero

El aumento en el tamaño de los buques mercantes y, por consiguiente, de su calado, ha hecho que las necesidades portuarias sean cada vez mayores, y los cajones necesarios para la construcción de diques verticales tengan cada vez mayor puntal. Las necesidades además de estabilidad han llevado a hacer aumentar también tanto la eslora como la manga de dichos cajones.

Para ello, las grandes constructoras españolas se han ido haciendo con cajoneros de tamaño cada vez mayor que permiten la construcción rápida e industrializada de estos elementos. Pueden llegar a construir cajones, en el caso de Acciona con el Kugira, con unas dimensiones máximas de 67 m de eslora, 32 m de manga y 34 m de puntal. El mayor construido hasta la fecha, es de 66,85 metros de eslora, 24,6 metros de manga y 34 metros de puntal en Isla Verde en Algeciras.

A comienzos de siglo, como se ha comentado anteriormente, se utilizaban diques flotantes para fabricar sobre ellos los cajones de hormigón, pero en seco. Al ir aumentando los tamaños de los

cajones, eran necesarios cada vez diques flotantes de mayores dimensiones, o bien evolucionar la técnica, como así se hizo. En el caso del puerto de Rotterdam en 1929, en el muelle de Merwehaven como se ha podido apreciar anteriormente en las Figuras 59 y 60, en donde el peso del hormigón del cajón se iba equilibrando con el empuje del mismo. Se comenzaba la construcción en seco y posteriormente se hundía el cajón, finalizándose la construcción con el cajón amarrado a un muelle y flotando. Así funcionan los modernos cajoneros, que se van hundiendo a medida que avanza la construcción del cajón y aumenta su peso.

Sucesivas evoluciones han llevado a la construcción moderna de cajones en serie, mediante cajonero que está dotado de un sistema de encofrado deslizante que permite construir dichas estructuras de una manera continua. Para ello, cuando el cajón tiene un cierto peso y suficiente volumen, se hunde el cajonero y se continúa con la construcción. Esta técnica ha sido también posible gracias a la evolución en los materiales, y en el estudio del hormigón, como se puede apreciar en el capítulo de curado de los hormigones. Adicionalmente, la normativa, que permite el curado con agua de mar, es fundamental para poder construir los cajones siguiendo este proceso constructivo.

Aunque estos cajones ya tienen unas dimensiones enormes, no son ilimitadas, por lo que, en determinados casos, donde son necesarios cajones que exceden estas dimensiones, se continúa utilizando la técnica de construcción en dique seco.

Se describirá someramente el sistema, para poder compararlo mejor con el sistema de construcción en seco.

Existen varios tipos de cajoneros, siendo los más habituales los siguientes: [77].

- Flotador central y cuatro torres laterales
- Flotador y grúas para la colocación y retirada del encofrado desde el exterior
- Flotadores laterales de tipo catamarán.

El más utilizado por las constructoras españolas es el que dispone de flotador central y cuatro torres laterales (Figura 77). Tanto el flotador central como las torres laterales disponen de tanques de lastre que permiten variar la flotabilidad del conjunto, para poder estabilizar la flotación del cajón en construcción.

Sobre el flotador o pontona se construye en seco la losa del cajón (Figura 78), y a partir de ahí se va deslizado el encofrado del fuste que cuelga de una estructura llamada paraguas y que se desplaza por la acción de 60 cilindros hidráulicos de gran capacidad (2 en cada extremo de las 15 vigas transversales del paraguas, de 70 tn cada uno a una presión máxima de 700 bares). Se considera una carrera máxima de 1.000 mm.

Figure 77: Vista sistema de gatos y detalle de uno de los gatos [77].

Figura 78: Ferrallado de losa para construcción del cajón (Foto del autor).

La velocidad de deslizamiento puede ser del orden de 5 metros diarios, y un cajón se puede fabricar en aproximadamente 10 días. Las condiciones climáticas y climatológicas influyen en el rendimiento de las operaciones. En todo caso, la velocidad de deslizamiento depende de los siguientes factores:

- Tiempo de curado del hormigón
- Capacidad portante de las barras de apoyo.
- Eficacia de la organización de la obra.

Si todos los factores son adecuados, la velocidad de deslizamiento puede ser del orden de los 15 a 20 cm/h. El diseño del encofrado permite variar tanto el tipo de cajones como las dimensiones de las celdas de este. Acompasando la velocidad de hormigonado y deslizamiento con el curado del

hormigón, se va ascendiendo de forma continua hasta llegar a la coronación del cajón. Este cajón se irá hundiendo con el dique, a medida que crece su puntal y aumenta su peso; de ahí en adelante se continuará construyendo, manteniendo constante el francobordo de este.

En España gran parte de los puertos realizados desde los años 80 lo han sido mediante esta tecnología, llegándose, como ha quedado expuesto, a cajones de hasta 14.000 tn. El uso de los cajones y sus tipologías sigue evolucionando, y la construcción en cajonero se tiene que ir adaptando a ello. Así ya varios cajones han sido fabricados con celdas para atenuar la reflexión del oleaje mediante la introducción de encofrados adicionales.

En los cajones de tipología Jarlan que empezará a construir Bouygues en Marsella para el puerto de Mónaco, se utilizará una combinación del sistema. Gran parte del fuste se realizará en el dique flotante, y, se terminarán, fondeando el cajón junto a un muelle para construir los pilares de las celdas antirreflejantes.

La evolución en las tipologías de cajones hará que el sistema de cajoneros deba de adaptarse a su construcción, o bien evolucionar para dar paso a una nueva tecnología de construcción que vaya respondiendo a las necesidades de los nuevos tiempos.

2.8.5 Curado del hormigón

El curado del hormigón juega un papel muy importante en la construcción de cajones, no sólo por la necesidad de proceder a él para obtener un hormigón de calidad, sino también porque la naturaleza del agua puede llegar a ser determinante a la hora de decantarse por un proceso constructivo.

Ha sido muy importante el dominio de los tiempos de fraguado del hormigón para permitir el deslizado de los encofrados, así como el estudio de sus propiedades para analizar el comportamiento del curado con agua de mar. Existen numerosos estudios al respecto, pero actualmente sólo es posible curar los cajones con agua de mar en España, Italia y Japón, teniendo el resto de los países prohibido dicho curado, exigiendo el curado del hormigón con agua dulce durante 28 días. Esto hace que la técnica de los cajoneros no esté muy extendida aún y sea coto de unas pocas empresas de los países citados.

Las normativas prohíben la utilización de agua de mar para el amasado y curado del hormigón armado, pero numerosos ensayos han permitido matizar las normativas en algunos países, permitiendo la utilización de agua de mar al menos para el curado (en algunos casos se han ensayado también los cambios de propiedades utilizando agua de mar incluso para el amasado). Esta autorización en condiciones concretas y con restricciones ha permitido la utilización de cajoneros con encofrados deslizantes que pueden construir cajones de gran tamaño de una manera continua y a gran velocidad.

Si bien la EHE no permite el curado con hormigón, estudios e investigaciones realizados por el CEDEX por encargo de Puertos del Estado han comprobado que no hay diferencias relevantes en la penetración de los cloruros entre un hormigón HA-30 curado con agua de mar y otro hormigón curado con agua dulce, si están posteriormente en contacto con el agua de mar por un largo período. Es por esto por lo que se considera aceptable el curado con agua de mar en la construcción de cajones para obras marítimas [53].

Se van a exponer someramente los condicionantes actuales en cuanto al curado.

Uno de los factores a tener en cuenta a la hora de tener un hormigón de suficiente calidad y apto para ser curado con agua de mar es, en primer lugar, la relación agua / cemento (Tabla 1). Oscila, según las diferentes normativas entre 0,4 y 0,5, y será diferente si el hormigón va a estar permanentemente sumergido o sometido tanto al agua de mar como a la intemperie, condiciones mucho más agresivas. En cuanto al contenido de cemento, deberá ser superior a los 300 kg/m³ y no exceder los 500 kg/m³ [84].

Tabla 1: Relación agua cemento (EHE) [85].

Clase de exposición	Máxima relación a/c		Mín. contenido de cemento (kg/m ³)	
	H. pretensado	H. armado	H. pretensado	H. armado
IIIa	0,50	0,50	300	300
IIIb	0,45	0,50	325	325
IIIc	0,45	0,45	350	350
Qb	0,45	0,50	350	350

Es importante también, en cuanto a la corrosión de las armaduras el recubrimiento de hormigón (Tabla 2), que van desde los 50 mm hasta los más restrictivos 75 mm promovidos por las British Standard. Pero, en cuanto a control de la corrosión, es más importante la limitación de los cloruros (Tabla 3), que habrán de ser inferiores al 0,1 %.

Tabla 2: Recubrimiento de armaduras (EHE) [85].

Clase de exposición	Elementos en general		Láminas prefabricadas	
	$25 \leq f_{ck} < 40$	$f_{ck} \geq 40$	$25 \leq f_{ck} < 40$	$f_{ck} \geq 40$
IIIa	35	30	30	25
IIIb	35	30	30	25
IIIc	40	35	35	30

Tabla 3: Limitación del contenido de cloruros (EHE) [85].

Hormigón	Ión cloro total (%)
Armado	$\leq 0,4$
Pretensado	$\leq 0,2$

Se han realizado numerosos ensayos de utilización de agua de mar en la fabricación de cajones, utilizándola como agua de amasado o como agua de curado [86-90]. En efecto, el agua dulce es un bien preciado y cada vez más escaso, y en numerosos emplazamientos es difícil de obtener, por lo que ahorrar en su utilización no es de despreciar. Además, en los cada vez más utilizados Análisis del Ciclo de Vida, la Huella Hídrica juega un papel importante, por lo que la reducción del consumo de agua dulce ayudaría en gran medida a obtener un Ciclo de Vida que produzca menor impacto en el Medio Ambiente. El uso en el hormigón en masa es ampliamente reconocido, pero en el curado de cajones armados, no está todavía mundialmente aceptada la técnica de los cajoneros ya que se cura el hormigón con agua de mar en un espacio de tiempo muy corto desde su fraguado.

En los apuntes de Ingeniería Marítima de Vicente Negro [77] se hallan las tablas comparativas de estos parámetros en las diferentes normativas internacionales (Tablas 4-6):

Tabla 4: Relación Agua/Cemento en las diferentes normativas internacionales [84].

Agua/cemento	EHE	ACI	BSI	Kyoto	Japan	FIP	RILEM
IIIa, aérea	0.50	0.40	0.65	0.45	0.60	0.45	$0.45 < A/C < 0.50$
IIIb, sumergido	0.50	0.45	0.50	0.50	0.55	0.45	$0.45 < A/C < 0.50$
IIIc, salpicadura	0.45	0.40	0.45	0.45	0.55	0.40	$0.45 < A/C < 0.50$

Tabla 5: Recubrimiento de las armaduras en las diferentes normativas internacionales [84].

Recubrimiento	EHE	ACI	BSI	Kyoto	Japan	FIP	RILEM
IIIa, aérea	35 mm	50 mm	50 a 75 mm	> 25 mm	70 mm	50 – 70 mm	45 + - 5
IIIb, sumergido	35 mm	50 mm	50 a 75 mm	> 40 mm	70 mm	50 – 70 mm	45 + - 5
IIIc, salpicadura	40 mm	65 mm	50 a 75 mm	> 50 mm	70 mm	50 – 70 mm	45 + - 5

Tabla 6: Limitación Cloruros en las diferentes normativas internacionales [84].

Cloruros	EHE	ACI	BSI	Kyoto	Japan	FIP	RILEM
Contenido	35 mm	50 mm	50 a 75 mm	> 25 mm	70 mm	50 – 70 mm	45 + - 5

Dentro de la gran cantidad de ensayos realizados, se ha podido constatar que la resistencia inicial del hormigón es mayor en el caso del curado del agua de mar, viéndose favorecida la maduración del hormigón por la temperatura del agua y la presencia de cloruro de calcio en el agua de mar. En el largo plazo en cambio, la resistencia se iguala o incluso disminuye frente a la de un hormigón equivalente curado con agua dulce [86, 87].

Pero, el factor determinante es la presencia del ion cloruro (Cl^-), que hay que controlar. Para evitar además la penetración en la masa de hormigón, es importante reducir la relación agua cemento y aumentar la cantidad de cemento en la mezcla, de ahí las restricciones anteriormente citadas; todo esto permitirá una menor permeabilidad del hormigón y, por tanto, mayor protección de las armaduras frente a la corrosión; factor éste, que, en el largo plazo, no se verá influido por un curado del hormigón con agua dulce o agua de mar. En este sentido hay ensayos realizados [53] que comprueban que no es determinante en el factor de penetración del ion cloruro, si el curado se realiza con agua dulce o agua de mar, ya que la exposición de la estructura de manera permanente al agua de mar será la determinante, siendo residual el efecto del curado con agua de mar; se argumenta así la idoneidad de fabricación con cajoneros, dadas las ventajas de velocidad de fabricación y ahorro en superficie de instalaciones.

Los países con mayor tradición en la construcción de cajones, como son Italia, Japón y España, son más abiertos a estas teorías y, por tanto, a la utilización de cajoneros flotantes. En otros países en cambio, siguen con las restricciones en cuanto al curado, exigiendo aún curados de hasta 28 días con

agua dulce, por lo que inevitablemente el proceso constructivo se ha de desarrollar en seco, como se ha podido ver en el caso de cajones para la ampliación del puerto de Durban en Sudáfrica.

Las Normativas inglesa tanto como la española y japonesa permiten curar con agua de mar el hormigón en masa; las normativas japonesa y española permiten incluso amasar (en Japón sí que hay problemas para obtener agua dulce y este asunto es por tanto crítico). Según la Normativa Europea, además, la concentración de cloruro es el factor determinante cuando el hormigón tiene acero embebido.

La necesidad de construir cajones cada vez de mayores dimensiones y de una forma más industrializada ha llevado a las grandes constructoras a construir enormes diques flotantes llamados cajoneros (Figuras 79 y 80). En efecto, los buques del tipo SUPER-POST-PANAMAX alcanzar calados cercanos a los 21 metros, lo que lleva a diseñar cajones con puntales cercanos a los 35 metros. Si se suma esto a las necesidades de estabilidad de dichos cajones, se llega a unas esloras y mangas muy superiores a las que se habían utilizado anteriormente. Todo esto es lo que ha llevado a las grandes constructoras a hacerse con cajoneros consecuentes con estas necesidades.

Figura 79: Hormigonado del cajón todavía en seco y en flotación (imágenes cortesía Acciona).

Figura 80: Remolque del cajón desde el cajonero y varado en el muelle (imágenes cortesía Acciona).

El uso de los cajones y sus tipologías sigue evolucionando, y la construcción en cajonero se tiene que ir adaptando a ello. Esto ha hecho que se vayan adaptando las formas de los cajones de manera que se puedan construir nuevas tipologías acordes a las necesidades, y que tengan formas desarrollables que puedan ser construidas sobre un cajonero. Se encuentran de esta manera varios ejemplos:

- Cajones fabricados con celdas (Figura 81) para atenuar la reflexión del oleaje mediante la introducción de encofrados específicos adicionales que no interrumpan el deslizado de los encofrados.

Figura 81: Cajones en dique Este puerto S.C Tenerife (imágenes cortesía Acciona).

- Cajones compuestos de varios elementos cilíndricos (Apolonio Figura 82) separados entre sí para crear zonas de disipación del oleaje, y que puedan ser construidos en cajonero mediante encofrados circulares deslizantes [91].

Figura 82: Cajón Apolonio [91].

- En los cajones de tipología Jarlan que empezará a construir Bouygues en Marsella para el puerto de Mónaco (Figuras 83 y 84), se utilizará una combinación del sistema. Gran parte del fuste se realizará en el dique flotante, y, se terminarán, fondeando el cajón junto a un muelle para construir los pilares de las celdas antirreflejantes [92] .

Figura 83: Cajón fondeado en el muelle para su finalización [93].

Figura 84: Perspectiva del cajón y de sus fases de construcción en el muelle [92, 94] .

A modo de resumen se exponen en la Tabla 7 las ventajas e inconvenientes de la construcción de cajones marítimos en seco o sobre cajonero.

Tabla 7: Ventajas e inconvenientes diferentes sistemas constructivos.

SISTEMA CONSTRUCTIVO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
CONSTRUCCION DE CAJONES CON CAJONERO	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso constructivo muy maduro: gran experiencia - Fábrica flotante : proceso constructivo industrializado, grandes estándares de calidad, seguridad. - Disminución plazos de ejecución - Proceso constructivo continuo: Estructura monolítica sin juntas de hormigonado - Muy inferior ocupación de terrenos, acopio cajones en dársena. - Rapidez instalación de obra. - Fácil transporte cajonero (barco sumergible o remolcado). 	<ul style="list-style-type: none"> - Curado con agua de mar (prohibido en muchos países) - Limitación a dimensiones de cajonero, geometría para encofrado deslizante: dificultad para cajones especiales. - Logística : suministro acero y hormigón sin interrupciones - Mano de obra especializada para trabajar sobre cajonero.
CONSTRUCCION DE CAJONES EN SECO	<ul style="list-style-type: none"> - Construcción estructura en tierra : medios auxiliares tradicionales, personal menos especializado - Curado con agua dulce y fraguado a 28 días. - Versatilidad en cuanto a dimensiones y formas. - Posibilidad de construcción simultánea de varios cajones. - Menor inversión inicial 	<ul style="list-style-type: none"> - Ocupación de grandes superficies - Grandes medios para botado de cajones : dique seco o Syncrolift (menor inconveniente si aprovechamos astilleros navales) - Plazo elevado para montaje instalaciones de obra. - Utilización encofrado trepante : juntas horizontales en la estructura. - Proceso más lento : necesidad de varios equipos para equipararse a velocidad de cajonero.

2.9 Tipologías de cajones singulares

Existen gran número de tipologías de cajones, en función de las necesidades y funciones que se quiere que desempeñen. Se expone a continuación un gran número de las existentes y las que se consideran más representativas.

El gran desarrollo de la tecnología del hormigón armado ha permitido la construcción de cajones con muchas y muy diversas formas, en función del uso de los diques o muelles, o bien de las restricciones de construcción en cada momento. Por eso se van a exponer de manera bastante somera las tipologías más habituales de cajones utilizados, así como algunos no tan utilizados, pero con unos usos muy concretos y determinados, según se puede encontrar en el libro de Diques Verticales de Don Vicente Negro [95].

2.9.1 Cajones cilíndricos:

En el puerto de Madrás se utilizaron cilíndricos metálicos, la tecnología actual lleva a cilíndricos de hormigón (Figura 85), e incluso los duques de Alba ya realizados en composites lo son también en esta tipología. Esta forma de cajones es ventajosa en algunos casos, por el comportamiento estructural y por la forma en que actúan las olas sobre ellos.

Figura 85: Parque prefabricación de cajones puerto de Durban, Sudáfrica 2003 [96].

2.9.2 Cajones perforados o antirreflejantes

Dentro de las últimas tendencias en cajones, se observa un gran impulso de los cajones perforados o antirreflejantes. Esta tipología surgió de la búsqueda de soluciones para los problemas clásicos de los diques verticales como son la gran reflexión de las olas, las elevadas cargas debidas al oleaje, así como los rebases (*overtopping*) y la socavación de la banqueta de apoyo (*toe scour*) [74]. Como quedó demostrado en ensayos como en los Diques de Porto Torres y Dieppe (Figuras 86 y 90), en los que se instalaron sensores de presión, las estructuras verticales porosas son más efectivas en la reducción del ascenso (run-up) del oleaje, del orden de un 30%. Igualmente son menores las solicitaciones sobre la estructura, las socavaciones de la banqueta y los coeficientes de reflexión [74].

De los estudios y ensayos realizados para este tipo de cajones, se pueden anotar una serie de conclusiones de interés [74] :

- La reflexión en la cámara es mínima cuando **$B/L=0,2$** .
- La porosidad que minimiza la reflexión debe ser entre un 15% y 30% en una cámara simple y es preciso que los agujeros se extiendan a toda la columna de agua.
- Empleo de cámaras de disipación reduce las cargas horizontales sobre el dique.

Figura 86: Cajón perforado Jarlan en el puerto de Dieppe [97].

2.9.3 Cajones JARLAN:

Estos cajones son los primeros perforados que fueron ensayados, y datan de 1961, y ya estos primeros estudios ponen de manifiesto los parámetros que definirán las prestaciones de este tipo de cajones. Los parámetros más importantes a tener en cuenta son la longitud de onda de la ola al pie de la estructura (L) y su relación con la anchura de la cámara de disipación.

Las primeras experiencias constructivas de este tipo de estructuras propuestas por Jarlan en 1961 se contruyeron en Comeau Bay (Canadá, 1966) y posteriormente en Jizan (Arabia Saudí), Granville (Francia) y Mónaco (Figura 87). En Japón, el primer dique perforado se construyó en 1969 en el puerto de Takamatsu, y el primer muelle con cajones perforados en el puerto de Kobe en 1970 [71].

Debido a su gran capacidad para absorber el oleaje y su gran estabilidad frente a las olas, este tipo de cajones se usa cada vez con mayor frecuencia. Aunque inicialmente fueron concebidos para trabajar en aguas tranquilas, se diseñan cada vez para mayores oleajes.

En todas estas experiencias se pone de manifiesto la dificultad constructiva de este tipo de cajones, que ha hecho que vaya evolucionando tanto la forma de dichos cajones como los procesos constructivos.

Figura 2.50. Estructura marítima antirreflejante tipo Jarlan (Jarlan, 1961)

Figura 2.77. Estructura marítima antirreflejante tipo Jarlan (Jarlan, 1961)

Figura 2.78. Cajón perforado Jarlan en Comoeau Bay. (Fuente Takahashi 2002)

Figura 2.79. Cajón tipo Jarlan. Puerto de Garville (Francia)

Figura 87: Ejemplos de cajones tipo Jarlan en diferentes emplazamientos [53, 71, 95].

En la Figura 88 se puede ver un esquema de los elementos estructurales que conforman un dique vertical perforado. En la parte superior del muro, los orificios permiten a las olas entrar en la cámara de oleaje, disipando energía a través de los remolinos formados [71].

La disipación de energía es mayor cuanto mayor es la diferencia de niveles entre el interior y el exterior de la cámara de disipación, y, en cualquier caso, es dependiente en gran medida de la Longitud de onda del oleaje.

Figura 88: Sección tipo de un cajón perforado [71].

Con objeto de abarcar un mayor espectro de periodos de oleaje para disipación de la energía de las olas, se han empleado complejos sistemas de perforaciones: cajones con doubles cilindros perforados.

De manera general se considera que los esfuerzos actuando sobre un dique perforado son inferiores a los que actúan en cajones convencionales, como se puede apreciar en el gráfico de la Figura 89.

Fig. 5.8 Comparison between perforated wall and conventional caissons (Takahashi et al., 1991)

Figura 89: Comparación entre muros perforados y cajones convencionales [71].

En este gráfico se compara el peso de un cajón (F_c) en función de las condiciones del oleaje, donde los resultados del cajón perforado (F_{cd}) se homogeneizan mediante el uso de un cajón equivalente convencional (F_{cg}) utilizando la fórmula de presiones de Goda [71].

Se puede observar lo siguiente:

- Cuando el dique de escollera no es alto ($d/h = 0,7$) y $d'/d = 1,0$ la relación F_{cc}/F_{cgis} es del orden de 0,8 excepto cuando $H/h < 0,3$ y para todos los valores de F_{cc} es máximo
- Cuando $d/h = 0,7$ y $d'/d = 0,5$, la relación varía entre 0,8 y 0,9, y la estabilidad es crítica en la crest-I cuando $H/h < 0,2$ mientras que en la crest-Ha cuando $H/h > 0,3$
- Cuando el dique de escollera es alto en comparación ($d/h = 0,5$), F_{cc}/F_{cgis} es del orden de 0,7 y la estabilidad es crítica en la cresta Ha para $H/h > 0,3$, independientemente del valor de d' .

En conclusión, estos resultados muestran que los cajones perforados tienen una mayor estabilidad que los cajones convencionales, tanto con bajos o altos diques de escollera.

Figura 90: Cajones Jarlan puerto de Dieppe [98, 99].

Figure 91: Encofrados de Cajones Jarlan del puerto Tanger Med [100].

Un ejemplo muy conocido es el del puerto de Dieppe (Figura 90) ,pero este tipo de cajones se siguen utilizando aún, y existen ejemplos más recientes en los puertos de Tánger (Figura 91, 92 y 93) y mucho más actual, los cajones que se construyen en Marsella para el puerto de Mónaco (Figuras 79, 80 y 94).

Figure 92: Cajones Puerto de Tánger ya colocados en sitio [101].

Figura 93: Perspectiva cajones Tanger Med [75].

Figure 94: Cajones Jarlan para Monaco (cortesía Bouygues) [102, 103].

En las figuras 95 y 96 se muestran sendos ejemplos de cajones perforados en Japón, y el doble cilindro de la Figura 97 fue construido en el puerto de Shibayama en zona de aguas profundas y grandes olas. Se compone de dos cilindros, uno interno y otro externo. La estructura circular permite resistir grandes esfuerzos con una sección relativamente pequeña. El cilindro exterior es perforado, y permite al agua entrar en la cámara interior, donde se disipa la energía del oleaje.

El método de diseño de este cajón está establecido casi en su totalidad, gracias a los datos obtenidos en ensayo realizado en Sakaiminato [51].

Fig.2.24 Perforated wall caisson breakwater at Yobuko Port

Figura 95: Cajón perforado con ranuras verticales en puerto de Yobuko [71]

Fig. 2.23 Perforated wall caisson breakwater at Takamatsu Port

Figura 96: Cajón perforado en Puerto Takamatsu [71].

Fig.2.27 Dual cylinder caisson breakwater at Shibayama Port

Figura 97: Doble cilindro perforado Puerto Shibayama [71].

En estos ejemplos se han utilizado técnicas diferentes, siendo los de Tánger contruidos en seco, y los de Mónaco contruidos sobre cajonero, y finalizada la sección con ventanas ya con el cajón fondeado junto al muelle.

En el caso de los cajones de Tánger se trata de un dique en aguas profundas (Figura 92); hay otro ejemplo, en este caso conformando una barrera a varios niveles para evitar los rebases, en el caso de los cajones perforados del puerto de Beirut (Figuras 98 y 99).

Figura 98: Perspectiva y sección dique Beirut [75].

Figura 99: Imagen dique de cajones Beirut finalizado [75].

Siendo una función importante de este dique el evitar los rebases, se validó la viabilidad de la estructura a través de ensayos en Canal, dejando finalmente abierto el tabique entre ambos niveles de paseo, permitiendo el aumento en un 40% de la altura de ola a la que comenzaba el rebase. Este espacio funciona como cavidad atrapa-olas y son de gran importancia las presiones registradas en el interior de la cámara.

A partir de los diques Jarlan, se han realizado diversas variantes, como son con varias cámaras disipadoras, antirreflejantes, con varias cámaras de celdas perforadas, cajones especiales ARC, cajones con cuenco amortiguador, con paramento curvo y con paramento inclinado. Estos ejemplos se ofrecen más adelante.

En el caso de Puerto Torres en Italia (1992) se encuentran con unos cajones con paredes perforadas y cámaras absorbentes (Figura 99). En este caso además el dique se ha dotado de sensores para poder registrar las presiones en dicho dique, dentro del proyecto PROVERBS para la obtención de herramientas probabilísticas en el diseño de diques verticales [104].

Figura 100: Dique puerto Torres [69].

En Japón existen varias experiencias con cajones perforados dado que esta tipología se está popularizando en este país, y que este tipo de cajones tiene como propiedades la baja reflexión del oleaje y disminución de los rebases, teniendo además una gran estabilidad al absorber parte de la energía del oleaje [73]. Pese a que estos cajones fueron inicialmente concebidos para utilizar en mares relativamente tranquilos, se utilizan actualmente en zonas de oleajes cada vez mayores.

Fig. 11. Cross-section of curved-slit caisson breakwater at Funakawa Port.

Figura 101: Sección del dique curvo puerto Funakawa [73].

Los cajones curvos y perforados fueron concebidos como cajones disipadores de energía en zonas de fuerte oleaje en 1976 y se construyeron por primera vez en el puerto de Funakawa en 1984 (Figura 101) [73].

Según los cálculos de Tanimoto et al. [73], los cajones trapezoidales y cilíndricos son más efectivos y estables cuando aumenta la profundidad y el oleaje, siendo el dique de Kamaishi el típico ejemplo de cajón trapezoidal en aguas profundas. Incluso en aguas profundas, a veces es preferible la construcción de estructuras permeables y poco reflejantes por condicionantes medioambientales, por ello se desarrolló un cajón doble cilíndrico (Figura 102).

Figura 102: Plano conceptual cajón doble cilíndrico [73].

Se han realizado investigaciones para comparar los efectos del oleaje en cámaras simples o dobles (Figura 103) [105], llegándose a la conclusión que con cámara doble las fuerzas horizontales del oleaje eran un 9 % inferiores para una misma anchura total de cámara en ambos cajones.

Figura 103: Sección y vista frontal cajón perforado con simple y doble cámara [105].

2.9.4 Cajones tipo ARC

Ya en la década de los 70 se pasa a este tipo de estructuras, con varios ejemplos en Japón (Figura 104). En este tipo de elementos se topan con dificultades constructivas similares a las de los cajones Jarlan.

Figura 104: Planta y sección tipo ARC [95].

Canel (1994) presenta una alternativa de cajón a los tradicionales cajones rectangulares perforados, en la que la cámara principal de disipación de energía ocupa toda la anchura del cajón, estando la cámara de lastrado en la base del cajón.

2.9.5 Cajones con superestructura curvada de eje horizontal

Figura 105: Dique y cámara amortiguadora Katsutoshi [74].

El primer dique de estas características se puede encontrar en el puerto de Funakawa en Japón (Figura 101), y se terminó de construir en 1984. La superestructura fue realizada mediante prefabricados de hormigón pretensado [71]; en la Figura 105 se puede ver el ejemplo del dique de Katsutoshi.

2.9.6 Cajones semi-circulares

Se construyó en 1993 un dique de prueba de pequeña longitud (36 m) en el puerto de Miyazaki, y en China se utilizó por primera vez para construir un dique de 527 metros en el puerto de Tianjin (1997), y en aguas de mayor profundidad en el estuario del Yangtze (1996) [106]. En las figuras 106 y 107 se pueden ver varios ejemplos de cajones de estas características.

“The breakwaters were designed as gravity-retaining structures using prefabricated, semicircular-shaped concrete caissons to resist the rough waves.”

Figura 106: Perspectiva y sección cajón semi circular [106].

Figura 107: Imagen cajón semi-circular [106].

“The water pressures acting on the semicircular-shaped surface pass through the centre of the circle. Thus the overturning moment becomes much smaller, and the vertical pressure distribution at the base of the caisson becomes more uniform” [106].

Estos cajones se rellenan de arena a través de unas aberturas situadas en la parte superior.

2.9.7 Cajones monobar

En los años 80, y con objeto de conseguir un sistema que atenuase las limitaciones tanto de los diques de escollera como de los cajones perforados, se ideó un sistema que mediante elementos prefabricados y en forma de panal lograba estos objetivos. De todos los sistemas, el Monobar (Figuras 108 y 109) permitía una porosidad del 40%, evitando así los problemas de resonancia que podía ocurrir en los cajones perforados cuando las olas incidentes eran de muy diferentes características.

Los modelos experimentales fueron probados en la Universidad de Nápoles y en HR Wallingford con trenes de ondas monocromáticos y aleatorios. Los test monocromáticos fueron especialmente útiles para atenuar los problemas de Swell, y el sistema fue patentado en 1985 por el Ingeniero Joseph Alan Sciotino , utilizándose por primera vez en el puerto de Terracina en los años 90 (Figura 109) [107].

Figura 108: Unidades Monobar, Inferior (izquierda) y Superior (derecha) [107].

Las dimensiones elementales de un elemento Monobar, considerando r el radio de un cilindro y según el esquema adjunto (Tabla 8):

Tabla 8: Dimensiones elementos monobar [107].

R (mm)	W (tn)	H_L (mm)	H_u (mm)	B(mm)
600	12	1800	2400	2400
650	16	2100	2600	2600
700	20	2100	2800	2800
750	24	2250	3000	3000
800	30	2400	3200	3200

La mayor altura operacional que se puede conseguir es de 6 metros, considerando una configuración en dos capas y serían necesarios bloques rectangulares por debajo de los 6 metros para poder lograr mayores profundidades.

Como se aprecia en la Tabla 8 el peso máximo de estos elementos es de 30 tn, aunque mayores pesos son posibles siempre y cuando se cuente con los medios adecuados.

Figura 109: Colocación de Unidad Tipo B de cajón monobar (30 tn) [107].

2.9.8 Cajón cilíndrico perforado

También conocido como Apolonio (Figura 110) y diseñado para ser utilizado como cajón de tipo antirreflejante, pero apto para ser fabricado en cajonero mediante encofrado deslizante. El elemento consta de dos filas de cilindros separadas que conforman una cámara entre ambos [91].

Figura 110: Cajón cilíndrico perforado (Apolonio) [91].

2.9.9 Cajones con ranura y bufador

En la prolongación del dique del Este del puerto de Castellón construido en el año 2009 se utilizó esta solución de dique vertical antirreflejante con cámaras interiores (Figura 111) registrándose las medidas de cargas, reflexión y rebases. Se pudo constatar la gran disminución en el coeficiente de reflexión y de las cartas horizontales en los paramentos en el caso de los cajones dotados con cámaras [74].

Figura 111: Maqueta cajón con ranura y bufador.

2.9.10 Cajones sin solera

Estos cajones, al igual que las cimentaciones mediante cajones indios, son abiertos por el fondo y con el borde inferior biselado o con forma de cuchilla de manera que se pueda ir hincando en el terreno (Figura 112).

Figura 112: Cajón sin solera , tipo indio [95].

2.9.11 Cajones de hormigón rectangulares

Son los más habituales y de los que más a menudo se habla en este documento, no obstante, debe aparecer de nuevo en este apartado de tipología (Figura 113) aunque se exponga más ampliamente en otros apartados.

Figura 113: Cajón rectangular fabricado con cajonero (cortesía Acciona).

2.9.12 Cajones trapezoidales

El primer ejemplo y más característico es el de los cajones que fueron construidos en el puerto de Kobe en Japón (Figura 114).

Figura 114: Cajón trapezoidal puerto de Kobe [52].

2.9.13 Cajones con patio

En casos particulares y debido a inestabilidades geotécnicas con presencia de fangos y limos, se pueden utilizar cajones rectangulares con patio sin solera intermedia (Figura 115) de manera que funcione como una obra mixta dique-muelle trabajando por gravedad-rozamiento interno [95].

Figura 115: Cajón con patio [95].

2.9.14 Cajones para la obtención de energía marina

El gran auge de las energías renovables ha llevado a que también se vaya evolucionando en la producción undimotriz, buscando sistemas más industrializados de construcción de diques dedicados a la producción de energía con el oleaje. Por ello se ha llegado a soluciones basadas en la construcción de cajones con las formas adecuadas para producir energía mediante sistema OWC (Oscilating Water Column).

Como ejemplo en Italia, en el puerto de Civitavecchia se ha realizado la construcción de 17 cajones REWEC 3 (Figura 116), cada uno de ellos de una longitud de 34 metros, con 136 cámaras alojando cada una de ellas turbinas de 20 kW. Esta planta funcionará con alturas de ola significantes de entre 2 y 3 metros, absorbiendo más del 80% de la energía del oleaje [108]. El sistema se basa en las presiones generadas por las oscilaciones del oleaje dentro de las cámaras.

Figura 116: Cajón tipo A OWC, puerto Civitavecchia [108].

La investigación en este campo lleva a modelos experimentales que pondrán a prueba los procesos constructivos con cajones, como este convertidor de energía del oleaje que emplea diferentes depósitos situados unos sobre los otros y en los que la energía del oleaje incidente se almacena como energía potencial [109] (Figura 117).

Figure 3. a) Artistic representation of a 3-level SSG with multistage turbines.; b) Definition sketch for a 3-level structure (after Vicinanza et al., 2012).

Figura 117: Conversor de energía a varios niveles [109].

Hay numerosos estudios y prototipos que exploran nuevas posibilidades para optimizar el rendimiento de la producción de energía mediante el oleaje, y muchos de ellos tienen en cuenta su construcción mediante cajones (Figura 118). Son en muchos casos modelos teóricos por lo que habrá que buscar la mejor forma de construirlos industrialmente para abaratar el coste de dichas infraestructuras.

En numerosas investigaciones en las que se proponen nuevos diseños de cajones se halla el comentario que afirma que aún los procesos constructivos existentes no permiten llevar a cabo los diseños propuestos [74].

Figura 118: Modelo experimental para puerto de Giardini Naxos (Italia) [110].

Existen incluso algunos ejemplos ya estudiados hace tiempo, como en este caso los expuestos por Takahashi et al [111] y presentado en la Figura 119.

Figure 4 Shape of the Caisson Breakwater

Figura 119: Modelo de cajón para producción de energía [111].

Y ya más recientemente algunos diseños propuestos para zonas con oleajes moderados (Figuras 120 y 121) [112].

Figure 1. Impression of pressure concept, cross-section of caisson element

Figura 120: Cajón para alojar sistema de producción de energía con el oleaje [112].

Figura 121: Secciones de cajones producción de energía con el oleaje [112].

Esto lleva a tener en cuenta la evolución en las formas, que va indicando los nuevos caminos a seguir en la construcción de cajones (Figura 122). Se conocen las formas necesarias y hacia donde se dirigen, por lo que habrá que buscar las soluciones más económicas para llevarlas a cabo.

Section of the SSG-breakwater caisson at Swakopmund 11 m water depth (DMC 2008).

Section of the SSG-breakwater caisson at Sines 18 m water depth (DMC 2008).

Figura 122: Generación por rebase, Sea-wave Slot-cone Generator (SSG) [113].

2.9.15 Cajones adaptados a la recepción de generadores de energía con olas.

La creciente utilización de los diques con la función de producir energía con el oleaje ha llevado a diseñar cajones con huecos dedicados a albergar estos equipos (Figura 123)

Figura 123: alojamiento de turbina Wavenergy en cajón.

2.9.16 Cajones de cimentación para torres eólicas

El caso de las cimentaciones para las torres eólicas es similar al de las pilas de los puentes, solo que normalmente se construyen gran número de estas torres (Figuras 124 y 125), mientras que para un puente suelen ser contadas. Esto hace que el proceso constructivo, de puesta a flote y hundimiento en su posición final sean muy importantes. Ya se utilizan elementos fabricados como los cajones flotantes, y en este sector se puede evolucionar al igual que en la construcción de cajones para diques.

Figura 124: Torres de cimentación molinos offshore.

Figura 125: Construcción de cimentaciones de torres en Newcastle upon Tyne [114].

2.9.17 Cajones metálicos de gran tamaño

En ciertos casos muy puntuales se han usado recientemente cajones metálicos de gran tamaño para las cimentaciones de puentes, en los casos del Wuxue Yangtze River bridge y en el caso del Hutong Yangtze River Bridge (Figuras 126-128).

Estos cajones se construyeron en seco para ser posteriormente botados como si de barcos se tratara [115]. En el Hutong, además, se trataba de un cajón mixto, con una parte metálica superior a los 50 metros de altura que se hincan en el terreno, remontada por una parte de hormigón de otros 56 metros de altura. Dichos cajones irán rellenos de hormigón para servir de base a las torres principales del puente atirantado con 1000 metros de vano.

Figura 126: Imágenes extraídas de vídeo botadura de los cajones metálicos [115].

Figura 127: Sección del cajón metálico.

Figura 128: Botadura y cimentación del cajón metálico [115].

2.10 Cajones de gran tamaño

Cuando un cajón relativamente largo recibe un oleaje oblicuo, la cresta de la ola se desplaza a lo largo del muro de vertical, como se aprecia en la Figura 129, y se puede promediar la fuerza total de la ola a lo largo del cajón.

La línea continua muestra el factor promedio δ_b del cajón como una función del ángulo del oleaje y de la longitud relativa del cajón. Se calcula mediante la teoría de ondas de pequeña amplitud.

Pese a que δ_b es pequeño cuando θ es grande y la longitud relativa del cajón es larga, la estabilidad a la rotación horizontal del cajón es sin embargo crucial. La línea de puntos muestra el límite de δ_b cuando se considera la estabilidad a la rotación que es del orden de 0,8 [71].

Fig. 4.32 Averaging of wave force by a long caisson (Takahashi et al., 1990)

Figura 129: Promedio de la fuerza del oleaje en un cajón largo [71].

Si bien los cajones expuestos a continuación son flotantes en los casos de los más largos, es importante tener en cuenta la teoría anunciada en el párrafo anterior.

Según ya ha sido demostrado en teoría y expuesto anteriormente, la mayor longitud de los cajones permitiría un mejor comportamiento del dique frente a las olas, por lo que es muy interesante construir cajones de una mayor longitud y buscar sistemas que permitan llegar cada vez más lejos en esta dimensión. Ya hay algunos casos de construcción de cajones de gran tamaño, pero éstos son elementos únicos que han sido construidos en dique seco.

Así ha ocurrido con el cajón flotante que Dragados y FCC construyeron para el puerto de Mónaco, el Dique La Condamine (Figura 130), que, con una eslora de 352 metros, 28 metros de manga y un puntal de 19 metros supone todo un hito en esta tecnología [116]. Sus 163.000 toneladas de desplazamiento dan una idea de sus dimensiones; sirva como comparación el desplazamiento del mayor crucero del mundo es de 120.000 tn, el *Harmony of the seas*.

Otro ejemplo es el cajón Adriatic (Figura 130), cajón de hormigón pretensado construido para contener Gas Natural Licuado, con unas dimensiones de 180 metros de eslora, 88 de manga y 47 de puntal [68].

Ambos cajones fueron fabricados en el dique seco de Algeciras, debido al favorable abrigo de la bahía y de las grandes dimensiones y complejidad de los cajones.

Figura 130: Cajones de grandes dimensiones, La Condamine (izquierda) [116] y Adriatic (derecha) [68].

Otro ejemplo de cajones de grandes dimensiones y el más reciente, es el utilizado en la construcción de la barrera de protección de Venecia, donde la base de las compuertas son cajones de hormigón fabricados en diques secos y posteriormente colocados en su emplazamiento definitivo (Figura 131).

Figure 3: a) Chioggia shoulder caisson; b) Chioggia barrier caisson

Figura 131: Cajones utilizados en el sistema MOSE de protección en Venecia [82].

2.11 Últimas evoluciones: Cajones en materiales compuestos

2.11.1 Duques de Alba Puerto el Rosario

La utilización de nuevos materiales como son los materiales compuestos está haciendo evolucionar la tecnología de cajones, tanto por su mezcla con el hormigón para obtener un material con mejores prestaciones y así optimizar el dimensionamiento de las estructuras, como por su utilización directa, obteniendo ejemplos como el de los Duques de Alba del Puerto del Rosario en materiales compuestos (Figura 132) [117].

Figura 132: *Duque de Alba en materiales compuestos (cortesía Acciona).*

Esto abre un nuevo camino en la construcción de cajones, y se añade un material más a la lista de los ya utilizados para esta técnica a lo largo de la historia: madera, *opus caementitium*, hierro y hormigón armado. Este material, de uso común en la industria naval, podría llevar a cerrar el círculo de la historia (de momento), volviendo a utilizar grandes elementos similares a barcos (como fue el caso de la *Mirabilis navis*) para conformar los diques, con las características estructurales, navales y estáticas adecuadas acordes a las necesidades actuales. Estas nuevas embarcaciones tienen grandes posibilidades de cara a rápidas construcciones en zonas remotas.

2.11.2 Torres de captación agua salada en Desaladoras y Ciclos combinados

La creciente utilización de los materiales compuestos ha llevado a la construcción de pequeñas estructuras submarinas, que se suelen construir en hormigón armado a partir de cajones. Estas estructuras son las torres de toma de agua de las desaladoras o bien de las plantas de ciclo combinado.

Todavía son ejemplos a pequeña escala, pero suponen un importante avance en cuanto a la utilización de los materiales compuestos en ambientes marinos, o, mejor dicho, submarinos.

En las imágenes se pueden ver fotos y perspectivas de varias torres de captación fabricadas en materiales compuestos (Figuras 133 – 135), que, si bien son todavía casos contados, no dejan de ser pasos hacia adelante en la tecnología de los materiales compuestos en obras marítimas, y acercándose

cada vez más a las formas y dimensiones de cajones. A nivel coste todavía su precio es elevado, pero permiten grandes ahorros en cuanto a medios auxiliares (grúas principalmente); en el caso de problemas de espacio o dificultad en disponer de puerto cercano, su gran ligereza (del orden de 6 tn frente a más de 100 tn la estructura equivalente en hormigón) permite manejarlos con facilidad con una grúa de pequeño tamaño. Se puede así proceder a su montaje en escasos días, y ponerla a flote incluso a proximidad de la obra debido a su ligereza y facilidad de manejo. Quedará luego lastrarla para así asegurar la estabilidad de la estructura.

Figura 133: Torre de captación en materiales compuestos (Gentileza Global Composites).

Figura 134: Elementos torre de captación en materiales compuestos (Gentileza Global Composites).

Figura 135: Vista isométrica torre de captación en materiales compuestos (Global Composites).

2.11.3 Otros ejemplos de construcción con materiales compuestos en obras marítimas

Debido al óptimo comportamiento frente a la corrosión de los materiales compuestos, cada vez son más numerosos los ejemplos de estructuras en contacto con el agua de mar fabricados en materiales compuestos.

Hay ejemplos de construcción de compuertas para esclusas en los Países Bajos (Figura 136), con unas dimensiones de 13 metros de alto y un ancho total entre las dos hojas de 10,5 metros [118].

Figura 136: Compuertas de esclusas en materiales compuestos [118].

También se han utilizado materiales compuestos en tablestacas colocadas en frentes de costa como es el caso de las tablestacas de fibra de vidrio SUPERLOC (Figura 137) en Estados Unidos.

Figura 137: Tablestacas fibra de vidrio [119].

A mucho menor escala se dan ejemplos de este tipo en fibra como es el caso de pontonas construidas por la marca Rodman (Figura 138). Se pueden considerar como modelos no tan reducidos de cajones fabricados en materiales compuestos. En los planos se aprecian las dimensiones de estas pontonas (Figura 139).

Figura 138: Pontona Rodman en fibra de vidrio (cortesía de Rodman).

MAIN CHARACTERISTICS

LENGTH OVERALL _____ 43,00m.
 BEAM _____ 10,50m.
 DEPTH _____ 3,60m.

Figura 139: Planos y dimensiones pontona en Fibra de vidrio (Cortesía Rodman).

2.12 ANALOGÍAS HISTÓRICAS

Como se ha mostrado a lo largo de los diferentes capítulos, existen muchos sistemas que, con las adaptaciones propias de cada época, se han repetido a lo largo de la historia con similitudes importantes. Así queda la tabla siguiente (Tabla 9), que muestra diversos ejemplos en los que se pueden identificar soluciones muy similares para los mismos problemas.

CONCEPTO	HISTORICO	ACTUAL
Cimentaciones de puente utilizando cajones	PUENTE SAUMUR (S XVIII)	PUENTE RION ANTIRION (2004)
Transporte de cajones en hormigón sobre barco	PORTUS S.I D.C	Siglo XX
Cajones botados mediante dique flotante	KOBE 1907	ABIDJAN 2017
Casco de embarcación formando el núcleo del dique	Portus S.I D.C	Dique Candás

Tabla 9: Analogías históricas entre cajones.

3 METODOLOGÍA

La motivación de esta Tesis Doctoral no era otra que la de la búsqueda de soluciones constructivas de cajones para diques, que fuesen, por un lado, fácilmente transportables (y poder así facilitar el uso de esta tecnología en lugares remotos) y por otro que además la solución fuera más sostenible, creando un menor impacto en el Medio Ambiente que la solución tradicional de cajones de hormigón armado.

Esta investigación camina en ese sentido, y ese itinerario se ha ido recorriendo mediante artículos. Es necesario ir comprobando por etapas los conceptos, con el objetivo de ir confirmando la viabilidad de la solución, inicialmente con el menor gasto posible de recursos aprovechando casos reales e investigaciones ya existentes.

Con objeto de tener más elementos de juicio, es importante conocer a fondo la evolución histórica de la construcción de cajones y, mediante el amplio Estado del Arte anteriormente presentado (y recogido en los artículos 1 y 2), se pueden deducir una serie de elementos importantes a la hora de decidir tanto las funcionalidades, como las tendencias en los materiales, así como los elementos auxiliares necesarios para su construcción. A todo esto, ayuda el Estado del Arte. En todos los casos es de utilidad, pero en este concreto, además de ser muy edificante, ha permitido una amplia visión de la evolución de los cajones y de cómo las necesidades y algunos fracasos también, han llevado hasta la situación actual.

Además de esta revisión de la construcción de cajones en obras marítimas, eran precisos otros elementos para completar el rompecabezas, como son los posibles materiales a utilizar, así como las limitaciones o restricciones a la hora de evolucionar en la construcción de estos elementos.

Analizando las tendencias actuales en materiales, se puede apreciar la importancia creciente de la utilización de los materiales compuestos en Infraestructuras, ya razonablemente extendidos en la construcción de puentes. Así mismo existen cada vez más ejemplos de su utilización en contacto con ambientes agresivos, como en el caso de tablestacas, compuertas de esclusas y el de construcción de cajones para su utilización como Duques de Alba en el puerto del Rosario en Fuerteventura. Este último caso, es el que marca, en la opinión del autor, la dirección a seguir; pero, para llegar a la construcción a gran escala de cajones en este material, hay que realizar una serie de comprobaciones previas para demostrar o no la idoneidad del sistema.

A partir de ese ejemplo concretamente, se sabe que es una solución factible. Queda ahora saber si el sobrecosto económico que actualmente supone este tipo de construcción tiene compensaciones en otros campos que lleven a concluir que es una solución idónea. Hasta hace no tanto parecía una solución desorbitada debido a su coste, pero con los criterios actuales, en los que se analiza la vida

completa de un producto desde su fabricación hasta el final de su vida, el coste ya puede no estar tan descompensado.

Por otro lado, y en lo que se refiere al análisis exclusivamente de la solución técnica, se ha podido apreciar a lo largo del Estado del Arte, que la investigación en diques lleva hasta la necesidad de construir cajones lo más largos posibles para mejorar su comportamiento frente al oleaje. Adicionalmente, se van definiendo formas más complejas para los cajones, como son cámaras de disipación con formas singulares, o receptáculos para la inserción de turbinas de producción de energía con el oleaje.

Todas estas formas teóricas ya definidas, no encuentran aún solución constructiva económicamente factible debido a su complejidad, por lo que es patente la necesidad de encontrar los sistemas constructivos y materiales que faciliten llevar a cabo estas soluciones.

Siendo así claro el objetivo futuro el de llegar a los cajones en materiales compuestos, para poder demostrar que es viable (no sólo en términos técnicos, sino también en los económicos y ambientales), las primeras etapas a seguir son las de ir verificando que la evolución de la solución actual hacia los materiales compuestos es económica y ambientalmente justificable.

Se sabe que su coste inicial es superior a las soluciones tradicionales (salvo en casos singulares, como podría ser en áreas remotas, donde los materiales tradicionales tienen un elevado coste, mucho mayor que el habitual) pero el análisis debe de ser global. Para ello, la variable de la ecuación a incluir en todo este razonamiento es la de la Sostenibilidad y el Impacto Ambiental.

La sostenibilidad en la obra civil es necesaria, debiendo conocer indicadores y parámetros objetivos que faciliten la toma de decisión para la obtención de la solución más adecuada. El Ciclo de Vida es la herramienta que permite su análisis, considerando toda la vida útil de la infraestructura y no solo la fase de construcción, sino también su mantenimiento, conservación y fin de uso, y, por ello, la durabilidad.

La Unión Europea, dentro de su nuevo Green Deal va más allá aún, y está buscando la transformación hacia una Economía Circular, que llevaría a producir productos que puedan ser totalmente reciclados y reutilizados: “ las industrias de uso intensivo de energía como son las del acero, cemento y productos químicos (muy presentes en construcción) son indispensables para la Economía europea, pero la descarbonatación y modernización de estos sectores es esencial” [120, 121] . En infraestructuras quizás se está todavía un poco lejos de eso, pero un primer paso es conocer el impacto de la vida completa de todo el producto y cuantificarlo, para buscar sobre qué componentes hay que actuar.

El Ciclo de Vida es la herramienta que va a permitir acotar qué es lo importante y por dónde se debe empezar, así como, los planes a corto plazo para garantizar una Construcción Sostenible y una Economía Circular.

Ya nadie hoy en día es ajeno a las repercusiones del Cambio Climático, y existen varias iniciativas a nivel institucional para reducir los efectos de las actividades humanas sobre este fenómeno.

Según la definición del Informe Brundtland de Naciones Unidas: “Desarrollo Sostenible es aquel que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras”. A raíz de este concepto, las Naciones Unidas han establecido en 2015 los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Figura 140) dentro de la Agenda 2030, y en concreto para las infraestructuras marítimas, interesan los Objetivos nº9 (Industria, Innovación e Infraestructura) , nº 13 (Acción por el Clima) y nº 14 (Vida Submarina) [122].

El objetivo nº9 promueve construir Infraestructuras resilientes, así como promover industrialización inclusiva y sostenible, fomentando además la innovación. El objetivo nº13 se centra en la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático, y el nº 14 en la conservación y utilización en forma sostenible de los océanos los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible (ODS).

Figura 140: Las infraestructuras como base del desarrollo sostenible [123].

Por otro lado, la Comisión Europea en su firme compromiso con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y Acuerdos de París, dentro de la Estrategia Europa 2020, ha puesto en marcha gran número de iniciativas y políticas con el objetivo de reducir los impactos y favorecer la Economía circular, a través del Plan de Acción para la Economía Circular adoptado en Diciembre de 2015: “La transición a una economía más circular exige la introducción de cambios en todas las cadenas de valor, desde el diseño de los productos hasta los nuevos modelos de gestión y de mercado” [124].

La Estrategia de Economía Circular incluye, para su adecuado seguimiento y evaluación de resultados, un marco de seguimiento (“*Circular Economy Monitoring Framework*”) en el que es de vital importancia estimar las huellas climática y ambiental de las infraestructuras, y para ello tener en consideración la vida completa del producto. Se busca cerrar el bucle (“*closing the loop*”) para que un máximo de materiales sean reaprovechados y no se tenga así que recurrir a la extracción de nuevas

materias primas [124]. La Economía circular mantiene el valor añadido de los productos el mayor tiempo posible y excluye los residuos.

Para ello, se ha introducido un nuevo concepto en la valoración, tanto del coste económico, como en el impacto: la utilización de la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA son sus siglas en inglés). Este concepto hace que la matriz de decisión en infraestructuras y en otros campos, ya no sea únicamente el coste de construcción, sino que la visión sea a largo plazo y se tenga en cuenta todo el proceso desde la fabricación hasta el final de utilización del producto (el concepto de la Cuna a la tumba: “*Craddle to grave*”). Esta visión más amplia y la tendencia al establecimiento de este nuevo criterio como elemento de decisión de administraciones públicas hacen que las repercusiones económicas a corto plazo de la construcción con materiales de alta tecnología como podrían ser los materiales compuestos se vean atenuadas por un análisis más global, que tiene en cuenta el proceso constructivo, los impactos, el mantenimiento y el fin de vida del producto.

Un primer elemento de comparación será la utilización del caso existente en el recrecido del espaldón del puerto de Escombreras, en el que se sustituyó la solución tradicional de hormigón armado con acero, por una mixta con refuerzo en barras de fibra de vidrio en el lado mar y de acero en el lado tierra. El cálculo realizado a nivel de proyecto de las diferentes opciones y su valoración económica (Solución acero, Solución PRFV y Solución mixta acero-PRFV) permiten tener los datos concretos y afinados del dimensionamiento y de su coste económico. Con estos datos se ha podido calcular el Ciclo de Vida de esta parte del proyecto (no ha sido calculado el Ciclo de Vida de toda la obra, sino exclusivamente la parte de recrecido del espaldón que se quería comparar, siendo los 400 metros de recrecido de espaldón la Unidad Declarada – *Declared Unit*-) y así llegar a unas primeras conclusiones, teniendo en cuenta por un lado el coste económico, y por otro el coste ambiental.

El carácter nocivo del agua de mar queda limitado en buena parte de la literatura a su interacción con las barras de acero embebidas en el hormigón, por lo que utilizar las barras de fibra evitaría este efecto perjudicial del ambiente marino, habilitando dicha combinación.

Existen referencias técnicas en las que se analiza la posibilidad de emplear hormigón armado con refuerzos de barras de fibra de vidrio e incluso utilizando agua de mar para su amasado [125, 126]. Se puede asumir que, dimensionando adecuadamente el refuerzo en fibra, y pese a que al final de su vida útil de 100 años se podría tener una resistencia residual del 70% sobre la inicial [125], el hormigón reforzado con fibras no precisaría de mantenimiento al no haber sufrido corrosión, mientras que el convencional precisaría de un mantenimiento periódico. Esta investigación plantea el cálculo con una hipótesis mínima, pero que mostrará la diferencia entre considerar el mantenimiento y no hacerlo,

dando así mayor valor a los resultados del Ciclo de Vida de las estructuras armadas con materiales compuestos [125].

Tras esta primera aproximación, se ha dado un paso más comparando este mismo cambio de material de refuerzo en la construcción de un cajón en una obra marítima. En este caso, se han utilizado dos hipótesis. Por un lado, la empresa ATP ha realizado el dimensionamiento del refuerzo del cajón con barras de fibra de vidrio. Agradezco la inestimable ayuda de Aniello Giamundo, que no sólo ha realizado el cálculo de dicha armadura, sino que además ha proporcionado su documento preliminar de Evaluación del Ciclo de Vida de las barras de fibra de vidrio, parámetro fundamental para realizar las comparaciones. Por otro lado, se han simulado diferentes hipótesis de ratios entre la armadura de acero y de fibra de vidrio, a partir de la experiencia del fabricante de barras de fibra Owens Corning (cortesía de Bryan Barragan, al que agradezco su colaboración también), y no es otro que la multiplicación por 1,2- 1,5 de la superficie de refuerzo en acero; la relación en el cálculo de ATP asciende a 2, por lo que podría haber espacio para la optimización.

Utilizando el despiece de las armaduras del cajón tipo I de ampliación del puerto de Valencia, se ha podido calcular una equivalencia de armado en barras de fibra de vidrio según el criterio anteriormente citado.

Con estos resultados se ha podido realizar el mismo cálculo que en el caso del Espaldón de Escombreras, es decir, cálculo económico de las diferentes soluciones y cálculo de su impacto a través de la Evaluación de su ciclo de vida; en este caso la Unidad Declarada es un cajón. Para restar complejidad al cálculo, y dado que para estimar la repercusión de uso de un cajonero en el Ciclo de Vida se precisaría de una estrecha colaboración con alguna constructora que disponga de él, no se ha tenido en cuenta este parámetro. Los resultados habrán por tanto de tenerse en cuenta en su relatividad, para comparar la opción tradicional y con barras de fibra, obviando el proceso constructivo que se vaya a utilizar.

El Ciclo de Vida es la herramienta que permite analizar los impactos producidos por cada uno de los materiales de un producto (en este caso una infraestructura) teniendo en cuenta diversos indicadores (Emisiones de CO₂, Acidificación, destrucción capa de Ozono ...), y todo esto a lo largo de la vida completa de los productos, desde su fabricación, hasta su envío a vertedero o reutilización al finalizar su vida útil.

Con todos estos datos se tiene el valor del Ciclo de Vida de las soluciones, y se pueden al menos apreciar las tendencias que van a permitir evaluar cual es la solución más sostenible en términos globales.

Si bien es cierto que son cada vez más numerosas y más habituales las empresas que disponen de EPD (Environmental Product Declaration) de sus productos, en las que se exponen los diferentes indicadores de impacto, todavía hay muchos proveedores de materiales de construcción que carecen de la misma y se deben hacer las estimaciones en muchos casos con valores genéricos de las bases de datos, tipo Ecoinvent. Según la normativa utilizada, hay toda una serie de indicadores, pero en este caso presentamos en la Tabla 10 los parámetros fundamentales, que se incluyen en el EPD y que son los que nos permiten comparar a través de un análisis multicriterio, la idoneidad de un producto u otro.

Tabla 10: Tabla de indicadores Ciclo de Vida según EN 15978 [127].

Impact category	Acronym
Global warming	GWP
Ozonelayer depletion	OPD
Acidification	AP
Eutrophication	EP
Photochemical oxidation	POCP
Abiotic depletion	ADPE

Las empresas constructoras tienen cada vez más en cuenta este factor y van calculando el Ciclo de Vida para casos concretos, pero no está ni mucho menos sistematizado su uso, ni lo exigen las administraciones. La Evaluación del Ciclo de Vida permite tomar decisiones con mucha mejor información, y todo esto siguiendo unos estándares, como son la ISO 14040 [128] y la ISO 14044 [129] que proporcionan el marco de trabajo. Combinado con otros parámetros, como es el coste económico, permite buscar soluciones que utilicen los recursos de una manera más eficiente. Las EPD, se regulan mediante la ISO 14025 [130]. El ILDC (International Life Cycle Data System) se creó para guiar en este ámbito, y permitir que la información sea más consistente y los datos tengan una calidad mayor [131].

Existen numerosos ejemplos de la utilización del armado en fibra de vidrio en estructuras en ambientes agresivos, e incluso algunas referencias en cálculo de Ciclo de Vida de las mismas construidas con materiales compuestos en ambientes marinos, y su comparación con métodos tradicionales, como el proyecto SEACON [126, 132]. En este proyecto además utilizan agua de mar como agua de amasado y hormigón reciclado como árido, por lo que se dispone de todo un repertorio de materiales con menor impacto que son probados experimentalmente. La preocupación por la durabilidad del hormigón armado en ambientes marinos y su evaluación durante toda la vida útil ofrece un número creciente de experiencias de cálculo de su ciclo, llegando a soluciones alternativas

que disminuyen el mantenimiento del hormigón, como en el muelle sobre pilotes de El Progreso Pier, Yucatán, México [133].

Se ha utilizado el análisis del Ciclo de Vida con objeto de poder comparar soluciones con diferentes materiales y no sólo ver cuál puede ser la más adecuada, sino también ver posibles optimizaciones complementarias y definir la línea de trabajo y, con ello, la investigación en estructuras que minimicen el impacto. La sustitución de los diques de escollera en talud por los diques verticales con cajones de hormigón armado ya supusieron una importante mejora medioambiental, con este paso adicional se avanza en la sostenibilidad, la mejora ambiental y la durabilidad de los materiales [134].

Se ha utilizado el Software oneClick LCA, en su versión de investigación, con el que se han podido comparar gran número de casos. Este software utiliza como método de evaluación el CML-IA 2012 creado por la Universidad de Leiden en los Países Bajos en 2001 [135], y requerida por la normativa europea EN 15978 [127] y EN 15804 [136]. One Click LCA ha sido verificado por el organismo ITB (Organismo de certificación notificado a la Comisión Europea designado para la certificación de productos de construcción) en el cumplimiento de normativas de Evaluación del Ciclo de Vida [137].

Mediante este software se han analizado los parámetros que, de manera resumida, se exponen a continuación:

- **Calentamiento Global:** *Global warming potential* (greenhouse gases): medido en **kg CO₂ eq**, “Describe los cambios en las temperaturas de superficie locales, regionales o globales causados por una mayor concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera” A menudo denominada como “huella de carbono”
- **Agotamiento capa de Ozono:** *Ozone layer depletion*, medido en **kg CFC₁₁ eq**, “Describe el efecto de sustancias en la atmósfera que degradan la capa de Ozono”.
- **Acidificación:** *Acidification*, medida en **kg SO₂ eq**, “Describe el efecto acidificante de las sustancias en el Medio Ambiente.”
- **Eutrofización:** *Eutrophication*, medida en **kg PO₄ eq**, “Describe el efecto de agregar nutrientes minerales al suelo o al agua.”.
- **Agotamiento de recursos abióticos – elementos,** *Photochemical oxidation*, medido en **kg C₂H₄ eq**, “Describe el efecto de las sustancias en la atmósfera para crear smog fotoquímico, también conocido como smog de verano.”
- **Agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles,** *Abiotic depletion*, medido en **MJ**, uso total de Energía Primaria.

Este estudio se acota a un cierto entorno (*Boundary System*) expuesto a continuación.

Las simulaciones realizadas no son números absolutos, ya que se carece de todos los elementos que conforman la construcción de los ejemplos tratados, y habría que completar la información en un estudio posterior y con el apoyo de empresas constructoras para conocer todos los detalles de sus procesos. Entre ellos los equipos auxiliares, los consumos energéticos, los combustibles y grasas, la gestión de residuos ...

Estos elementos completarían el análisis y permitirían conocer el valor absoluto del Ciclo de Vida de las infraestructuras estudiadas. Se han analizado valores parciales, y calculado los que varían entre unos casos y otros, teniendo una idea muy clara de lo que permite optimizar impactos y lo que no, siendo conscientes de las limitaciones de los resultados en términos absolutos.

Estos números relativos son suficientes para poder evaluar el impacto de la modificación de los materiales que conforman las infraestructuras estudiadas. Se han utilizado, cuando estaban disponibles sus EPDs, materiales fabricados en España, y en el caso contrario, se han utilizado genéricas o bien de otros países, con objeto de poder realizar comparaciones concluyentes (tal es el caso de los cementos SR, de los que no se han encontrado EPD en los suministradores españoles). Se ha buscado ceñirse al máximo al contexto de realización de las obras, debiéndose analizar estos resultados dentro de sus límites, tanto geográficos como sociales y operacionales.

Se ha omitido el proceso constructivo elegido, por lo que los cálculos son independientes de la utilización de un cajonero o bien de la construcción en dique seco. También están excluidos los materiales y obras provisionales necesarios para la construcción del cajón. En esta investigación se han estudiado dos casos, como se ha referido anteriormente.

Al tratarse de una investigación básica, se han comparado los elementos que permiten obtener conclusiones. Se han evaluado los más importantes que intervienen, comparando las variaciones en las unidades representativas, con objeto de obtener unos resultados coherentes y, sobre todo, comparables.

En este caso, al analizar la influencia de cada uno de los materiales básicos en el resultado, se ha podido apreciar la mejora obtenida con las barras de fibra, al igual que la importancia de los demás materiales, abriendo así vías adicionales de mejora.

Al tratarse de uno de los mayores emisores de emisiones de CO₂ en la industria [138], se ha analizado también el cemento, realizando la comparación entre diferentes tipos de cementos, y por ende, entre los hormigones fabricados con estos cementos. Esto proporciona un elemento adicional de mejora, en el camino señalado de minimización del impacto de las obras marítimas. En ambos casos la

dosificación es la de un hormigón utilizado en la construcción de cajones en el Puerto de Barcelona en 2017, con un contenido de cemento de 350 kg/m^3 y una relación agua/cemento = 0,44. Esta dosificación incluye cemento resistente a los sulfatos CEM I SR. Al no tener disponibles EPDs de cementos resistentes a los sulfatos en España, se han utilizado para los cálculos los valores de un cemento sueco en el caso del CEM I SR y de un cemento alemán en el caso del CEM III SR procedentes de la base de datos del software oneClick.

Una siguiente etapa, pero que ya no forma parte de esta tesis, sería reproducir estos cálculos en el caso de un cajón totalmente construido en materiales compuestos. Para ello habría que realizar los cálculos de la estructura correspondiente, así como de su coste y ciclo de vida, de manera que se pudiera comparar con las verificaciones anteriores. En ese caso ya sí se deberá incluir la repercusión del cajonero, ya que la solución de cajón de fibra no precisaría de este elemento auxiliar, y el cálculo se vería falseado si no se tiene en consideración.

Si todo esto llevase a resultados en los que quedase demostrado que el Ciclo de Vida de un cajón en materiales compuestos tiene menos impacto que la solución tradicional, sería un importante revulsivo para la utilización de esta tecnología. Llegados a ese punto de evolución, la posibilidad de utilización de estos cajones más ligeros en emplazamientos remotos por su más fácil remolcado, podría comenzar a valorarse en un futuro no tan lejano.

4 RESULTADOS

4.1 El Ciclo de Vida y su aplicación a la ingeniería marítima

El tercer estudio publicado (*Evaluation and Optimization of the Life Cycle in Maritime Works*) es el que de una manera cuantitativa pasa a valorar diferentes soluciones utilizando materiales compuestos, y, mediante el cálculo de su Ciclo de Vida, permite comparar cuales son las más sostenibles y las vías futuras a seguir para mejorar aún más. Los resultados y las conclusiones aquí expuestos son los que forman el cuerpo de dicho estudio.

La investigación se abre a las nuevas vías de investigación, marcando el objetivo de valorar de una manera cuantitativa si las estructuras marítimas, fabricadas totalmente en materiales compuestos, pueden llegar a ser la solución, teniendo en cuenta el Ciclo de Vida completo de la estructura.

Se encuentra incluido en el Apéndice 3.

4.2 Casos prácticos y resultados

En esta investigación se han estudiado dos casos. Por un lado, el ejemplo del espaldón del dique ya construido en el puerto de Escombreras, Cartagena, Sureste de España, en el que se introdujo refuerzo en barras de fibra de vidrio en el lado mar del mismo. Dado que el diseño se realizó tanto íntegramente en acero (solución 3A) , como en barras de PRFV (solución 3B), para finalmente optarse por una solución mixta (PRFV y acero) únicamente por motivaciones económicas, se han podido comparar las 3 soluciones (diseñadas y calculadas por la Ingeniería que realizó el Proyecto [139] en lo referente al ciclo de vida y ver así la que mejores resultados ofrece).

Como segundo ejemplo se ha analizado uno de los cajones construidos en la última de las ampliaciones del Puerto de Valencia, Este de España. Dicho cajón ha sido reforzado con barras de acero y se han extraído las cantidades a través del Proyecto Constructivo de dicha ampliación [140] . El dimensionamiento del refuerzo alternativo en fibra ha sido realizado por ATP, fabricante de barras de fibra de vidrio.

4.3 Cálculos de casos

En el caso del Espaldón de Escombreras durante la realización del proyecto constructivo se dimensionaron todas las soluciones, pero con el objetivo de encontrar la solución que aunaba un

mejor comportamiento de la estructura en un ambiente agresivo y el criterio de una inversión económica equilibrada. No eran los criterios de Ciclo de Vida los que pilotaban el proceso, pero los dimensionamientos existentes son de utilidad para la comparación.

En el caso del cajón del puerto de Valencia, no había ninguna alternativa calculada al refuerzo con barras de acero, por ello se ha considerado el cálculo de ATP del refuerzo de la estructura con fibras [141].

En ambos casos se sigue el mismo proceso para analizar los resultados; se introducen los materiales básicos según el dimensionamiento obtenido, y esto en las soluciones base y las alternativas. Con estos resultados se pueden comparar los valores de los indicadores en cada una de las situaciones y ver qué solución es la de menos impacto. Dado que se conocen las cantidades de cada uno de los materiales, se puede estimar la influencia de cada uno de ellos, y catalogar por orden de importancia las mejoras que adicionalmente se podrían introducir. Esto llevará finalmente a unos comparativos entre alternativas a la búsqueda de la solución medioambientalmente menos impactante.

4.3.1 Espaldón Escombreras

Dado que estaban disponibles las tres opciones de armado (sólo acero, sólo fibras, mixto acero-fibras), se ha podido calcular el ciclo de vida de los 3 casos con las cantidades reales previstas en el diseño. En la Figura 141 se ofrece la sección tipo y de armado del espaldón (caso de armado en acero) que con leves variaciones se mantiene en los otros casos [139].

Figura 141: Sección tipo del espaldón [139].

Se han extraído las mediciones del Proyecto constructivo, en el que se calcularon los 3 posibles casos, y se pueden ver desglosadas en la Tabla 11.

Tabla 11: Resumen de mediciones alternativas de Espaldón Escombreras [139].

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDADES		
		ALTERNATIVA 3A (Acero)	ALTERNATIVA 3B (PRFV)	ALTERNATIVA MIXTA
Hormigón HA 35/20/B/IIIc+ Qb + E. Superestructura	m ³	2.988,00	3.108,00	2.960,00
Kg Acero B-500-S elaborado y colocado en armadura de superestructura	kg	194.220,00	0,00	57.613,00
Conexión del espaldón nuevo con el existente con acero B-500-S	Ud	6.000,00		2.800,00
Poliéster reforzado con fibra de vidrio, elaborado y colocado en armaduras	Kg		93.240,00	65.121,00
Conexión del espaldón nuevo con el existente con barras de PRFV $\Phi 20$	Ud		2.400,00	3.600,00
Conexión del espaldón nuevo con el existente con barras de PRFV $\Phi 25$	Ud		6.000,00	
Cuantía acero	kg/m ³	65		19,5
Cuantía PRFV	kg/m ³		30	22

Hormigón HA 35/20/B/IIIc+ Qb + E.: A = hormigón armado 35 N/mm², F = consistencia fluida, 20 mm = tamaño del árido, IIIc = ambiente marino splash zone, Qb = ataque químico medio.

A partir de estos valores, se han comparado las 3 estructuras (Figura 142), sin tener en cuenta ningún tipo de mantenimiento; eso será objeto de análisis posteriormente. En todos los casos se ha considerado que los materiales no son sustituidos a lo largo de la vida útil de la estructura, es decir 100 años, lo que es favorable en términos de Ciclo de Vida para la estructura reforzada con acero. A pesar de ello, se obtienen mejores valores para la estructura en fibras.

Figura 142: Life cycle assessment (LCA) comparación en todas las categorías.

Se puede apreciar en la Figura 142 que en las dos soluciones que incluyen el refuerzo con fibra de vidrio, mejoran los indicadores. En concreto, y por tener una valoración cuantitativa, en la Tabla 12 se aprecia la variación entre el caso base (3A armado con acero) y el caso 3B de armado con fibra de vidrio.

Como dato para tener en cuenta, en la construcción definitiva se eligió la opción mixta por consideraciones económicas en el momento de inversión, ya que la solución ofrecía un equilibrio entre prestaciones y coste; se va a intentar aquí aportar una visión más amplia del caso. De manera cuantitativa, mejoran los impactos en los indicadores entre un 5,8% y un 19%, por lo que la mejora en el Ciclo de Vida es patente, sin entrar aún en las posibles mejoras en el mantenimiento al no haber corrosión.

A continuación, para tener una mejor percepción de los elementos que más influyen en los impactos, se exponen los gráficos de burbujas (en el caso del calentamiento global - Global Warming - pero son análogos en los demás indicadores) que muestran de una manera muy visual la influencia de cada uno de los materiales en la Evaluación del Ciclo de Vida (Figura 143). Podemos observar que la importancia del refuerzo es relativa, y que tanto el árido como el cemento tienen un peso mayor. Es de destacar también la influencia de las resinas utilizadas para las barras de anclaje.

Por tanto, en la discusión de variantes se analizarán las posibles mejoras en función del cemento utilizado, además de otros parámetros.

Tabla 12: Comparación cuantitativa soluciones 3A y 3B.

Sector		Global Warming	Acidification	Eutrophication	Ozone Depletion Potential	Formation of Ozone of Lower Atmosphere	Total Use of Primary Energy ex. Raw Materials
		kg CO ₂ eq	kg SO ₂ eq	kg PO ₄ eq	kg CFC ₁₁ eq	kg Ethene	MJ
A1–A3	Construction Materials	1,09E6 +5.7%	2,91E3 +18%	7,05E2 +20%	1,02E–1 +8.4%	2,81E2 +5%	1,01E7 +15%
A4	Transportation to site	2,63E4 +9.1%	1,18E2 +9.6%	2,56E1 +9.6%	5,18E–3 +9.1%	1,73E0 +6.6%	7,51E5 +9%
Total		1,12E+06	3,06E+03	7,37E+02	1,07E–1	2,86E+02	1,10E+07
Comparing total results with 3-Case 3B GFRP /m ³							
3-Case 3B GFRP /m ³ Total		1,06E+06	2,60E+03	6,17E+02	9,89E–2	2,73E+02	9,59E+06
3-Case 3A Steel compared with 3-Case 3B GFRP /m ³		5,80%	18%	19%	8,40%	4,90%	15%

Figura 143: Gráficos de burbujas de los 3 casos (ejemplo para calentamiento global).

Se han reunido en una única gráfica los valores de las 3 soluciones a partir de la tabla comparativa de impactos (Tabla 13), para poder apreciar de manera más clara las comparaciones en la Figura 144..

El caso 5 armado sólo con PRFV (solución 3B) es el de menor impacto, aunque también el más caro.

Tabla 13: cuadro comparativo indicadores soluciones Espaldón Escombreras.

Impact Category	Acronym	CASE 4 (3A)	CASE 5 (3B)	CASE 7 (MIXED)
Global warming (kg CO ₂ eq)	GWP	1,12E+06	1,06E+06	1,10E+06
Ozone layer depletion (kg CFC11e)	OPD	1,07E-01	9,89E-02	1,06E-01
Acidification (kg SO ₂ eq)	AP	3,06E+03	2,60E+03	2,99E+03
Eutrophication (kg PO ₄ eq)	EP	7,37E+02	6,17E+02	7,25E+02
Formation of ozone (kg ethene)	POCP	2,86E+02	2,73E+02	2,81E+02
Use of primary energy (MJ)	ADPE	1,10E+07	9,59E+06	1,07E+07

Figura 144: Gráfico radar soluciones espaldón Escombreras.

Otra conclusión interesante que se ha podido deducir de los gráficos de burbujas es la importancia relativa de la armadura, por lo que hay margen para mejorar aún más el impacto del espaldón, como sería mejorando otros componentes como son el cemento y el árido.

Se concluye por tanto que la estructura armada con PRFV es la óptima en términos de Ciclo de Vida, pero que hay posibilidad de mejorarlo aún más a través de modificaciones en las características de los demás materiales.

4.3.2 Cajón tipo I—Puerto de Valencia

En el caso del cajón tipo I de la ampliación del dique de Valencia (Figura 145), se ha procedido de una manera similar, sólo que los datos proceden de dos fuentes diferentes. En lo referente al cálculo del armado del cajón con barras de acero corrugado, se han utilizado las cantidades expuestas en el proyecto constructivo [140].

La empresa ATP ha realizado el dimensionamiento del armado del cajón en barras de PRFV [141] .

Figura 145: Planta y sección tipo Cajón dique puerto Valencia [141] .

Se ha podido por tanto calcular el Ciclo de Vida de un cajón construido realmente, considerando por un lado la armadura que se utilizó, y comparando con un dimensionamiento alternativo en PRFV. En la Tabla 14 se expone el resumen de los materiales más importantes de la estructura:

Tabla 14: Mediciones más importantes de cajón tipo I Dique Valencia.

Tipo de armado	Volumen hormigon (m ³)	Acero (kg)	PRFV (kg)	Cuantía (kg/m ³)
Acero	1.864	76.003	0	40,76
PRFV	1.864	0	44.361	23,8

Se puede observar en la Figura 146 que todos los indicadores del Ciclo de Vida analizados mejoran en la solución armada con PRFV. De manera cuantitativa los resultados de la Tabla 15, arrojan mejoras desde el 5,6% en el caso del indicador de calentamiento global (GWP), hasta un 27% en el caso del agotamiento del potencial de ozono (OPD).

Figura 146: Comparación indicadores Cajón con refuerzo Acero y PRFV.

Tabla 15: Cuadro comparativo indicadores de impacto Acero vs PRFV.

	Sector	Global Warming	Acidification	Eutrophication	Ozone Depletion Potential	Formation of Ozone of Lower Atmosphere	Total Use of Primary Energy ex. Raw Materials
		kg CO ₂ eq	kg SO ₂ eq	kg PO ₄ eq	kg CFC ₁₁ eq	kg Ethene	MJ
A1-A3	Construction Materials	7,28E5 +6%	1,52E3 +15%	2,87E2 +20 %	7,51E-3 +97%	1,02E2 +13%	4,06E6 +23%
A4	Transportation to site	4,55E4 +2.4%	2,02E2 +2.5%	4,38E1 +2.5 %	8,93E-3 +2.4%	3,09E0 +2%	1,3E6 +2.4%
A5a	Site operations and site waste handling	8,39E0 0 %	4,54E-2 0%	2,3E-2 0 %	9,16E-7 0%	2,04E-3 0 %	1,77E2 0%
A5b	Site waste transportation						
A5	Construction/installation process	8,39E0 0%	4,54E-2 0%	2,3E-2 0 %	9,16E-7 0%	2,04E-3 0%	1,77E2 0%
	Total	8,03E+05	1,78E+03	3,59E+02	1,82E-2	1,13E+02	5,58E+06
	Comparing total results with 4-Caisson GFRP CEM I SR						
	4-Caisson GFRP CEM I SR Total	7,60E+05	1,58E+03	3,10E+02	1,43E-2	1,01E+02	4,80E+06
	4-Caisson Steel CEM I SR compared with 4-Caisson GFRP CEM I SR	5,60%	13%	16%	27%	11%	16%

En el caso del cajón se aprecia en los gráficos de burbujas (Figura 147) que el factor determinante es el cemento, por lo que también hay margen de mejora sustituyendo el cemento por otro de mejores prestaciones ambientales.

Figura 147: Gráficos de burbujas, impactos por recurso en Calentamiento Global (cajones acero y PRFV).

En la tabla resumen (Tabla 15) se puede apreciar que los impactos del cajón con armaduras de acero son superiores a los del cajón armado con barras de fibra de vidrio; se ve de manera cuantitativa y porcentual (Figura 148) la mejora que supone el armado con barras de fibra. Adicionalmente, se compara cambiando la clase de cemento a un CEM III SR, que, tiene mejores características que el CEM I SR en varios aspectos, excepto en el POCP (Photochemical Ozone Creation Potential), en el que los valores son extremadamente elevados (Tabla 16 y Figura 148).

Tabla 16: Valores de resultados en el Ciclo de vida para soluciones cajón.

Impact Category	Acronym	Steel CEM I SR	GFRP CEM I SR	GFRP CEM III SR
Global warming (kg CO ₂ eq)	GWP	8,03E+05	7,60E+05	2,05E+05
Ozone layer depletion (kg CFC ₁₁ eq)	OPD	1,82E-02	1,43E-02	1,72E-02
Acidification (kg SO ₂ eq)	AP	1,78E+03	1,58E+03	3,85E+02
Eutrophication (kg PO ₄ eq)	EP	3,59E+02	3,10E+02	3,10E+02
Formation of ozone (kg ethene)	POCP	1,13E+02	1,02E+02	3,02E+02
Use of primary energy (MJ)	ADPE	5,58E+06	4,81E+06	2,78E+06

Figura 148: Gráfico radar comparación diferentes soluciones en cajón.

En resumen, en este caso también mejoran los indicadores con el refuerzo de la estructura con barras de fibra de vidrio, por lo que, en términos únicamente medioambientales, es una solución a implementar sin duda. Estos valores no tienen en cuenta otras posibles optimizaciones (alguna de ellas favorecida por la utilización del refuerzo en fibra) como serían las siguientes:

- Utilización de agua de mar en el amasado.
- Utilización de agua de mar de curado (15 kg agua/m³ [86])
- Utilización de un cemento de mejores características ambientales [142].
- Utilización de árido reciclado en la dosificación del hormigón [125, 126].

4.4 Mejoras complementarias

Tal y como se ha comentado anteriormente, se puede actuar sobre otros componentes de la estructura para mejorar aún más los indicadores. En este apartado se estudiarán uno a uno, así como su repercusión.

4.4.1 Elección del cemento

El refuerzo mediante PRFV nos podría permitir la utilización de cementos de menor impacto y, que no deberían ser necesariamente marinos, si el hecho que las estructuras no tengan armaduras de acero es suficiente justificación para su eliminación. En este aspecto hay numerosa bibliografía que

considera adecuado incluso el uso de agua de mar como agua de amasado cuando el refuerzo es de PRFV [125, 126] .

En concreto, se ha realizado el análisis de la influencia del cemento utilizado, teniendo en cuenta por un lado las recomendaciones de la EHE [85] y por otro lado, el gráfico comparativo de las diferentes clases de cemento, según las EPD disponibles en España [143] (en otros países hay más variedad de EPDs, pero para ser coherentes con la ubicación de las obras, hemos preferido utilizar un máximo de datos locales disponibles). No olvidemos que el cemento representa un 7% del total de las emisiones del sector energía e industria , por lo que es muy importante actuar sobre este material, y todo lo que se pueda disminuir será de gran impacto[134].

Se expone a continuación el comparativo, en lo referente a impactos ambientales, y a partir de las EPDs disponibles en la página web de IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones) , de los diferentes tipos de cemento [143], siendo los cementos III y V los que ofrecen mejores valores tanto a nivel de impactos como de uso de recursos (Figuras 149 y 150).

Figura 149: Gráfico comparativo impacto de las diferentes clases de cemento (datos IECA) [143].

Figura 150: Gráfico comparativo Uso de recursos según clase de Cemento (datos IECA [143]).

Se deberán tener en cuenta además las limitaciones de utilización del cemento según la EHE 2008 [85]. En base a las figuras 149 y 150, se estudiarán los cementos que menores valores tienen de los indicadores, a saber, los de tipo III y V, además de la solución base con cemento I SR.

4.4.2 Dosificación del hormigón

El hormigón inicialmente considerado en este estudio teórico es el denominado en España como Hormigón para armar HA-35/F/20/IIIc+Qb, lo que significa que tiene un contenido mínimo de cemento de 350 kg/m³ y una máxima relación agua/cemento de 0,5. Se han comparado las Fórmulas de trabajo de las dosificaciones de 1 m³ de hormigón variando tan sólo el tipo de cemento. Se ha tomado como dosificación base la de una mezcla de hormigón utilizada en la construcción de cajones portuarios en el puerto de Barcelona, con un contenido de cemento CEM I SR de 350 kg/m³ y una relación Agua/Cemento = 0,44. (A = hormigón armado 35 N/mm², F = consistencia fluida, 20 mm = tamaño de áridos, IIIc = ambiente marino en splash zone, Qb = ataque químico medio).

Figura 151: Comparación de impactos entre hormigones fabricados con diferentes clases de cemento.

Produce menor impacto, sin considerar el coste, el CEM III, siendo el óptimo el CEM III SR, salvo en el caso de la formación de ozono, para el que tiene un valor elevadísimo (Figura 151). De manera más completa se analiza en la investigación de Michael W. Tait [142]. Se evaluará por tanto dentro de la optimización final, la influencia que tendría sustituir el cemento CEM I SR por un cemento CEM III SR, aunque de ser posible su utilización, recomendaríamos el CEM III, con valores más equilibrados, sobre todo en lo referente al POCP, y que según la normativa española podría ser utilizado (CEM IIIa y CEM IIIb).

4.4.3 Utilización de árido reciclado

Para mejorar el árido se podrían optimizar consumos y el mix energético de la cantera, pero también utilizar materiales procedentes de reciclado de hormigón en la dosificación del nuevo hormigón. En la bibliografía se pueden encontrar casos sobre hormigones realizados con agua de mar y con materiales procedentes de reciclado con resultados satisfactorios [125, 126].

4.4.4 Otras mejoras: agua de mar

La introducción de un refuerzo que no es atacado por los cloruros tiene una serie de consecuencias entre las que se podría contar con la posibilidad de la utilización de agua de mar tanto en amasado como en curado (que representaría una reducción de la huella hídrica al consumir hasta 315 m³ menos de agua dulce en la fabricación de cada cajón). Si bien hay numerosas investigaciones que promueven el uso de agua de mar en el curado del hormigón armado con acero[86-90], numerosas normativas internacionales lo prohíben. No obstante, el principal problema, que es la corrosión del

acero, no afectaría al refuerzo con barras de fibra, por lo que se podría asumir que el efecto nocivo del agua de mar sobre el refuerzo ya no existiría en este caso.

4.5 Información complementaria

En el artículo nº3 se han incluido la mayoría de los resultados analizados en cuanto al Ciclo de Vida del armado en acero y fibra tanto del espaldón como del cajón.

Se completan aquí elementos adicionales utilizados y que por restricciones de espacio no se han incluido, pero que se antojan de interés para ofrecer una perspectiva más amplia de todos los parámetros analizados.

Se incluye además el detalle del armado de las principales soluciones (Tablas 17 y 18) como son la original armada con acero y la variante con barras de PRFV calculada por ATP. El cálculo de ATP se incluye en el Apéndice 4.

Tabla 17: Desglose de mediciones cajón tipo I armado con acero [140].

		Armado horizontal	Número de elementos	Diámetro	Separación	Ancho	Nº barras	Longitud total barras	Area/barra	Peso/ml	Peso (kg)	Sección total (cm2)
Solera	Cara inferior	Armado Longitudinal	1	16	0,2	10,43	53	40,15	2,01	1,58	3.362,16	106,53
		Armado Transversal	1	16	0,2	36,85	185	11,53	2,01	1,58	3.370,22	371,85
	Cara Superior	Armado Longitudinal	1	16	0,2	12,33	62	40,15	2,01	1,58	3.933,09	124,62
		Armado Transversal	1	16	0,2	36,85	185	14,23	2,01	1,58	4.159,43	371,85
Zapatas	Zapata Lado mar	Armado Longitudinal inferior	1	25	0,2	0,95	4	42,2	4,91	3,85	649,88	19,64
		Armado Transversal inferior	1	25	0,2	38,9	194	2,05	4,91	3,85	1.531,15	952,54
	Zapata lado puerto	Armado Longitudinal inferior	1	25	0,2	0,95	4	42,2	4,91	3,85	649,88	19,64
		Armado Transversal inferior	1	25	0,2	12,33	61	2,05	4,91	3,85	481,44	299,51
	Armadura a cortante		194	8	0,2	10,43	52	0,89	0,5	0,395	3.546,44	26,00
Fuste	Celdas circulares	Armadura horizontal	10	12	0,2	14,2	72	12,01	1,13	0,888	7.678,71	81,36
		Armadura vertical arranque	10	12	0,3		36	4	1,13	0,888	1.278,72	40,68
		Armadura vertical	10	10	0,3		36	14,44	0,79	0,617	3.207,41	28,44
	Celdas ovoidales	Armadura horizontal	2	12	0,2	14,2	72	8,6	1,13	0,888	1.099,70	81,36
		Armadura vertical arranque	2	12	0,3	7,9	27	4	1,13	0,888	191,81	30,51
		Armadura vertical	2	10	0,3	7,9	27	14,44	0,79	0,617	481,11	21,33
	Celdas achaflanadas	Armadura horizontal	20	12	0,2	14,2	72	12,05	1,13	0,888	15.408,58	81,36
		Armadura vertical arranque	20	12	0,3	11,35	37	4	1,13	0,888	2.628,48	41,81
		Armadura vertical pared curva	20	10	0,3	10,11	33	14,44	0,79	0,617	5.880,26	26,07
		Armadura vertical pared achaflanada	20	12	0,3	1,25	4	14,4	1,13	0,888	1.022,98	4,52
	Pared Mar	Armadura horizontal Ext Mar	1	12	0,3	14,2	48	41	1,13	0,888	1.747,58	54,24
		Armadura vertical Ext mar arranque	1	12	0,3	38,9	129	4	1,13	0,888	458,21	145,77
		Armadura vertical Ext mar	1	12	0,3	38,9	129	14,4	1,13	0,888	1.649,55	145,77
		Armadura horizontal Int Mar	10	12	0,3	14,2	48	2,25	1,13	0,888	959,04	54,24
	Pared puerto	Armadura horizontal Ext	1	12	0,3	14,2	48	41	1,13	0,888	1.747,58	54,24
		Armadura vertical Ext arranque	1	12	0,3	38,9	129	4	1,13	0,888	458,21	145,77
		Armadura vertical Ext	1	12	0,3	38,9	129	14,4	1,13	0,888	1.649,55	145,77
		Armadura horizontal Int	10	12	0,3	14,2	48	2,25	1,13	0,888	959,04	54,24
	Pared junta	Armadura horizontal Ext	2	12	0,25	14,9	57	8,9	1,13	0,888	900,96	64,41
		Armadura horizontal Ext orejetas	4	12	0,25	11,18	60	3,3	1,13	0,888	703,30	67,80
		Armadura vertical Ext arranque	2	12	0,3	11,18	37	4	1,13	0,888	262,85	41,81
		Armadura vertical Ext	2	12	0,3	14,2	37	14,3	1,13	0,888	939,68	41,81
		Armadura horizontal Int	2	0	0,2	11,18	72	10,33	0	0	0,00	0,00
		Armadura vertical Int	0	0	0,3	14,2	37	14,3	0	0	0,00	0,00
	Armadura atado	Tipo 1 triang ext. Lado mar	22	6	0,2	14,2	71	1,78	0,28	0,222	617,24	19,88
		Tipo 2 triang ext. Lado junta	4	6	0,2	14,2	71	2,37	0,28	0,222	149,42	19,88
		Tipo 3 triang int	44	6	0,2		71	1,94	0,28	0,222	1.345,44	19,88
Armadura montaje	Horizontal izado celdas		3	20			1	38,9	3,14	2,47	288,25	3,14
		Separadores en solera	1	16			192	2	2,01	1,58	606,72	385,92
											76.004,07	

Tabla 18: Desglose de mediciones cajón tipo I armado con PRFV (dimensionamiento ATP) [141].

		Armado horizontal	Número de elementos	Diámetro	Separación	Ancho	Nº barras	Longitud total barras	Area/barra	Peso/ml	Peso (kg)	Sección total (cm2)
Solera	Cara inferior	Armado Longitudinal	1	18	0,15	10,43	70	40,15	250	0,51	1.433,36	17.500,00
		Armado Transversal	1	18	0,15	36,85	246	11,53	250	0,51	1.446,55	61.500,00
	Cara Superior	Armado Longitudinal	1	18	0,15	12,33	83	40,15	250	0,51	1.699,55	20.750,00
		Armado Transversal	1	18	0,15	36,85	246	14,23	250	0,51	1.785,30	61.500,00
Zapatas	Zapata Lado mar	Armado Longitudinal inferior	1	26	0,15	0,95	6	42,2	530	1,06	268,39	3.180,00
		Armado Transversal inferior	1	26	0,15	38,9	259	2,05	530	1,06	562,81	137.270,00
	Zapata lado puerto	Armado Longitudinal inferior	1	26	0,15	0,95	6	42,2	530	1,06	268,39	3.180,00
		Armado Transversal inferior	1	26	0,15	12,33	82	2,05	530	1,06	178,19	43.460,00
	Armadura a cortante		194	10	0,15	10,43	69	0,89	78	0,16	1.906,17	5.382,00
Fuste	Celdas circulares	Armadura horizontal	10	14	0,15	14,2	95	12,01	153	0,31	3.536,95	14.535,00
		Armadura vertical arranque	10	14	0,15		36	4	153	0,31	446,40	5.508,00
		Armadura vertical	10	14	0,15		36	14,44	153	0,31	1.611,50	5.508,00
	Celdas ovoidales	Armadura horizontal	2	14	0,15	14,2	95	8,6	153	0,31	506,54	14.535,00
		Armadura vertical arranque	2	14	0,15	7,9	53	4	153	0,31	131,44	8.109,00
		Armadura vertical	2	14	0,15	7,9	53	14,44	153	0,31	474,50	8.109,00
	Celdas achaflanadas	Armadura horizontal	20	14	0,15	14,2	95	12,05	153	0,31	7.097,45	14.535,00
		Armadura vertical arranque	20	14	0,15	11,35	75	4	153	0,31	1.860,00	11.475,00
		Armadura vertical pared curva	20	14	0,15	10,11	67	14,44	153	0,31	5.998,38	10.251,00
	Celdas achaflanadas	Armadura vertical pared achaflanada	20	14	0,15	1,25	8	14,4	153	0,31	714,24	1.224,00
		Armadura horizontal Ext Mar	1	16	0,15	14,2	95	41	200	0,4	1.558,00	19.000,00
		Armadura vertical Ext mar arranque	1	16	0,15	38,9	259	4	200	0,4	414,40	51.800,00
	Pared Mar	Armadura vertical Ext mar	1	16	0,15	38,9	259	14,4	200	0,4	1.491,84	51.800,00
		Armadura horizontal Int Mar	10	16	0,15	14,2	95	2,25	200	0,4	855,00	19.000,00
		Armadura horizontal Ext	1	16	0,15	14,2	95	41	200	0,4	1.558,00	19.000,00
	Pared puerto	Armadura vertical Ext arranque	1	16	0,15	38,9	259	4	200	0,4	414,40	51.800,00
		Armadura vertical Ext	1	16	0,15	38,9	259	14,4	200	0,4	1.491,84	51.800,00
		Armadura horizontal Int	10	16	0,15	14,2	95	2,25	200	0,4	855,00	19.000,00
	Pared junta	Armadura horizontal Ext	2	16	0,15	14,9	95	8,9	200	0,4	676,40	19.000,00
		Armadura horizontal Ext orejetas	4	16	0,15	11,18	100	3,3	200	0,4	528,00	20.000,00
		Armadura vertical Ext arranque	2	16	0,15	11,18	74	4	200	0,4	236,80	14.800,00
	Pared junta	Armadura vertical Ext	2	16	0,15	14,2	74	14,3	200	0,4	846,56	14.800,00
		Armadura horizontal Int	2					10,33			0,00	0,00
		Armadura vertical Int	0					14,3			0,00	0,00
	Armadura atado	Tipo 1 triang ext. Lado mar	22	8	0,15	14,2	95	1,78		0,1	372,02	0,00
		Tipo 2 triang ext. Lado junta	4	8	0,15	14,2	95	2,37		0,1	90,06	0,00
		Tipo 3 triang int	44	8	0,15		95	1,94		0,1	810,92	0,00
	Armadura montaje	Horizontal izado celdas	3	20			1	38,9	310	0,63	73,52	310,00
		Separadores en solera	1	16			192	2	200	0,4	153,60	38.400,00
												44.352,45

En cuanto a las propiedades mecánicas de las barras de fibra de vidrio, en la Tabla 19 se pueden ver las de las que han sido utilizadas en el cajón. En el Apéndice 5 se incluyen las fichas técnicas de dichas barras.

Tabla 19: Propiedades mecánicas de las barras RWB producidas por ATP[141].

Bar Diameter	f_{fk} (MPa)	E_f (MPa)	ϵ_{fk} (-)	A_f (mm ²)
26 mm	620	40000	0.0155	530
18 mm	690	40000	0.0173	250
16 mm	725	40000	0.0181	200
14 mm	755	40000	0.0189	153
10 mm	830	40000	0.0208	78

f_{fk} : characteristic tensile strength of GFRP reinforcement (MPa);

E_f : the Young's modulus of the elasticity of GFRP reinforcement (MPa);

ϵ_{fk} : characteristic rupture strain of GFRP reinforcement;

A_f : equivalent of GFRP bar (mm²).

Según la clase de cemento utilizado, se puede apreciar la mejora progresiva si se introduce la Escoria en la composición del cemento. Se ha realizado la simulación de los diferentes indicadores en una mezcla de hormigón en la que sólo varía el contenido de Escoria de la misma (desde un 0 hasta un 70% de la misma) y en el que se puede ver que a medida que se sustituye el Clinker por escoria el impacto ambiental disminuye. Para este cálculo se ha utilizado el SCA Concrete Calculator de Athena Sustainable Materials Institute ¹ y cuyos resultados se ven en la figura 152.

Esta tendencia corrobora los resultados en los que cementos con menores cantidades de Clinker como son el CEM III y el CEM V, tienen menores impactos.

Figura 152: Evolución de los indicadores en función de la variación del contenido en escoria del cemento.

Se incluyen también con mayor detalle las simulaciones realizadas en Life 365 (Figuras 153-156) y que han permitido hacer un cálculo de referencia para la vida útil que se ha considerado. En el Apéndice 3 además se incluye la salida de resultados que proporciona dicho programa, aunque se adelantan a continuación algunos de los gráficos de resultados.

El programa **Life 365**, permite, a través de la introducción de los datos principales de los componentes de una estructura de hormigón armado, y de los condicionantes externos existentes en su entorno

¹ Descarga en: <https://www.slagcement.org/sustainability/lccalculator/download.aspx>

(clima, cercanía al mar, composición del agua ...) hacer el cálculo de la vida útil de la estructura, teniendo en cuenta el tiempo transcurrido hasta el comienzo del ataque de los cloruros a la armadura de acero, así como el tiempo necesario hasta la corrosión de dicha armadura.

En concreto, para poder determinar con precisión el período de comienzo de la corrosión de las armaduras (*Initiation period*) se deberán tener en cuenta los parámetros siguientes [144]:

- Ubicación geográfica
- Tipo de estructura y naturaleza de la exposición
- Espesor de recubrimiento de hormigón hasta armadura de acero
- Detalles de los elementos de protección en el hormigón: relación agua/cemento, tipo y cantidad de aditivos al cemento e inhibidores de corrosión, tipo de acero y protección del acero, tipo y propiedades de membranas y material impermeabilizante.

La cantidad de humo de sílice, cenizas volantes y escorias en el cemento influirán también en los parámetros de la vida útil del hormigón.

En cuanto al período de propagación de la corrosión en las barras de acero, la única manera de conseguirlo es protegiendo las barras de acero mediante un recubrimiento de epoxy, o bien, reemplazando las armaduras de acero por armaduras en fibra de vidrio como se está examinando en esta investigación. El programa calcula el inicio de corrosión, por lo que no es de aplicación con barras de fibra de vidrio.

Con objeto de percibir de forma cualitativa la influencia de los parámetros precedentes en la estimación de vida útil realizada por el programa Life 365, se puede observar en la Figura 153 cómo va aumentando la vida útil desde el caso base (utilizando CEM I) hasta el caso del cemento tipo III con cantidades crecientes de escoria (50% en el CEM III a y 70% de escoria en el CEM III b). Los demás parámetros como son la relación agua cemento y la cantidad de armadura se han mantenido constantes.

Figura 153: Vida útil en función de varios casos (cementos distintos).

La presencia de escoria, reduciendo la permeabilidad de la mezcla no sólo permite aumentar la vida útil de la estructura (y por tanto reducir el futuro mantenimiento) sino que además reduce también el impacto ambiental del cemento y en consecuencia del hormigón.

Una vez obtenida esta vida útil, el software proporciona un calendario de reparaciones, que, unido a la introducción de parámetros de costes de los materiales y de previsiones financieras, proporciona una estimación del coste total durante la vida útil de la estructura. En esta investigación no se ha utilizado dicha parte del programa.

También ofrece toda una serie de gráficos correspondientes al avance de la concentración de cloruros en la estructura, como son la concentración de cloruros a medida que se profundiza en el hormigón (Figura 154), así como el tiempo que tardan los cloruros en alcanzar las barras de acero (profundidad de recubrimiento 50 mm) con una concentración tal que inicia la corrosión de las armaduras (Figura 155).

Figura 154: Concentración de cloruros vs profundidad de la estructura.

Figura 155: Concentración cloruros vs tiempo a profundidad = 50 mm (recubrimiento)

Las líneas verticales (Figura 155) representan la abscisa del Tiempo de inicio de la corrosión en cada uno de los casos, ya que es el momento en que la concentración de cloruros en la superficie del acero alcanza el valor nocivo para la armadura.

Con estos elementos son con los que se ha podido hacer un cálculo teórico de vida útil para los cajones y así estimar el mantenimiento teórico de referencia.

Figura 156: Difusividad de la mezcla en función del tiempo.

En cuanto al gráfico de la difusividad de la mezcla (Figura 156), se puede ver cómo influye la variación de las características en la difusividad de los cloruros; la mezcla sin escorias tiene una difusividad mucho mayor, y por tanto los cloruros penetran con mayor rapidez, disminuyendo así la vida útil.

Los casos de CEM III tienen difusividades diferentes (mayores en función de la mayor cantidad de escoria) pero con órdenes de magnitud similares.

Nótese que las oscilaciones corresponden al efecto de variación de las temperaturas anuales (se ha introducido la temperatura media en Valencia en el caso de los cajones).

5 DISCUSIÓN

Los valores obtenidos muestran que la utilización de armaduras de PRFV mejoran los resultados con respecto al hormigón armado. Se pueden apreciar beneficios cercanos al 20% en el espaldón y entre el 5 y 27 %, en función del indicador, en el cajón del puerto de Valencia. Esta mejora medioambiental se verá además aumentada a lo largo de la vida de la estructura ya que el mantenimiento será muy inferior o incluso nulo por la durabilidad de los materiales compuestos.

No obstante, no debe olvidarse que, en el caso del cajón, se dispone de mucho margen de mejora adicional debido a los siguientes elementos.

Cuando no se utiliza el acero desaparece el problema de corrosión, permitiendo el curado con agua de mar. Esto facilita el uso de diques flotantes en la construcción, limitado o con restricciones de uso en normativas y concursos internacionales con armadura convencional. El consiguiente ahorro en medios auxiliares y superficies de ocupación en los puertos redundaría casi con toda seguridad en un menor coste constructivo, además de en un menor impacto al no ser necesaria la utilización de agua dulce. Habría mejoras en otros indicadores además del de la Huella Hídrica, ya que no se necesitaría tratar ni transportar el agua dulce hasta la obra.

Se podría ir incluso más lejos al utilizar el agua de mar como agua de amasado, por lo que se reduciría además la Huella Hídrica de la infraestructura, junto con la mejora de los demás indicadores, ya que el agua se obtendría directamente en su lugar de utilización y no debería ser tratada previamente.

Existen numerosos ensayos al respecto, no habiendo impedimento en el uso de agua de amasado en hormigón en masa, e incluso con resultados positivos en hormigón armado con acero [87, 125] . Como se puede apreciar en los gráficos de burbujas, los áridos tienen mucho peso en los impactos de un cajón, por lo que deberían orientarse a medidas que disminuyan el efecto de su fabricación en cantera, o bien su cantidad, como es la utilización de árido procedente de hormigón reciclado. Existen ya algunos ensayos y cálculos de Ciclo de Vida teniendo en cuenta estas consideraciones, y con valores favorables al método [125, 132].

La ausencia de corrosión hace también que en el largo plazo mejore el comportamiento del cajón, evitando así tener que reemplazar armaduras por corrosión y realizar reparaciones en el hormigón, lo que influirá muy positivamente en su Ciclo de Vida completo. La utilización de cementos con Ciclos de Vida de menor impacto, dado el importante peso de dicho material en el valor global, puede producir mejoras muy significativas. En virtud de todo esto, se han realizado unas simulaciones adicionales para poder comprobar el alcance de modificar todos estos parámetros, para así saber hacia dónde dirigirse y optimizar esfuerzos.

Tabla 20: Comparativo entre impactos solución inicial y optimizada.

Sector		Global Warming	Acidification	Eutrophication	Ozone Depletion Potential	Formation of Ozone of Lower Atmosphere	Total Use of Primary Energy ex. Raw Materials
		kg CO ₂ eq	kg SO ₂ eq	kg PO ₄ eq	kg CFC ₁₁ eq	kg Ethene	MJ
A1-A3	Construction Materials	1,58E5 -78%	1,68E2 -89%	2,63E2 -8.2%	8,43E-3 +12%	2,97E2 +190%	1,45E6 -64%
A4	Transportation to site	4,44E4 -2.4%	1,97E2 -2.5%	4,27E1 -2.5%	8,72E-3 -2.4%	3,03E0 -2%	1,27E6 -2.4%
A5a	Site operations and site waste handling	8,39E0 0%	4,54E-2 0%	2,3E-2 0%	9,16E-7 0%	2,04E-3 0%	1,77E2 0%
A5b	Site waste transportation						
A5	Construction/installation process	8,39E0 0%	4,54E-2 0%	2,3E-2 0%	9,16E-7 0%	2,04E-3 0%	1,77E2 0%
Total		2,05E+05	3,84E+02	3,10E+02	1,72E-2	3,02E+02	2,77E+06
Comparing total results with 4-Caisson Steel CEM I SR							
4-Caisson Steel CEM I SR Total		8,03E+05	1,78E+03	3,59E+02	1,82E-2	1,13E+02	5,58E+06
4-CaiSSON GFRP CEM III SR compared with 4-Caisson Steel CEM I SR		-75%	-78%	-14%	-5.6%	170%	-50%

En la Tabla 20 y gráficos (Figura 157, Figuras 149-150 mejoras en el cemento, Figura 152 mejoras en el hormigón y Figura 158 gráfico radar) se puede apreciar que hay mejoras sustanciales en la mayoría de los indicadores, salvo un franco empeoramiento en la formación de ozono en la baja atmósfera, en kg de etileno, por lo que antes de decantarse por esta solución, habría que valorar si este indicador tan desfavorable es aceptable o no. Una alternativa más conservadora sería la utilización del CEM III (a o b para poder ser utilizado con agua de mar).

Figura 157: Impactos del cajón en función de los materiales utilizados (clase cemento y tipo Refuerzo).

Las mejoras que se han incluido en este ejemplo son las siguientes:

- Barras de PRFV
- Cemento III SR
- Amasado y curado con agua de mar.

Figura 158: Comparativo cajón en función del cemento elegido.

Para analizar la sensibilidad de los cambios, el % de cambio con respecto a la solución inicial (Armado con acero y CEM I SR) se puede apreciar en Figura 159.

Figura 159: Sensibilidad a los cambios a partir de caso base (acero y CEM I SR).

Por otro lado, y como discusión final, no se ha considerado, en todos estos ejemplos que haya una diferencia en mantenimiento entre las soluciones de acero y las soluciones con PRFV, lo que no es real. En efecto, por poca corrosión que se produzca, si se considera una vida útil de 100 años, alguna reparación será necesaria en la estructura de hormigón armado con acero, mientras que con materiales compuestos (fibras), no habrá que hacer reparaciones. Por ello se ha realizado un ejemplo con las hipótesis siguientes:

- 1 Reparación en un 10% del volumen de hormigón y del acero cada 25 años, vida útil 100 años

- 2 Reparación en un 10% del volumen de hormigón y del acero cada 25 años en muros exteriores, 50% en tabiques y sin reparaciones en zapata o losa.

Como orientación, hemos evaluado en el software Life 365 la vida útil y ciclo de reparaciones a realizar, tanto para el caso del cajón como del espaldón obteniendo en el cajón, una vida útil de 14,9 años con el hormigón convencional, y en el mejor de los casos (cemento con 70% de escorias) una vida útil de 21,3 años; en el caso del espaldón se tiene una vida útil de 22,8 años. Esta vida útil se calcula sumando el período transcurrido de propagación de los cloruros a través del hormigón hasta llegar al acero, al que se le suma el período hasta el inicio de la corrosión [144].

No deja de ser una estimación aproximada, pero se basa en la idea o necesidad de una conservación periódica y reparaciones antes de los 25 años de servicio. En el caso del espaldón, al no estar en la zona de mareas la concentración de cloruros, solamente en salpicaduras, es algo menor y por tanto se obtienen valores de vida útil ligeramente superiores. A modo informativo se expone el gráfico comparativo (Figura 160) entre las soluciones estudiadas hasta el momento, y dos nuevas soluciones en las que se incluyen materiales de reparación dentro de los trabajos de mantenimiento. Enseguida los impactos se disparan, a poco mantenimiento periódico que se haga. En la Figura 161 se presentan los mismos resultados en forma de gráfico radar.

Figura 160: Comparación de impactos en cajón entre casos Base sin mantenimiento y 2 hipótesis de mantenimiento.

Figure 161: Comparación de impactos soluciones sin mantenimiento y con hipótesis de mantenimiento.

Es, por ello, que la solución en PRFV confirma su respeto por el medio ambiente, el cumplimiento de la Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible acentuando las diferencias con las alternativas tradicionales. La inexistencia de los gastos de reparaciones y mantenimiento harán que económicamente sea una solución más competitiva. Para esto sería interesante disponer de la experiencia de las Autoridades portuarias en cuanto a la conservación de diques verticales de cajones de hormigón armado para poder completar la investigación con datos económicos reales.

6 CONCLUSIONES

Sobre la base de los dos ejemplos realizados del Ciclo de Vida en elementos de obras marítimas exteriores sometidos a la acción del oleaje se pueden establecer las siguientes conclusiones.

El armado con barras de poliéster reforzado con fibra de vidrio mejora el impacto ambiental e introduce nuevas vías de progreso, tanto para el método constructivo, como para la utilización de materiales diferentes a los habituales que aumenten las prestaciones de la estructura en toda su vida útil (disminuyendo el mantenimiento, por ejemplo). Esto hace, que, tras la gran evolución constructiva que fue la utilización de cajones en obras portuarias en gran profundidad en substitución de los diques de escollera tradicionales [134], se pueda dar un paso más, perfeccionando las estructuras al sustituir el acero por PRFV: la utilización de barras de refuerzo en fibra de vidrio permite mejorar el impacto ambiental de las estructuras de hormigón, con respecto a las estructuras armadas con barras de acero.

En esta investigación se han realizado los cálculos que demuestran que dicha **mejora** existe (**10 %** de media en el **Espaldón**, y **11 %** en el **cajón**). A raíz de estos, se profundiza en el desglose de los valores de los diferentes indicadores en función de los materiales que conforman la estructura, definiendo nuevos caminos para su optimización. Así se han comprobado variantes a los componentes tradicionales del hormigón (cemento, agua de amasado y curado, áridos) para obtener resultados mucho más favorables, que, si no es por el refuerzo alternativo en PRFV, en algún caso, serían inviables. Esto puede llevar a economías de hasta 315 m³ de agua dulce por cada cajón fabricado y **mejoras de hasta 75 % en las emisiones de CO₂** por citar algún ejemplo representativo.

Si bien estas mejoras no son más que parciales, ya que se puede actuar sobre otros materiales de la estructura para optimizar los resultados, se ve ya de una manera cuantitativa que la utilización de las barras de fibra de vidrio permite mejorar los impactos. Existen unos indicadores que permiten evaluar de manera cuantitativa y objetiva las mejoras.

También se ha podido comprobar que, cambiando el tipo de cemento, se alcanzan mejoras sustanciales a nivel ambiental, disminuyendo hasta en un 78% las emisiones de CO₂ y hasta un 59% el uso de energía primaria.

De esta manera, parece razonable pensar que si el cajón se fabrica en su totalidad en materiales compuestos (aunque precise de materiales granulares u hormigón para aumentar su peso y lograr así la estabilidad de la estructura), hay posibilidad de obtener una estructura de menor impacto ambiental que la estructura equivalente en hormigón. Para ello, habrá que calcular la estructura diseñada en materiales compuestos, y comparar su Ciclo de vida con el del cajón de hormigón.

Si el valor obtenido lleva a valores mayores del impacto que en el caso del cajón de hormigón, se podría establecer el umbral para el que los cajones de materiales compuestos sean competitivos desde el punto de vista ambiental, si es que lo llegan a ser. Queda camino por recorrer en esto, pero con la ventaja que se puede acometer esta tarea inicialmente a nivel teórico y llegar a conclusiones que se ajustarán bastante a la realidad.

A través de la Evaluación del Ciclo de Vida se ha podido también llegar a algunas conclusiones “colaterales”, como son la importancia de los demás materiales que componen el cajón y la posibilidad de optimizar impactos. La evaluación de los impactos de una infraestructura se revela como una herramienta muy potente para avanzar hacia la sostenibilidad de los proyectos, y permite de una manera sencilla (si se dispone de un software adecuado) comparar diferentes soluciones y alternativas de materiales desde la etapa de proyecto.

Las principales conclusiones a las que se llegan son las siguientes:

- La puesta en valor de la vida completa de una infraestructura hará pensar de manera un tanto diferente y todo esto por dos razones: la inversión inicial ya no es lo único importante, hay que tener en cuenta el binomio inversión + mantenimiento. En segundo término, la vida completa y la necesidad de mayor o menor mantenimiento afectan no sólo al coste sino también al impacto ambiental de una infraestructura, por lo que soluciones que eran muy viables hasta la fecha y con evidentes ventajas en el corto plazo, no son tan interesantes cuando de la vida útil de la estructura se trata.
- Los materiales compuestos, que se presume en numerosas investigaciones son más sostenibles, muestran aquí sus bondades de manera cuantitativa, y van despejando el camino hacia soluciones más sostenibles aún. No se llega todavía a la Economía Circular, pero se va avanzando pasito a pasito.
- Las mejoras obtenidas por la utilización de materiales compuestos, si bien son parciales, abren la puerta no sólo a mejoras adicionales en cuanto a la utilización de materiales (cementos menos contaminantes, agua de mar para amasado y curado) , sino también a la consolidación de métodos constructivos que a priori son más sostenibles , como podría ser el caso de la utilización de cajoneros; utilizando este mismo procedimiento de Evaluación del Ciclo de Vida, habría que comparar las diferentes soluciones constructivas y deducir cuál es más respetuosa con el Medio Ambiente.
- Dentro de las consideraciones económicas habría que incluir en ahorro en emisiones de CO₂ y el consumo energético en MJ, valores ambos que pueden ser cuantificados. En la Tabla 17,

en el caso del cajón, la disminución de emisiones es de 598 tn de CO₂, lo que según el mercado de carbono podrían suponer un ahorro de unos 25 €/tn.

Los objetivos de Desarrollo Sostenible en particular, y el uso responsable de los recursos, hacen que hoy día las decisiones no han de ser tomadas sólo con criterios económicos cortoplacistas, sino que han de tener en cuenta a las generaciones futuras.

Se va progresando por tanto hacia la disminución en la utilización de los materiales tradicionales de construcción, y, a medida que se avancen los resultados permitirá pensar en que un cajón totalmente fabricado en fibra de vidrio puede ser viable y una solución sostenible dentro de los objetivos de la Agenda 2030. Los valores obtenidos hasta la fecha permiten ser optimistas al respecto, pero sin un dimensionamiento real con estos materiales, será difícil aventurarse en conclusiones.

La continuación de la investigación va en ese sentido, realizando simulaciones de una estructura que desempeñe la misma función, fabricada en hormigón reforzado con acero, comparándola con la misma con PRFV, para finalmente, estudiar su equivalente totalmente ejecutada en material compuesto y lastrada mediante un relleno de hormigón en masa (o mejor sólo de árido para evitarse los grandes impactos del cemento) para tener las mismas prestaciones funcionales que la estructura tradicional. Este ejemplo, permitirá hacer el recorrido completo hacia los cajones en materiales compuestos y verificar si el sistema es viable en términos de Ciclo de Vida. Habría que evaluar a continuación los costes económicos pudiendo tomar las decisiones con una visión global de los impactos tanto en economía como en durabilidad. Nuevos casos para estudiar en el futuro serán las torres de captación en centrales de ciclo combinado o desaladoras hechas en PRFV, frecuentes en obras en el norte de África o en Emiratos Árabes, que aumentarán el conocimiento sobre los elementos contruidos o reforzados con materiales compuestos.

Los tres artículos publicados y que conforman el cuerpo de esta Tesis Doctoral se encuentran incluidos en los Apéndices.

7 NUEVAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN

En esta investigación se ha podido comprobar que hay maneras más sostenibles de construir cajones para diques, y que se puede verificar cuantitativamente y comparar diferentes soluciones entre ellas, desde las etapas de diseño.

La solución hacia la que se quiere llegar es la de un cajón totalmente fabricado en materiales compuestos, y no sólo la utilización de este material para el refuerzo del hormigón. Para ello, se podría comenzar por analizar los pocos casos existentes de fabricación de cajones o elementos similares, con materiales compuestos. En particular hay dos ejemplos con los que se podría empezar a trabajar, aunque no son sino un primer escalón hacia el cálculo de los impactos de un cajón fabricado en materiales compuestos y dimensionado ad-hoc.

De momento, con los ejemplos disponibles se compararía una torre de captación ofertada por la empresa Global Composites para reemplazar a la torre equivalente de hormigón armado prevista en una desaladora en Argelia (Figura 162).

Figura 162: Ejemplo de torre de captación en materiales compuestos de la empresa Global Composites.

En cuanto al otro caso, se podría comparar el Duque de Alba de materiales compuestos fabricado por Acciona para el Puerto del Rosario (Figura 163) con el inicialmente diseñado. En este caso, el proyecto base estaba previsto para hacer con bloques prefabricados, por lo que habría que comenzar por calcular un cajón equivalente teniendo en cuenta todo el cálculo estructural del proyecto base.

Calculadas las dimensiones de este cajón, se harían unas hipótesis de armado y se podría comparar la solución de hormigón con la de materiales compuestos dimensionada por Acciona.

Figura 163: Duque de Alba materiales compuestos Acciona, Puerto del Rosario.

A día de hoy, no obstante, existe aún una limitación importante que espero pueda ser resuelta cuanto antes, y es la falta de datos en cuanto a EPD de los componentes de los composites.

Procediendo a todos los pasos anteriormente citados, se podría llegar a unas nuevas conclusiones en cuanto a la idoneidad de la solución en materiales compuestos con respecto a las estructuras tradicionales de hormigón armado.

Finalmente, se debería invertir recursos en el cálculo de diversas soluciones de cajones, aprovechando el gran número de casos de esta tipología existente en España, para poder así establecer correlaciones entre dimensiones de los cajones y la mayor o menor pertinencia de utilizar las soluciones en materiales compuestos en función de su tamaño.

A todos estos cálculos teóricos habría finalmente que incluir el cálculo del Coste a lo largo de todo el Ciclo de Vida (Life Cycle Cost) para comparar las soluciones globalmente y permitir así tomar decisiones en función de los parámetros económicos y ambientales.

8 REFERENCIAS

- [1] G. Simoncini, *Sopra i porti di Mare*, Universita Gabrielle D'Annunzio, Florencia, 1993.
- [2] A. Carpentier, *El Siglo de las luces*, 2002 ed., Editorial Espasa - Calpe, Madrid, 1962.
- [3] O. Testaguzza, *Portus*, Roma, Italy, 1970.
- [4] J. César, *Guerra Civil*, Biblioteca Básica Gredos, Madrid, 2000.
- [5] J.M.d.I.P. Olivas, *Inventario de Puertos Antiguos en Hispania*, 1 ed., Servicio Publicaciones CEDEX, Madrid, España, 2016.
- [6] M. Reddé, *Mare Nostrum. Les infrastructures , le dispositif et l'histoire de la marine militaire sous l'empire romain*, Bibliothèque des Ecoles françaises d'Athènes et de Rome, Rome, Italy, 1986.
- [7] Vitruvio, *De Architectura*, Gotardus de Ponte, Como, Italy, 1521.
- [8] C. Perrault, *Compendio de los diez libros de Arquitectura de Vitruvio*, Comisión de cultura del Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, Valencia, 1761.
- [9] F. Josefo, *Las guerras de los judíos*, in: L. Argentina (Ed.) Madrid, Spain, 2010.
- [10] J.P. Oleson, *The technology of Roman harbours, Ports , technology and trade in the Ancient Roman world*, *The International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration*, Washington, 1985, pp. 147-157.
- [11] C.J. Brandon, R.L. Hohlfelder, M.D. Jackson, J.P. Oleson, *Building for Eternity. The history and technology of Roman Concrete Engineering in the sea*, Oxbow books, Oxford, UK, 2014.
- [12] E. Felici, *La ricerca sui porti romani in cementizio : Metodi e Obiettivi*, in: I.d. Giglio (Ed.) Florencia, Italy, 1998.
- [13] Plinio, P.E.v. (Gayo Plinio Segundo, *Historia Natural*, Editorial Gredos, Madrid, 1995.
- [14] M. Beard, *SPQR: una historia de la antigua Roma*, Barcelona, 2016.
- [15] G. Milne, *Port of Roman London*, Batsford Academic and Educational, London, UK, 1985.
- [16] I.G. Tascón, *Artifex. Ingeniería romana en España*, in: M.A.d. Asturias (Ed.) 2017.
- [17] E. Cejuela, *Artifex caissons*, 2017.
- [18] P. Barthélémi, *L'immense port antique de Corinthe sort de l'oubli*, *Le Monde* (2018).
- [19] V. Tsiairis, *Arqueólogo y cajón Lechaion*, 2016.
- [20] O. Crumlin-Pedersen, *The Skuldelev Ships I . Topography, Archaeology, History, Conservation and Display*, The Viking Ship Museum in Roskilde, Roskilde, Denmark, 2002.
- [21] M.D.J.d.i. Taccola, *De ingeneis, liber tertius : Ac edifiitiis non usitatis*, in: I. Polifilo (Ed.) Edizione il polifilo, Milano, Italy, 1969, p. 155.
- [22] M.D.J.d.i. Taccola, *Cassone impermeabile per fondare in acqua*, 1430-1449.
- [23] J. Turriano, *Veintiún libros de los ingenios y de las máquinas*, FACSIMIL ed.1996.
- [24] L. da Vinci, *A plan of a weir and embankment on the Arno east of Florence*, 1504.

- [25] C.F. Wiebeking, Der Leuchtturm bey Havre, in: T.-p.W.v. 61 (Ed.) Auf Kosten des Verf., München, Germany, 1811.
- [26] J.L. Labour, T. Praud, Une dique pour le pire ... et le meilleur.
- [27] C. Masse, Métézeau Seawall, 1627.
- [28] C. Meijer, L' arte di restituire à Roma la tralasciata navigazione del suo Tevere, Nella Stamperia del Lazzari Varese, Roma, Italy, 1685.
- [29] C. Labelye, A description of Wetsminster Bridge, London, UK, 1751.
- [30] B.F.d. Belidor, Architecture hydraulique, ou L'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différens besoins de la vie, Gallica, Paris, France, 1790.
- [31] L.A.d. Cessart, Description de Travaux Hydrauliques, Baoudouin, Paris, France, 1806.
- [32] J. Muller, Tratado de fortificaciones o el Arte de construir los Edificios Militares y Civiles, Barcelona, Spain, 1769.
- [33] D.A. Diderot, Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Sociétés Typographiques, Berne, Lausanne, 1782.
- [34] J.S. Bort, Planos que en detall manifiestan varias porciones de los muelles proyectados para la nueva darsena de San Sebastian, San Sebastián, 1774.
- [35] L.A.d. Cessart, Description de Travaux Hydrauliques, Baudouin, Paris, France, 1808.
- [36] C.F. Wiebeking, Carte de la côte de Cherbourg et de sa Rade, in: T.-p.W.v. 58 (Ed.) Auf Kosten des Verf. : Joseph Zängl, 1811, München, Germany, 1811.
- [37] I. Sala, Plano del Fundamento del frente de la Bateria en que se demuestra la disposicion de los caxones. Perfil del Frente de la Bateria cortado sobre la Linea P.Q. Perfil del Muelle cortado sobre la linea R.S., in: MPD 53 (Ed.) 1731.
- [38] I. Sala, Plano y Perfiles de la Obra que se a hecho en los fundamentos del Muelle del Baluarte de Sn Phelipe a las Peñas de la Cruz en el año 1731, 1732.
- [39] M. Viguera González, J. Peña Abizanda, Evolución de las tecnologías de las infraestructuras marítimas en los puertos españoles. Una investigación previa, Puertos del Estado, Madrid, Spain, 2000.
- [40] A. de Arévalo, Detalles de los diques y escollera proyectados para la costa norte de Boca Chica, Cartagena de Indias, 1758.
- [41] PIANC, Xth International Navigation Congress Milan 1905. Report of Proceedings, Xth International Navigation Congress Milan 1905, Permanent International Association of Navigation Congresses, Milan, 1905, pp. 330-333.
- [42] J.N, Empleo de cajones de hierro en la construcción de diques, Revista de Obras Públicas (1124) (1897) 356-360.

- [43] A. Nikolsky, Application du béton armé aux travaux maritimes. Moyens d'assurer sa conservation, in: AIPCN (Ed.) AIPCN XIe Congrès - Saint Pétersbourg, Imprimerie des Travaux Publics, Saint Pétersbourg, 1908.
- [44] La construcción de gruesos bloques de hormigón, Revista de Obras Públicas (1656) (1907) 2.
- [45] AIPCN, XI e Congrès Saint Petersburg 1908, in: N. necesse (Ed.) XI Congrès de Navigation Saint Petersburg, Saint Petersburg, 1908, pp. 12-13.
- [46] H.S. Taft , O.D. Jones, Floating Concrete Caissons, Professional Memoirs, Corps of Engineers, United States Army , and Engineering Department at Large.Society of American Military Engineers 7(32) (1915) 145-175.
- [47] E.d. Churruca, Works for improving the Bilbao River and making an outer harbour; also the application of large caissons as a breakwater foundation, in: W.C.a. Sons (Ed.) International Engineering Congress, William Clowes and sons, Glasgow , Scotland, 1901, p. 12.
- [48] R. Esparza, Puerto de Bilbao, Una memoria visual, Autoridad portuaria de Bilbao, Barcelona, Spain, 2002.
- [49] A. Terry y Rivas, Libro de diques y varaderos de todos los puertos del Globo, Madrid, 1896.
- [50] L.E. Clark, Floating Docks, Session 1904-1905 Part III, Institution of Civil Engineers, London, UK, 1905, p. 292.
- [51] K.T.Y. Goda, Historical development of breakwater structures in the world Coastal Structures and Breakwaters (1992) 14.
- [52] A. Delisle, Dique flotante para la inmersión de los cajones-bloques de cemento armado del puerto de Kobe (Japón), Revista de Obras Públicas 1(1902) (1912) 4.
- [53] F. Esteban Lefler , V.D. Rey Romero, Reinforced concrete caissons for port structures in Spain, Maritime Engineering.Proceedings of the Institution of Civil Engineers (162) (2009) 9.
- [54] P.d. Barcelona, Plano General Dique Deponente Barcelona, Puerto de Barcelona, Barcelona, Spain, 1902.
- [55] P.d. Barcelona, Elevación longitudinal del costado del dique visto desde las pontonas, Puerto de Barcelona, Barcelona, Spain, 1902.
- [56] T. Syncrolift, Shipyard solutions.
- [57] C.V. nuova, MOSE i casoni e le paratoie, in: S.P. 116 (Ed.) Consorzio Venezia Nuova, Venezia, 2015.
- [58] LaoTzeHk, Abidjan Port Expansion, 2018. <https://imgur.com/a/KqZkj>. 2018).
- [59] P.d. Barcelona, Memoria sobre el estado y adelanto de las obras del puerto de Barcelona durante el año 1905, Puerto de Barcelona, Barcelona, Spain, 1906, p. 353.

- [60] P.d. Barcelona, Memoria sobre el estado y adelanto de las obras del puerto de Barcelona durante los años 1907 a 1910, Puerto de Barcelona, Barcelona, Spain, 1911, p. 605.
- [61] W.F.V. Dijk, Construction de murs que quai a caisson dans le bassin dit " Merwehaven" à Rotterdam, La technique des travaux III-13 (1929) 5-13.
- [62] G. Pawle, The Secret War 1939 - 45, New York, 1957.
- [63] W. Howie, Mulberry Harbour, New Civil Engineer (NCE Mulberry Harbour Supplement) (1994) 36.
- [64] E. Allen, Construction of Mulberry Harbours, Southampton, April 1944, Imperial War Museum, 1944.
- [65] S. Laing, Allied Preparations for D-Day, Imperial War Museum, 1944.
- [66] S. Harrison, The Mulberry artificial harbour off Arromanches in Normandy, September 1944., Imperial War Museum, 1944.
- [67] F. Calderón Gaztelu, C. Martínez Cebolla, Proyecto y Ejecución de nuevos muelles en el Puerto de Pasajes, Revista de Obras Públicas (2921) (1958) 26.
- [68] Acciona, Maritime Works One Page, Acciona Infraestructuras, Madrid, Spain, 2014.
- [69] L. Franco, Ancient Mediterranean harbours : a heritage to preserve, Ocean & Coastal Management, Elsevier Science, 1996, pp. 115-151.
- [70] L. Franco, Recent Italian experience in the design and construction of vertical breakwaters, in: H.E. Reports (Ed.) ICCE 1992 Local Organising Committee, ICCE 1992 local organising committee, Milan, Italy, 1992, p. 27.
- [71] S. Takahashi, Design of vertical breakwaters, in: J. Port and Airport Research Institute (Ed.) 28th International Conference on Coastal Engineering., Cardiff, Wales, UK 1996, p. 110.
- [72] Y. GODA, The Design of upright breakwaters in: T. Delft (Ed.) Hydraulic Engineering Reports, ICCE, Venezia, 1992.
- [73] K. Tanimoto, S. Takahashi, Design and construction of caisson breakwaters- the Japanese experience Coastal Engineering 22(1-2) (1994) 57-77.
- [74] M. Vázquez Análisis del Comportamiento hidrodinámico de un dique vertical formado por cajones con patio interior y geometría cilíndrica, Hidráulica , Energía y Medio Ambiente, Universidad Politécnica Madrid, Madrid, Spain, 2017, p. 307.
- [75] P. Aristaghes, V. Blanchet, N. Berthe, B. TP, Diques en Caissons Perforés : du front de Mer de Beyrouth au nouveau port de Tanger, VIII èmes Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Compiègne, France, 2004, p. 10.
- [76] E. Arana, KUGIRA : el mayor dique flotante - cajonero de Europa, Puertos (105) (2003) 38-44.

- [77] R.L. Acero, G.R. González, J.V. Gallego, Nuevos procedimientos en la construcción de cajones para obras marítimas, *Revista de Obras Públicas* (3479) (2007) 33-50.
- [78] K.-H. Yang, Y.-B. Jung, M.-S. Cho, S.-H. Tae, Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete, *Journal of Cleaner Production* 103 (2015) 774-783.
- [79] M.A. Sanjuán Barbudo, Los cementos de adición en España del año 2000 al 2005, *Cemento Hormigón* (909) (2007) 4-55.
- [80] J. Bijen, Benefits of slag and fly ash, *Construction and Building Materials* 10(5) (1996) 309-314.
- [81] Transnet, Request for proposal for the Durban container terminal berths 203 to 205. Reconstruction , deepening and lengthening, Transnet Capital Projects, Johannesburg, South Africa, 2017, p. 495.
- [82] P.d. Girolamo, A. Romano, F. Capozzi, L. Franco, M. Paganelli, M.D. Risio, D. Pasquali, P. Sanmarco, N. Vink, P.V. Westendorp, Constructional aspects of the civil works for the storm surge barrier at Chioggia Inlet – Venice Lagoon (Italy), *Coasts, Marine Structures and Breakwaters*, Institution of Civil Engineers, Liverpool, 2017, pp. 15-27.
- [83] R. Royce, Syncrolift shiplift and transfer systems, in: R.R.N.M. Inc. (Ed.) *Rolls Royce*, Annapolis, 2007.
- [84] V. Negro Valdecantos, Revisión Estado del Arte curado cajones de hormigón, *Apuntes de Ingeniería Marítima*, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2015, p. 13.
- [85] M.d. Fomento, EHE 08 . Instrucción de hormigón estructural, in: S.G. Técnica (Ed.) *Centro de publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento*, Madrid, 2010, p. 704.
- [86] N. Otsuki, H. Hamada, N. Takeda, K.-i. Imamoto, T. Yamaji, T. Habuchi, T. Nishida, Technical Committee on the use of sea water in concrete, *Technical Committee reports 2014*, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, 2014, p. 22.
- [87] P. Alaejos, M.A. Bermúdez, Influence of Seawater Curing in Standard and High-Strength Submerged Concrete, *Journal of materials in civil engineering* 23(6) (2011) 6.
- [88] J. Ongpeng, C.L. Roxas, N. Otsuki, T. Nishida, Influence of Curing Period and Curing Medium on Concrete Mixed with Seawater, *DLSU ATTARS 2013*, Manila, 2013.
- [89] F.M. Wegian, Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering* (2010) 235-243.
- [90] T. Nishida, N. Otsuki, H. Ohara, Z. Garba-Say, T. Nagata, Some Considerations for Applicability of Seawater as Mixing Water in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 27 (2013) 7.
- [91] V. Negro Valdecantos, M. Vázquez, J.S. López-Gutierrez, J.L. Monsó Evaluation of wave loads in a new type of perforated caisson, *Maritime engineering* 169(MA3) (2016) 124-139.

- [92] B. Construction, Présentation de l'usine de préfabrication de dix-huit caissons pour réaliser l'infrastructure maritime du projet d'extension en mer de Monaco, Marseille, France, 2017.
- [93] A. Tukker, A. de Koning, R. Wood, T. Hawkins, S. Lutter, J. Acosta, J.M. Rueda Cantuche, M. Bouwmeester, J. Oosterhaven, T. Drosdowski, J. Kuenen, EXIOPOL – DEVELOPMENT AND ILLUSTRATIVE ANALYSES OF A DETAILED GLOBAL MR EE SUT/IOT, Economic Systems Research 25(1) (2013) 50-70.
- [94] Bouygues, Monaco offshore urban extension - Construction Methods, Direction de la communication Bouygues, 2016.
- [95] V. Negro Valdecantos, O. Varela Carnero, J.H. García Palacios, J.S. López-Gutiérrez, Diseño de diques verticales, 2008 ed., Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Madrid, Spain, 2001.
- [96] First Caissons Floated Out for Durban Quay Wall Project Maritimejournal.com, 2003.
- [97] B. Michel, R.J. Marc, C. Guillaume, Perforated Breakwaters, Dieppe Harbour Jarlan Caisson: General Schedule And Acquired Experience, The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers, Honolulu, Hawaii, USA, 2003, p. 8.
- [98] O.d. verre, La digue de Dieppe, 2014.
- [99] O.d. Verre, La digue de Dieppe 2, 2014.
- [100] J.T.d. Valle, Construcción de buques de pesca en poliester reforzado con fibra de vidrio, Madrid, 2001.
- [101] R. Justa, Ejecución y varado de cajones para el puerto de Tánger, in: Acciona (Ed.) Diques y muelles marítimos, Madrid, Spain, 2008.
- [102] Bouygues, L'infrastructure maritime de l'extension en mer de Monaco, Méthodes Constructives & Genie Ecologique, Direction de la Communication Bouygues, 2018.
- [103] DR, Marseille: Les premiers caissons destinés à Monaco sont à flot, Mer et Marine, 2018.
- [104] H. Oumeraci, N.W.H. Allsop, M.B. De Groot, R.S. Crouch, J.K. Vrijling, Proverbs: Probabilistic design tools for vertical breakwaters, Civil Engineering and Geosciences Faculty 1999.
- [105] C.-H. Ji, S.-H. Oh, Y.M. Oh, S.-C. Jang, D.S. Lee, Experimental investigation of horizontal wave forces on the perforated caisson with single and double wave chambers, 2014 (34) (2014).
- [106] S. Yan, J. Chu, Q.J. Fan, Y. Yan, Building a breakwater with prefabricated caissons on soft clay, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering 162(GEI) (2009) 10.
- [107] J.A. Sciortino, Monobar System. Background and nominal sizes.

- [108] F. Arena, Un impianto REWEC3 per la produzione di energia elettrica da moto ondoso: dall'invenzione del prof. Paolo Boccotti alla costruzione del primo prototipo, in: ENEA (Ed.) Energia dal mare. Le nuove Tecnologie Per i Mari Italiani, Roma, Italy, 2014, p. 48.
- [109] D. Vicinanza, D. Stagonas, G. Müller, J.H. Nørgaard, T.L. Andersen, Innovative breakwaters design for Wave Energy Conversion, 2012 (33) (2012).
- [110] S. Naty, A. Viviano, E. Foti, Feasibility study of a WEC integrated in the port of GIARDINI NAXOS, Italy, 2017 (35) (2017).
- [111] S. Takahashi, H. Nakada, H. Ohneda, M. Shikamori, Wave Power Conversion by a Prototype Wave Power Extracting Caisson in Sakata Port, Coastal Engineering 1992.
- [112] J. Schoolderman, B. Reedijk, H. Vrijling, W. Molenaar, E. Oever, M. Zijlema, Generating electricity at a breakwater in a moderate wave climate Coastal Engineering (2010).
- [113] D. Vicinanza, L. Margheritini, J.P. Kofoed, M. Buccino, The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments, Energies 5 (2012) 193-226.
- [114] S.O. Erik ten Oever, Reinforced concrete gravity base Foundations, Blyth Project, in: BAM (Ed.) Concrete Gravity Base Foundation, 2017.
- [115] Wuxue Yangtze River Bridge Steel Cofferdam Launch, 2017.
- [116] F. Hue, El mayor dique rompeolas flotante del mundo, Puertos (98) (2002) 35-45.
- [117] J.D. Garcia-Espinel, R. Alvarez-Garcia-Luben, J.M. Gonzalez-Herrero, D. Castro-Fresno, Glass fiber-reinforced polymer caissons used for construction of mooring dolphins in Puerto del Rosario harbor (Fuerteventura, Canary Islands), Coastal Engineering, 2015, p. 10.
- [118] J. Peeters, Composites in infrastructure : beyond novelty, in: F. Europe (Ed.) Fibercore, Rotterdam, 2015.
- [119] C. Pultrusions, Composite waterfront solutions for marine infrastructure, Creative Pultrusions.
- [120] E. Commission, The European Green Deal, European Commission, Brussels, Belgium, 2019.
- [121] E. Union, EU Energy-Intensive Industries' 2050 Masterplan, European Union, 2020.
- [122] U. Nations, Sustainable Development Goals, 2015.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/>.
- [123] S. Thacker, D. Adshead, G. Morgan, S. Crosskey, A. Bajpai, P. Ceppi, J. Hall, N. O'Regan, Underpinning Sustainable Development, in: UNOPS (Ed.) Infrastructure Transitions Research Consortium (ITRC), 2018, p. 52.
- [124] E. Commission, Closing the Loop, European Commission, Brussels, Belgium, 2015.
- [125] A. Younis, U. Ebead, S. Judd, Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement, Construction and Building Materials 175 (2018) 152-160.

- [126] A. Nanni, SEACON: Sustainable concrete using seawater, salt-contaminated aggregates, and non-corrosive reinforcement. Final Report, in: P.d.M. University of Miami, Buzzi Unicem (Ed.) Infravation, Coral Gables, FL, USA, 2018, p. 44.
- [127] E. Standards, EN 15978:2011 Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method, NSAI, Dublin, Ireland, 2012, p. 64.
- [128] I.O.f. Standarization, ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, ISO, Geneva, Switzerland, p. 20.
- [129] I.O.f. Standarization, ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, ISO, Geneva, Switzerland, 2006.
- [130] I.O.f. Standarization, ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures, ISO, Geneva, Switzerland, 2006, p. 25.
- [131] M.-A. Wolf, R. Pant, K. Chomkhamsri, S. Sala, D. Pennington, The International Reference Life Cycle Data System (ILDC) Handbook, in: J.R. Centre (Ed.) European Commission, Luxembourg, 2012.
- [132] A. Nanni, SEACON. Sustainable concrete using seawater, salt-contaminated aggregates, and non-corrosive reinforcement. Report on LCA, in: P.d. Milano (Ed.) SEACON, Infravation, Milan, 2018, p. 65.
- [133] M. Mistry, C. Koffler, S. Wong, LCA and LCC of the world's longest pier: a case study on nickel-containing stainless steel rebar, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (2016).
- [134] E. Cejuela, V. Negro Valdecantos, J.M. Del Campo, M. Martín-Antón, M.D. Esteban, J.S. López-Gutiérrez, Recent History, Types, and Future of Modern Caisson Technology: The Way to More Sustainable Practices, *Sustainability* 10(11) (2018) 3839.
- [135] U. Leiden, CML-IA Characterisation factors, 2016. CML-IA is a database that contains characterisation factors for life cycle impact assessment (LCIA) and is easily read by the CMLCA software program. (Accessed 01/04/2020 2020).
- [136] E.E. Standards), EN 15804:2012+A2:2019 Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products, NSAI, London, UK, 2019, p. 76.
- [137] Bionova, Results for building life cycle assessment According to EN 15978 - TEMPLATE, Helsinki, Finland, 2018.
- [138] M. Economics, The circular Economy. A powerful force for climate mitigation, Stockholm, 2018, p. 176.
- [139] A. Ingeniería, Proyecto Constructivo del recrecido del espaldón del dique suroeste de Escombreras (Puerto de Cartagena), Autoridad Portuaria de Cartagena, Murcia, Spain, 2017.

- [140] I. Consulting, Proyecto de Muelle de cruceros en la Ampliación del Puerto de Valencia : Fase 1, Puerto de Valencia, 2011.
- [141] F. Esposito, Definitive report: structural concrete reinforced with FRP bar - Cajón type 1 ATP, 2019, p. 11.
- [142] M. Tait, W. Cheung, A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Three Concrete Mix Designs, The International Journal of Life Cycle Assessment 21 (2016).
- [143] IECA, Declaraciones Ambientales de Producto. <https://www.ieca.es/declaraciones-ambientales-de-producto/>. (Accessed 06/04/2020).
- [144] E.C. Bentz, M.D.A. Thomas, M.A. Ehlen, User Manual Life 365 v 2.2.3, 2018.