17

Sistemas Estructurales:
Plataformas petrolíferas

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 17

SISTEMAS ESTRUCTURALES: PLATAFORMAS PETROLÍFERAS

Lección 17.1: Plataformas petrolíferas: Introducción general 1

1 INTRODUCCIÓN 4
2 PLATAFORMAS PETROLÍFERAS 6
2.1 Introducción a los tipos básicos 6
2.2 Entorno 6
2.3 Construcción 7
2.4 Reglamentos 7
2.5 Certificación e inspección de garantía 7
3 EXPLOTACIÓN DE UN YACIMIENTO DE PETRÓLEO/GAS MEDIANTE PLATAFORMAS 8
3.1 Introducción 8
3.2 Plataforma cimentada sobre jacket para aguas poco profundas 8
3.3 Plataforma cimentada sobre estructura de hormigón 9
4 JACKETS Y CIMENTACIÓN SOBRE PILOTES 10
4.1 Introducción 10
4.2 Cimentación sobre pilotes 10
4.3 Resistencia de apoyo de los pilotes 11
4.4 Protección frente a la corrosión 11
5 MÓDULOS SUPERIORES 12
5.1 Introducción 12
5.2 Módulos superiores cimentados sobre jackets 12
5.2.1 Conceptos 12

5.2.2 Diseño estructural para los módulos integrados 12
5.2.3 Diseño estructural para los módulos superiores fundados sobre jacket 13
5.3 Diseño para los módulos superiores cimentados sobre estructura de hormigón 13
6 EQUIPOS Y MÓDULOS DE VIVIENDA 14
7 CONSTRUCCIÓN 15
7.1 Introducción 15
7.2 Construcción de jackets, módulos, instalaciones y equipos 15
7.2.1 Jackets instaladas con grúa 15
7.2.2 Jackets instaladas mediante lanzamiento 15
7.2.3 Módulos, instalaciones y equipos sobre estructura de hormigón (EBG) 15
7.2.4 Módulos de jackets 16
7.3 Levantamientos en alta mar 16
7.3.1 Buque grúa 17
7.3.2 Disposición de las eslingas, eslingas y grilletes 17
7.4 Transporte marítimo y sujeción durante el mismo 18
7.5 Izado a bordo 19
7.5.1 Introducción 19
7.5.2 Deslizamiento 19
7.5.3 Plataformas remolque 19
7.5.4 Cabrias en A o grúas tipo Manitowoc 20
7.6 Desmontaje de plataformas en desuso 20
8 ANÁLISIS ESTRUCTURAL 21
8.1 Introducción 21
8.2 Fase en la obra 21
8.3 Fase de construcción 21
9 ASPECTOS DE COSTES 22
9.1 Introducción 22
9.2 Inversión de Capital (CAPEX) 22
9.3 Gastos de explotación (OPEX) 22
10 EXPLOTACIONES EN AGUAS PROFUNDAS 23
11 RESUMEN FINAL 24

12 GLOSARIO DE TÉRMINOS 24
13 BIBLIOGRAFÍA 25
14 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 25

Lección 17.2: Cargas I: Introducción y cargas de entorno 27

1 INTRODUCCIÓN 30
2 CARGAS DEL ENTORNO 31
2.1 Cargas del viento 31
2.2 Cargas oscilantes 32
2.2.1 Teorías de ondas 32
2.2.2 Estadística de la ola 35
2.2.3 Fuerzas del oleaje sobre los elementos de construcción 36
2.3 Las cargas de las corrientes 39
2.4 Cargas de los seísmos 39
2.5 Cargas de hielo y nieve 41
2.6 Cargas debidas a las variaciones de la temperatura 41
2.7 Desarrollo de la vida marina 41
2.8 Mareas 42
2.9 Movimiento del lecho marino 42
3 RESUMEN FINAL 43
4 BIBLIOGRAFÍA 43

Lección 17.3: Cargas II: Otras cargas 45

1 CARGAS PERMANENTES (PROPIAS) 48
2 CARGAS OPERATIVAS (DINÁMICAS) 49
3 CARGAS PRODUCIDAS DURANTE LA FABRICACIÓN Y EL MONTAJE 51
3.1 Fuerzas verticales ascendentes 51
3.2 Fuerzas de izado 53
3.3 Fuerzas del transporte 53
3.4 Fuerzas de lanzamiento y de posicionamiento en vertical 55

4 CARGAS ACCIDENTALES 57
5 COMBINACIONES DE CARGAS 58
6 RESUMEN FINAL 60
7 BIBLIOGRAFÍA 60
8 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 60

Lección 17.4: Análisis I 61

1 INTRODUCCIÓN 64
2 MODELO ANALÍTICO 65
2.1 Cálculo de vigas (Stick model) 65
2.1.1 Uniones 65
2.1.2 Elementos 65
2.2 Modelos de chapa 65
3 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN 66
3.1 Verificación de los reglamentos 66
3.2 Método de la tensión admisible 66
3.3 Método del estado límite 66
3.3.1 Coeficientes de ponderación 67
3.3.2 Coeficientes del material 68
3.3.3 Clasificación de las condiciones de diseño 68
4 DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE LAS BARRAS 69
4.1 Magnitudes de los pilotes de la jacket 69
4.2 Magnitudes de las patas de la plataforma 69
4.3 Arriostramientos de la jacket 69
4.4 Arriostramiento del módulo 69
5 ANÁLISIS ESTÁTICO IN SITU 70
5.1 Modelo estructural 70
5.1.1 Modelo principal 70
5.1.2 Equipos accesorios 70
5.1.3 Modelo de la cimentación 70
5.2 Cargas 70
5.2.1 Cargas gravitatorias 70
5.2.2 Cargas del entorno 70
5.3 Combinaciones de cargas 71

6 ANÁLISIS DINÁMICO 72
6.1 Modelo dinámico 72
6.2 Ecuaciones de movimiento 72
6.2.1 Masa 72
6.2.2 Amortiguamiento 72
6.2.3 Rigidez 73
6.3 Frecuencias y perfiles del modo vibratorio libre 73
6.4 Método de superposición modal 73
6.4.1 Análisis del dominio de la frecuencia 74
6.4.2 Análisis espacio temporal 74
6.5 Métodos de integración directa 74
7 RESUMEN FINAL 76

Lección 17.5: Análisis II 77

1 ANÁLISIS DE FATIGA 80
1.1 Modelo de fatiga 80
1.1.1 Modelo estructural 80
1.1.2 Modelo de la carga hidrodinámica 80
1.1.3 Modelo de la tensión en los nudos 80
1.1.4 Modelo de los daños por fatiga 80
1.1.5 Expresión de forma cerrada 81
1.2 Análisis determinista 81
1.3 Análisis espectral 81
1.4 Fatiga debida al viento 82
1.4.1 Rachas de viento 82
1.4.2 Remolinos 82
2 CONDICIONES ANORMALES Y ACCIDENTALES 83
2.1 Análisis de seísmos 83
2.1.1 Modelo 83
2.1.2 Requisitos de ductilidad 83
2.1.3 Método de análisis 83
2.2 Impacto 83

2.2.1 Impacto de objeto caído/buque 84
2.2.2 Explosión e incendio 84
2.3 Colapso progresivo 84
3 EMBARQUE Y TRANSPORTE 85
3.1 Embarque 85
3.1.1 Deslizamiento 85
3.1.2 Izado a bordo mediante remolque 85
3.2 Transporte 85
3.2.1 Modelo de arquitectura naval 85
3.2.2 Modelo estructural 85
4 MONTAJE 86
4.1 Lanzamiento 86
4.1.1 Modelo de arquitectura naval 86
4.1.2 Modelo estructural 86
4.2 Posicionamiento en vertical 86
4.3 Amarre 86
4.4 Estabilidad sin el apoyo de los pilotes 86
4.5 Pilotaje 86
4.6 Levantamiento 87
4.6.1 Modelo 87
4.6.2 Coeficientes de diseño 87
4.6.2.1 Coeficiente de ponderación de cargas (CPC) 87
4.6.2.2 Coeficiente de amplificación dinámico (CAD) 87
4.6.2.3 Coeficiente del efecto de la inclinación 87
4.6.2.4 Coeficiente del efecto de la rotación de la barcaza (CER) 88
4.6.3 Coeficientes de consecuencias 88
5 ANÁLISIS Y DISEÑO LOCAL 89
5.1 Uniones pilote/camisa 89
5.2 Elementos situados en la zona de salpicaduras 89
5.3 Nudos reforzados 89
5.4 Equipos accesorios 89
5.4.1 Tubería de conducción de petróleo (raisers), caissons y tubos en J 89
5.4.2 Conductores o guías 89

5.5 Helipuerto 90
5.6 Elementos de las antorchas 90
6 RESUMEN FINAL 91
7 BIBLIOGRAFÍA 91

Lección 17.6: Cimentaciones 93

1 INTRODUCCIÓN 96
1.1 Clasificación de los suelos 96
1.2 Suelos granulares 96
1.3 Suelos cohesivos 96
1.4 Estratos formados por varias capas 96
2 DISEÑO 97
2.1 Cargas de diseño 97
2.1.1 Cargas gravitatorias 97
2.1.2 Cargas del entorno 97
2.1.3 Combinaciones de cargas 97
2.2 Resistencia axial estática del pilote 97
2.2.1 Fricción lateral a lo largo del cuerpo (fricción del cuerpo) 98
2.2.2 Esfuerzo en el apoyo 98
2.2.3 Penetración del pilote 98
2.3 Resistencia lateral del pilote 98
2.3.1 Curvas P-y 98
2.3.2 Análisis lateral del pilote 98
2.4 Hincamiento del pilote 98
2.4.1 Fórmulas empíricas 99
2.4.2 Ecuación de onda 99
3 DIFERENTES TIPOS DE PILOTE 100
3.1 Pilotes hincados 100
3.2 Pilotes insertados 100
3.3 Pilotes perforados y rellenados mediante inyección 101
3.4 Pilotes acampanados 101

4 FABRICACIÓN E INSTALACIÓN 102
4.1 Fabricación 102
4.2 Transporte 102
4.2.1 Transporte en barcaza 102
4.2.2 Modo de auto flotación 102
4.2.3 Transporte dentro de la jacket 102
4.3 Martinetes 102
4.3.1 Martinetes de vapor 102
4.3.2 Martinetes diesel 104
4.3.3 Martinetes hidráulicos 104
4.4 Instalación 104
4.4.1 Manejo y colocación de los pilotes 104
4.4.2 Uniones del pilote 104
4.4.3 Colocación del martinete 108
4.4.4 Hincamiento 109
4.5 Uniones pilote/jacket 109
4.5.1 Calzas soldadas 109
4.5.2 Sistema de bloqueo mecánico 109
4.5.3 Hormigonado 110
4.6 Control de calidad 110
4.7 Plan de emergencia 111
5 RESUMEN FINAL 114
6 BIBLIOGRAFÍA 114
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 114

Problema Resuelto 17.1: Cimentaciones 115

1 RESUMEN 119
2 HIPÓTESIS GENERALES 119
2.1 Perfil asumido de las curvas 121
2.2 Presión de sobrecarga 122
3 MODELO (véase también la figura 1) 122
3.1 Tamaño del pilote 122

3.2 Características del sustrato 122
3.2.1 Capa de arcilla blanda 122
3.2.2 Capa de arcilla dura 122
3.2.3 Capa de arena 122
3.3 Cargas sobre el pilote en el nivel del lodo 122
4 CAPA DE ARCILLA BLANDA 124
4.1 Curvas P-Y 124
4.1.1 Expresiones generales 124
4.1.2 Curva p-y típica 125
4.2 Curvas t-z 126
4.2.1 Expresiones generales 126
4.2.2 Curva t-z típica 127
4.3 Curvas de la interacción suelo/pilote 128
5 CAPA DE ARCILLA DURA 129
5.1 Curvas P-Y 129
5.1.1 Expresiones generales 129
5.1.2 Curva p-y típica 130
5.2 Curvas t-z 131
5.2.1 Expresiones generales 131
5.2.2 Curva t-z típica 131
5.3 Curvas de la interacción suelo/pilote 131
6 CAPA DE ARENA 132
6.1 Curvas P-Y 132
6.1.1 Expresiones generales 133
6.1.2 Curva p-y típica 133
6.2 Curvas t-z 134
6.2.1 Expresiones generales 134
6.2.2 Curva t-z típica 134
6.3 Curvas de la interacción suelo/pilote 135
6.4 Resistencia de la punta 135
7 DESPLAZAMIENTOS Y FUERZAS EN EL PILOTE 138
7.1 Modelo viga-pilar utilizando ecuaciones diferenciales 138
7.1.1 Comportamiento axial 138
7.1.2 Comportamiento lateral 138

7.2 Modelo viga-pilar utilizando el procedimiento de la diferencia finita 139
7.3 Resultados del cálculo de la diferencia finita 140
7.3.1 Comportamiento axial 140
7.3.2 Comportamiento lateral 141
7.3.3 Acción combinada (efecto de segundo orden) 141
8 BIBLIOGRAFÍA 143

Lección 17.7: Uniones tubulares en estructuras petrolíferas 145

1 INTRODUCCIÓN 148
2 DEFINICIONES 149
2.1 Definiciones geométricas 149
2.2 Índices geométricos 150
3 CLASIFICACIÓN 151
3.1 Uniones en T y en Y 151
3.2 Uniones en X 151
3.3 Uniones en N y en K 151
3.4 Uniones en KT 152
3.5 Limitaciones 152
3.6 Cómo clasificar una unión 152
4 SEPARACIÓN Y SOLAPE 153
4.1 Definiciones 153
4.2 Limitaciones 153
4.3 Uniones multiplanares 153
5 DISPOSICIÓN DE LAS UNIONES 154
6 RESISTENCIA ESTÁTICA 155
6.1 Cargas tenidas en consideración 155
6.2 Esfuerzo cortante de perforación 155
6.2.1 Esfuerzo cortante de perforación actuante 155
6.2.2 Esfuerzo cortante de perforación admisible 155
6.2.3 El método API 156
6.3 Uniones de solapamiento 157

6.4 Uniones reforzadas 158
6.4.1 Definición 158
6.4.2 Rigidización circular 158
7 CONCENTRACIÓN DE TENSIONES 159
7.1 Coeficiente de la concentración de tensiones 159
7.2 Ecuación de Kellog 159
7.3 Fórmulas paramétricas 159
7.3.1 Ecuaciones de Kuang para uniones en T/Y [4] 160
7.3.2 Ecuaciones de Kuang para uniones en K [4] 160
7.3.3 Ecuaciones de Kuang para uniones en KT [4] 160
8 ANÁLISIS DE FATIGA 161
8.1 Rango de tensión nominal 161
8.1.1 Histograma de la ola 161
8.1.2 Carreras de tensión nominales 161
8.2 Carreras de tensión del punto crítico 161
8.3 Curvas S-N 162
8.4 Índice de los daños de fatiga acumulativos 162
9 RESUMEN FINAL 163
10 BIBLIOGRAFÍA 163

Problema Resuelto 17.2: Uniones 165

1 RESUMEN 168
2 DESCRIPCCIÓN GEOMÉTRICA 169
3 TERMINOLOGÍA 170
4 CARGAS 171
5 CÁLCULO DEL CIZALLAMIENTO DE PUNZONAMIENTO 172
5.1 Tensión tangencial de perforación actuante 172
5.2 Tensión tangencial de punzonamiento admisible 173
5.2.1 Definición y cálculos numéricos de Q_t 173
5.2.2 Definición y cálculos numéricos de Q_q 174
5.2.3 Cálculos de v_{pa} 176
5.3 Combinación de todos los datos 177
6 DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA 179

7 CARRERA DE LA TENSIÓN NOMINAL 181
8 COEFICIENTE DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES (CCT) 182
9 SÍNTESIS DE CARGA 185

Lección 17.8: Fabricación 187

1 INTRODUCCIÓN 190
1.1 Fases de construcción 190
1.2 Filosofía de la construcción 190
2 INGENIERÍA DE LA EJECUCIÓN 193
3 FABRICACIÓN 196
3.1 Procesos de fabricación 196
3.2 Fabricación de los nudos 198
3.3 Subconjuntos de la jacket 199
3.4 Control dimensional 199
4 MONTAJE Y ELEVACIÓN DE LA JACKET 201
4.1 Montaje de la jacket 201
4.2 Elevación de la jacket 202
5 RESUMEN FINAL 206
6 BIBLIOGRAFÍA 206
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 206
APÉNDICE 1 207

Lección 17.9: Instalación 211

1 INTRODUCCIÓN 214
1.1 Fases del proyecto 214
1.2 Filosofía de la construcción 214
1.3 Programación de la instalación 216
2 IZADO A BORDO Y AMARRE MARÍTIMO 218
3 TRANSPORTE MARÍTIMO 221
4 INSTALACIÓN EN EL EMPLAZAMIENTO MARINO 223
4.1 Retirada de la jacket de la barcaza 223

4.1.1 Lanzamiento 223
4.1.2 Levantamiento 224
4.2 Posicionamiento en vertical y colocación sobre el lecho marino de la jacket 225
4.2.1 Posicionamiento en vertical mediante control del lastrado e inundación 225
4.2.2 Posicionamiento en vertical mediante la utilización de buque grúa 227
4.3 Estabilidad sobre el lecho marino 229
5 RESUMEN FINAL 231
6 BIBLIOGRAFÍA 231
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 231

Lección 17.10: Superestructuras I 233

1 INTRODUCCIÓN 236
2 ASPECTOS BÁSICOS DEL DISEÑO 238
2.1 Espacio y elevaciones 238
2.2 Requisitos de la distribución 238
2.3 Cargas 239
2.4 Control de interconexiones 240
2.5 Ingeniería de pesaje 240
3 SISTEMAS ESTRUCTURALES 242
3.1 Selección del módulo para las estructuras principales soportadas en jackets 242
3.2 Selección de los módulos sobre estructuras de hormigón (EBG) 242
3.3 Tipos de piso 243
3.4 Tipos de paneles de piso para pisos con aceros convencionales 244
3.5 Estabilización del piso 244
4 DISEÑO DE LA CUBIERTA 245
4.1 Introducción 245
4.2 Chapa del piso 245
4.3 Trancaniles 246

4.4 Baos de cubierta 246
4.5 Arriostramiento horizontal 248
5 RESUMEN FINAL 250
6 BIBLIOGRAFÍA 250
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 250

Lección 17.11: Superestruturas II 251

1 INTRODUCCIÓN 254
2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL 255
2.1 Introducción 255
2.2 Diseño del pórtico de la estructura principal 255
2.3 Diseño de las vigas de celosía de la estructura principales 256
2.4 Diseño de los cerramientos resistentes de las estructuras principales 257
2.5 Paredes sin carga 258
2.6 Soportes de las grúas 258
3 ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DEL MÓDULO 260
3.1 Introducción 260
3.2 Diseño de las vigas compuestas 260
3.3 Resistencia de las uniones 260
3.4 Puntos para el levantamiento 261
3.5 Diseño del piso 261
3.6 Soportes para los módulos 262
4 CONSTRUCCIÓN 263
4.1 Introducción 263
4.2 Fabricación 262
4.2.1 Operaciones 263
4.2.2 Aspectos del diseño 263
4.3 Pesaje 263
4.4 Embarque 263
4.4.1 Operaciones 263
4.4.2 Aspectos del diseño para el embarque 264

4.5 Transporte marítimo y sujeción durante el mismo 265
4.5.1 Operaciones 262
4.5.2 Aspectos del diseño del transporte marítimo y del amarre durante el mismo 266
4.6 Montaje 266
4.6.1 Operaciones 266
4.6.2 Aspectos del diseño del montaje mediante levantamiento .. 267
4.7 Conexión 268
4.8 Puesta en servicio 268
4.9 Inspección, mantenimiento y reparaciones (IMR) 268
4.10 Retirada 269
5 RESUMEN FINAL 270
6 BIBLIOGRAFÍA 270

Lección 17.12: Uniones en estructuras de cubierta de plataformas petrolíferas 271

1 INTRODUCCIÓN 274
2 UNIONES EN LOS MÓDULOS DE LAS CUBIERTAS DE LAS PLATAFORMAS PETROLÍFERAS 275
3 UNIONES ENTRE TRANCANILES Y VIGAS 276
4 UNIONES ENTRE LOS BAOS PRINCIPALES E INTERMEDIOS 278
5 UNIONES DEL BAO AL PILAR DE CUBIERTA 280
6 UNIONES ENTRE BAOS Y PILARES 283
7 UNIONES DE LAS VIGAS DE CELOSÍA 284
8 UNIONES ESPECIALES 287
9 RESUMEN FINAL 289
10 BIBLIOGRAFÍA 289
11 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 290

Problema Resuelto 17.3: Unión del Bao al pilar de suelo 291

1 RESUMEN 294
2 EJEMPLO DE PROYECTO: UNIÓN DEL BAO AL PILAR DE SUELO 295

2.1 Unión del Bao rigidizado al pilar de suelo 296
2.2 Unión del Bao no rigidizado al pilar de suelo 298
2.3 Comparación de las uniones de los Baos rigidizados y no rigidizados al pilar de suelo 300
DIAPOSITIVAS COMPLEMENTARIAS 301

ESDEP TOMO 17
SISTEMAS ESTRUCTURALES: PLATAFORMAS PETROLÍFERAS

Lección 17.1: Plataformas Petrolíferas: Introducción General

OBJETIVOS/CONTENIDO

Identificar el vocabulario básico, introducir los conceptos principales para las estructuras de las plataformas petrolíferas y explicar el origen de los requisitos básicos para el diseño.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Ninguno.

RESUMEN

La lección comienza con una presentación de la importancia de la explotación de hidrocarburos mediante plataformas petrolíferas, las etapas básicas en el proceso de explotación (desde la exploración sísmica hasta la retirada de plataformas) y la introducción de conceptos estructurales importantes (plataformas sobre estructura metálica jacket, sobre estructura vertical de hormigón E.V.H., plataformas semisumergibles, flotante). Se identifican los reglamentos principales.

En el caso de los conceptos de plataformas fijas (jacket y E.V.H.), se explican brevemente las diferentes fases de ejecución: diseño, trabajo de taller y montaje. Se presta una atención especial a algunos principios del diseño del suelo superior.

Se presenta una introducción básica a aspectos de costes.

Finalmente, se introducen términos mediante un glosario.

1. INTRODUCCIÓN

Las plataformas petrolíferas se construyen con el objeto de extraer petróleo y gas. La contribución que representó la producción de crudo de las plataformas petrolíferas durante el año 1988 al consumo mundial de energía supuso un 9% y se calcula que será del 24% en al año 2000.

La inversión (CAPEX) necesaria actualmente para la producción de un barril de petróleo al día ($/B/D), así como los costes de producción (OPEX) por barril se muestran en la tabla que se ofrece a continuación.

En 1988 la producción mundial de petróleo fue de 63 millones de barriles al día. Estas cifras indican claramente el desafío al que se enfrenta el proyectista: es necesaria una mayor contribución de la explotación de las plataformas petrolíferas, una actividad intensiva de la mayor importancia.

La figura 1 muestra la distribución de los campos petrolíferos y de gas del Mar del Norte, una de las principales contribuciones a la producción mundial de hidrocarburos obtenidos mediante plataformas petrolíferas. También indica los campos en tierra situados en el Reino Unido, los Países Bajos y Alemania.

CONDICIÓN	CAPEX $/B/D	OPEX $/B
Convencional		
Media	4000 - 8000	5
Oriente Medio	500 - 3000	1
No OPEP	3000 - 12000	8
Plataformas petrolíferas		
Mar del Norte	10000 - 25000	5 - 10
Aguas profundas	15000 - 35000	10 - 15

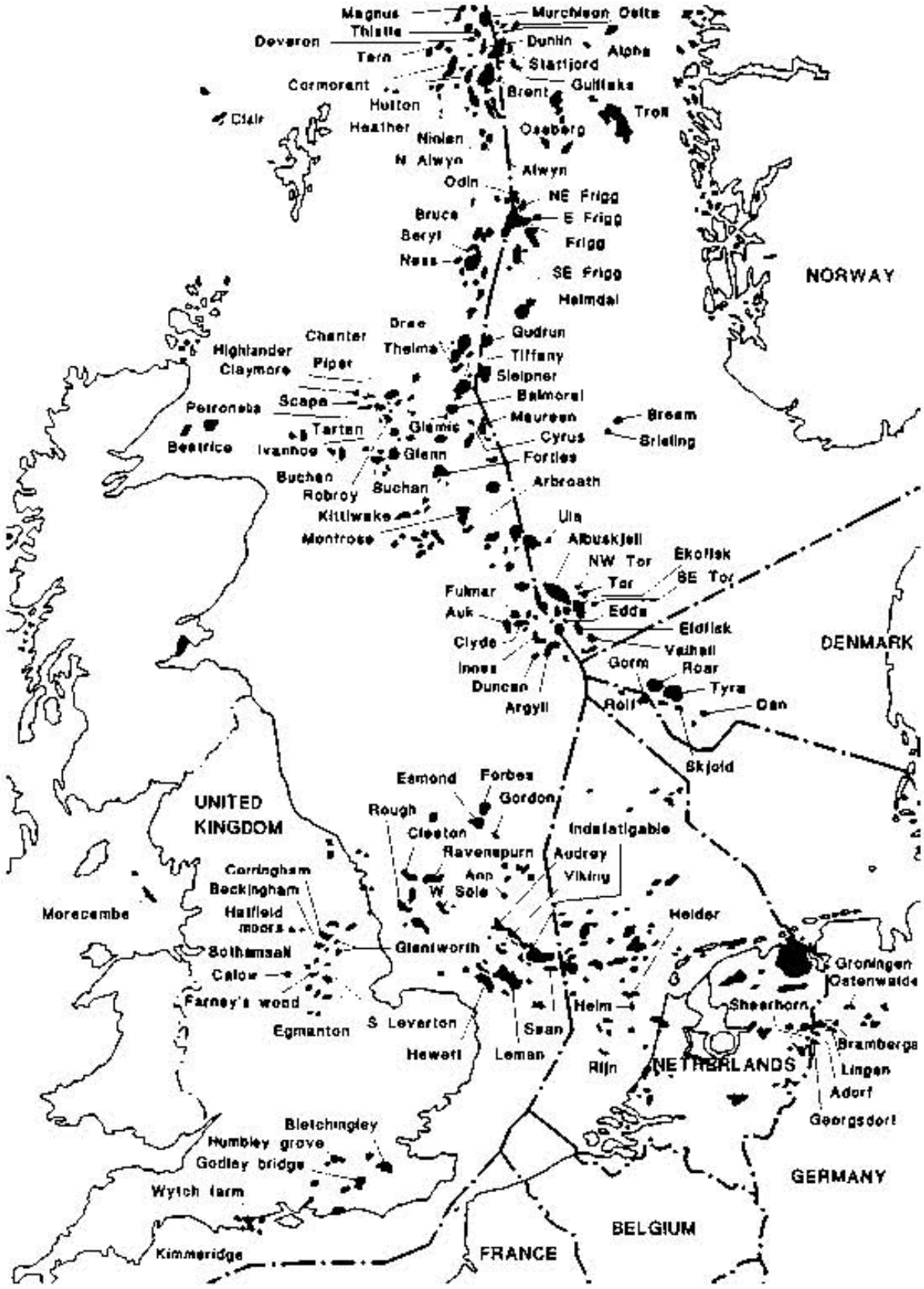


Figura 1 Campos petrolíferos y de gas del Mar del Norte (según el World Oil, Agosto de 1988)

2. PLATAFORMAS PETROLÍFERAS

2.1 Introducción a los Tipos Básicos

La gran mayoría de las plataformas consisten en una torre sobre pilotes que sustenta los módulos (jacket), todo ello fabricado en acero (véase las diapositivas 1 y 2).



Diapositiva 1



Diapositiva 2

Un segundo tipo principal lo constituyen las estructuras de hormigón (véase la figura 2), que se utilizan en el Mar del Norte en los sectores noruego y británico.

Un tercer tipo lo constituyen las unidades de producción flotantes.

2.2 Entorno

El entorno de una plataforma petrolífera en alta mar puede caracterizarse por:

- profundidad del agua en el emplazamiento
- suelo, en el lecho marino y en el subsuelo
- velocidad del viento, temperatura del aire
- olas, fuerza de la marea y tormentas, corriente
- hielo (fijo, flotante, icebergs)
- seísmos (si fuera el caso)

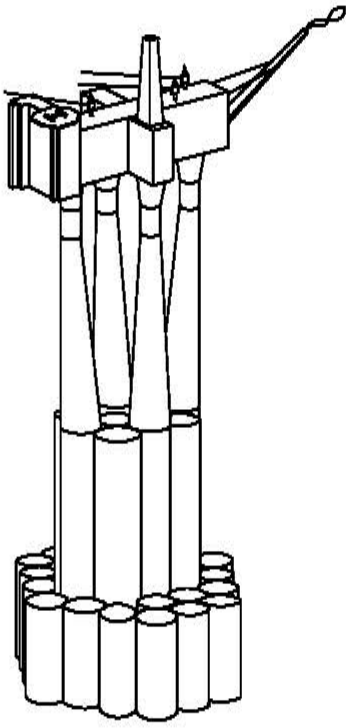


Figura 2 Plataforma con subestructura basada en la gravedad, construida para los yacimientos británicos y noruegos en el norte del Mar del Norte

La estructura del módulo superior debe mantenerse fuera del alcance de las crestas de las olas. El espacio libre u holgura entre la cresta de la ola y el módulo se fija normalmente en 1,50 m, pero debería aumentarse en caso de que el agotamiento de las reservas originara un asiento significativo.

2.3 Construcción

El entorno, así como aspectos financieros, exigen que gran parte de la construcción previa se efectúe en tierra. Es necesario realizar el diseño de manera que se limite al mínimo el trabajo en el mar. El coste global de una hora de trabajo de operario en el mar es aproximadamente cinco veces el de una hora de operario en tierra. El coste de los equipos de construcción necesarios para el manejo de cargas, así como los costes de logística, también son mucho más elevados en el mar.

Estos factores, combinados con la magnitud y el peso de las piezas, exigen que el proyectista se vea obligado a prestar una gran atención a todas las actividades de construcción entre el trabajo de taller y el montaje en el mar.

2.4 Reglamentos

El diseño estructural ha de cumplir ciertos reglamentos específicos para las estructuras de las plataformas petrolíferas. El reglamento estructural principal de ámbito mundial es el API-RP2A [1]. Las reglas de Lloyds [2], recientemente publicadas, y las reglas DnV [3] también son importantes.

Se han de cumplir los requisitos gubernamentales específicos, por ejemplo los contenidos en las reglas del Department of Energy (DoE), Norwegian Petroleum Direktorate (NPD). Para el diseño de detalles de la estructura del suelo superior se utiliza con frecuencia el reglamento AISC [4] y para las soldaduras se utiliza el reglamento AWS [5].

En el Reino Unido el accidente del Piper Alpha ha provocado la aparición de un nuevo enfoque para la regulación de las plataformas petrolíferas. La responsabilidad del control de la reglamentación se ha trasladado al Health and Safety Executive (HSE) y es el operador el que ha de presentar una evaluación formal de la seguridad en lugar de ajustarse a regulaciones detalladas.

2.5 Certificación e Inspección de Garantía

Las autoridades gubernamentales exigen que organismos reconocidos evalúen los aspectos de integridad estructural y emitan un certificado al efecto.

Los principales organismos de certificación son:

- Det norske Veritas (DnV)
- Lloyds Register of Shipping (LRS)
- American Bureau of Shipping (ABS)
- Bureau Veritas (BV)
- Germanischer Lloyd (GL)

Sus exigencias están a disposición del proyectista [2, 3, 6, 7, 8].

Las compañías de seguros que cubren el transporte y el montaje exigen que inspectores de las aseguradoras inspeccionen las estructuras antes de que se proceda a la aceptación. Los inspectores de las aseguradoras aplican las normas, si las hubiera, de manera confidencial.

3. EXPLOTACIÓN DE UN YACIMIENTO DE PETRO-LEO/GAS MEDIANTE PLATAFORMAS

3.1 Introducción

En [9] se resumen los diferentes requisitos de una plataforma petrolífera, así como las fases típicas para su explotación. Tras varias etapas iniciales entre las que se incluye el estudio sísmico del campo, se perforan uno o más pozos de exploración. Para esta labor se utilizan plataformas de perforación autoelevadoras en profundidades del agua de hasta 100-120 m; para aguas más profundas se utilizan equipos de perforación flotantes. Se estudian los resultados y se evalúan los aspectos económicos y los riesgos de los diferentes planes de explotación. Los factores que toman parte en la evaluación pueden incluir el número de pozos necesario, instalaciones de producción fijas o flotantes, el número de estas instalaciones y la descarga mediante oleoducto o petroleros.



Diapositiva 3

Tan pronto como se decide y aprueba la explotación, hay cuatro actividades técnicas principales, anteriores a la producción:

- ingeniería y diseño
- trabajo de fabricación y montaje de la instalación de producción
- perforación de los pozos de producción, que se prolonga durante 2-3 meses por pozo
- suministro del sistema de descarga (oleoductos, petroleros, etc.).

La interacción entre la perforación y la construcción se describe a continuación para dos conceptos típicos de plataforma fija.

3.2 Plataforma cimentada sobre jacket para aguas poco profundas

En primer lugar se instala la jacket. Luego se perforan los pozos utilizando una unidad de perforación autoelevadora emplazada en las proximidades que se extiende por encima de la jacket. La diapositiva 3 muestra una unidad de perforación autoelevadora con un equipo de perforación .(En este ejemplo se encuentra efectuando labores de perforación exploratoria y por lo tanto trabaja sola.)

El diseño y la construcción del módulo superior se efectúan paralelamente a la perforación, permitiendo que la producción se inicie poco después del montaje de la cubierta. Para la perforación de pozos adicionales, se llamará de nuevo a la unidad de perforación autoelevadora y se colocará sobre el área a perforar donde está emplazada la plataforma de producción.

Como alternativa a este concepto, a menudo se acomodan otros pozos en plataformas independientes, unidas por medio de un puente a la plataforma de producción (véase la diapositiva 1).

3.3 Plataforma cimentada sobre estructura de hormigón

Se perforan los pozos desde un equipo de perforación situado en la plataforma permanente (véase la diapositiva 2). La perforación se inicia una vez que la plataforma está construida y totalmente montada. De esta manera, la producción se inicia entre uno y dos años después del montaje de la plataforma.

Durante los últimos años se han utilizado pozos pre-perforados con el fin de permitir un inicio más temprano de la producción. En este caso, se ha de instalar la plataforma exactamente sobre los pozos pre-perforados.

4. JACKETS Y CIMENTACIÓN SOBRE PILOTES

4.1 Introducción

Las jackets, las estructuras tubulares ancladas con forma de torre, cumplen generalmente dos funciones:

- Proporcionan la estructura de apoyo para la instalación de producción (módulo), manteniéndola estable por encima de las olas.
- Soportan lateralmente y protegen los conductores del pozo de 26-30 pulgadas y el oleoducto ascendente.

Los métodos de montaje de la jacket y de los pilotes ejercen un profundo impacto sobre el diseño.

4.2 Cimentación sobre Pilotes

La cimentación de la jacket se lleva a cabo mediante pilotes tubulares de acero con el extremo abierto, de diámetros de hasta 2 m. Los pilotes se introducen en el lecho marino hasta una profundidad de 40-80 m y, en algunos casos, hasta 120 m.

Básicamente, existen tres tipos de disposición de pilotes/jacket (véase la figura 3):

Concepto de pilote a través de las patas, en el que se instala el pilote en las patas de las esquinas de la jacket.

Pilotes en zócalo a través de alojamientos para el pilote situados en la base de la jacket, en el que el pilote se instala en guías acopladas a los pilares de la jacket. Los pilotes en zócalo pueden colocarse formando agrupaciones alrededor de cada pilar de la jacket.

Pilotes en zócalo vertical que se instalan directamente en el alojamiento del pilote en la base de la jacket; se eliminan todas las demás guías. Esta disposición tiene como resultado un menor peso estructural y una mayor facilidad del hincamiento de los pilotes. En cambio, los pilotes inclinados agrandan la cimentación en su base, proporcionando de esta manera una estructura más fuerte.

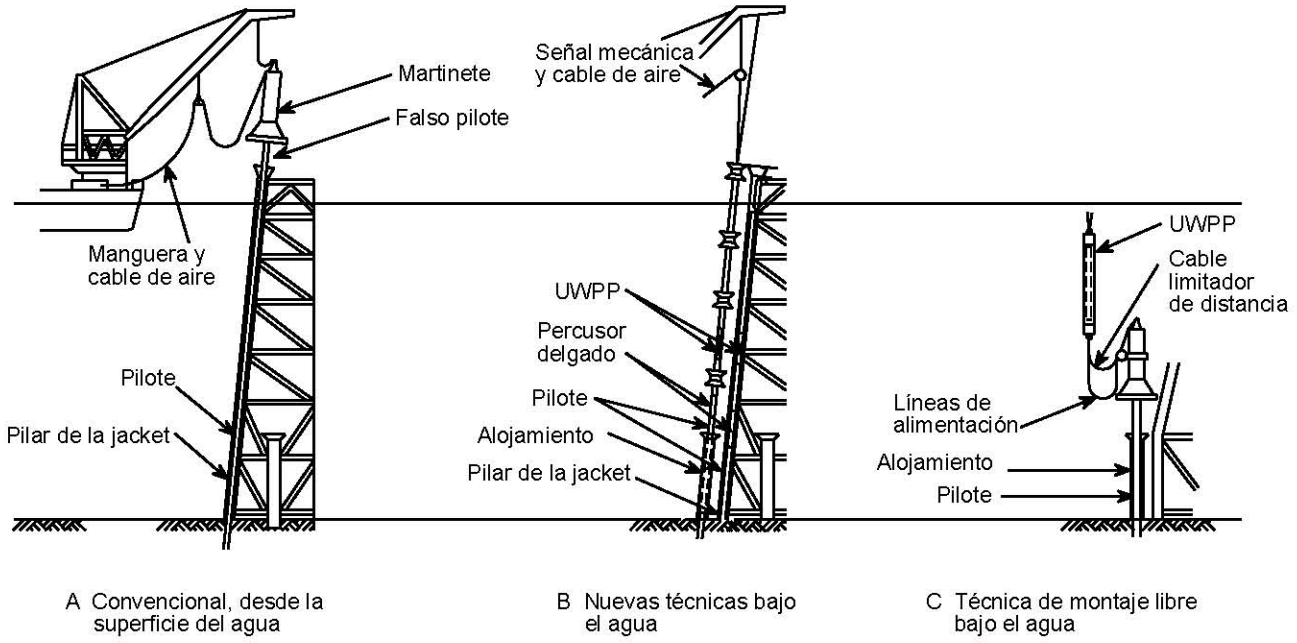


Figura 3 Tipos de cimentación para Jacket con técnicas de pilotaje convencionales y nuevas

4.3 Resistencia de apoyo de los Pilotes

La resistencia a la carga axial es necesaria tanto para el aplastamiento como para la tracción. El pilote acumula tanto rozamiento superficial como resistencia al aplastamiento.

La resistencia del pilote a la carga lateral es necesaria para la contención de las fuerzas horizontales. Estas fuerzas originan una flexión significativa del pilote cerca del lecho marino.

El número, disposición, diámetro y penetración de los pilotes dependen de las cargas del entorno y de las condiciones del módulo en el emplazamiento.

4.4 Protección frente a la corrosión

La forma más frecuente de protección frente a la corrosión de la parte desnuda sumergida de la jacket, así como de la parte superior de los pilotes introducidos en el lecho, es la protección catódica mediante ánodos de sacrificio. Un ánodo de sacrificio (aproximadamente 3 KN cada uno) consiste en una barra fundida de cinc/aluminio colocada alrededor de un tubo de acero y soldada a las estructuras. Normalmente, aproximadamente el 5% del peso de la jacket está en forma de ánodos.

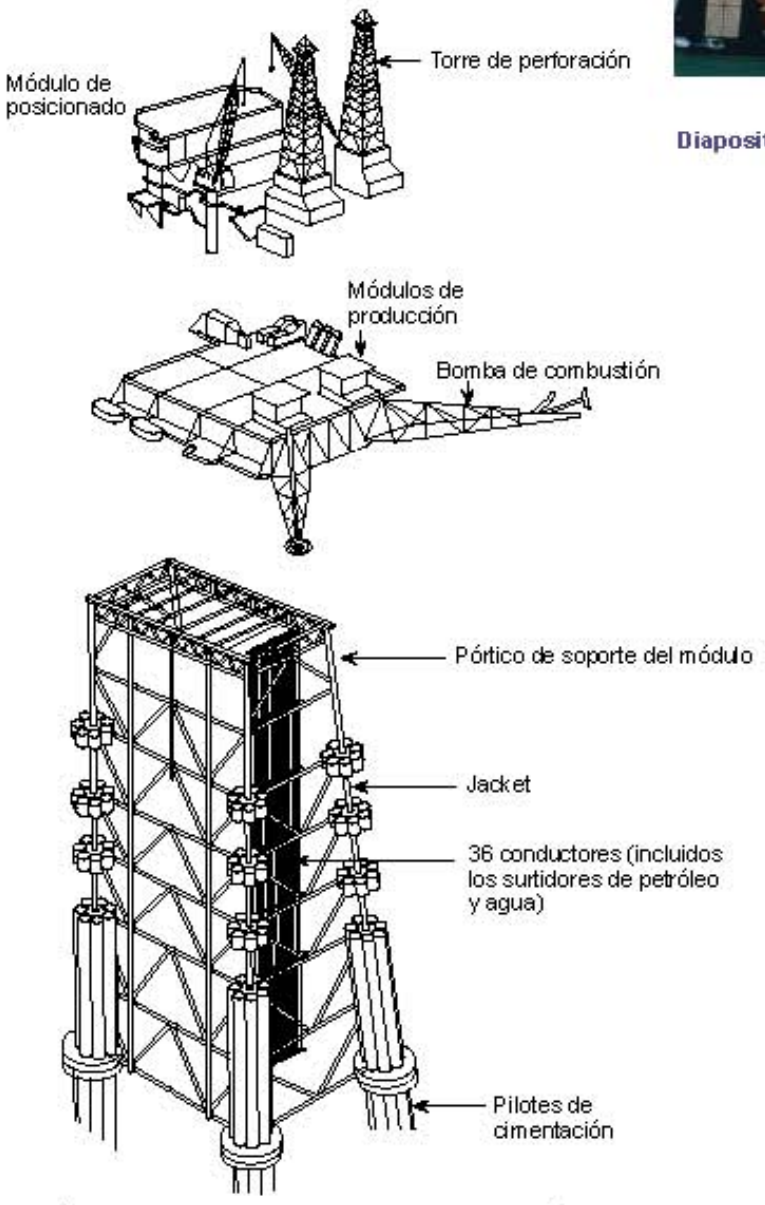
La estructura de acero en la zona de salpicaduras se protege normalmente mediante un sobre-espesor de 12 mm en cada elemento.

5. MÓDULOS SUPERIORES

5.1 Introducción

Las funciones principales de los módulos de una plataforma petrolífera son:

- control del pozo
- soporte para los equipos de los trabajos de complemento



Obsérvese el montaje de las vigas en la jacket y las guías de los pilotes convencionales

Figura 4 Jacket basada en una estructura superior modulada



Diapositiva 4

- separación del gas, petróleo y componentes no transportables del producto en bruto, por ejemplo agua, parafinas/ceras y arena
- soporte para las bombas/compresores necesarios para transportar el producto a tierra
- generación de energía
- alojamiento para el personal de operación y mantenimiento.

Básicamente hay dos tipos de estructuras para los módulos, el integrado y el modularizado, que se colocan bien sobre una jacket o sobre una estructura de apoyo de hormigón.

5.2 Módulos superiores cimentados sobre Jackets

5.2.1 Conceptos

Existen cuatro conceptos estructurales en la práctica, que se originan en las capacidades de carga de los buques grúa y de maniobras de carga o izado en los astilleros:

- el módulo integrado simple (hasta aproximadamente 100 MN)

- el módulo dividido en dos unidades de cuatro pilares
- el módulo integrado con módulo de vivienda
- la unidad modularizada consistente en una Estructura de Apoyo (EA) que soporta una serie de módulos.

La diapositiva 4 muestra el traslado de un módulo integrado (aunque no incluye el área habitable ni el helipuerto) desde las instalaciones de montaje.

5.2.2 Diseño Estructural para los Módulos Integrados

Para los módulos más pequeños, de hasta un peso aproximado de 100 MN la estructura de apoyo consiste en vigas de celosía o pórticos con supresión de diagonales.

Lo moderado de la carga vertical y del esfuerzo cortante por pilar permite que el módulo superior se apoye tan sólo sobre pilares verticales (patas del módulo), que llegan hasta la parte superior de los patas (situados a aproximadamente +4 m a +6 M.A.B (Marea Astronómica Baja).

5.2.3 Diseño Estructural para los Módulos Superiores Fundados sobre Jacket

Una unidad modularizada de importancia pesa de 200 a 400 MN. En este caso, el EA es una estructura tubular pesada (figura 4), con arriostramiento lateral que se extiende hasta la parte superior de la jacket.

5.3 Diseño para los módulos superiores cimentados sobre estructura de hormigón

El peso de los módulos que se han de apoyar sobre una estructura hormigonada (véase la figura 2) está comprendido en un campo de 200 MN hasta 500 MN.

La columna vertebral de la estructura consiste en un sistema de vigas tubulares fuertes con una altura de aproximadamente 10 m y una anchura de aproximadamente 12-15 m (véase la figura 5).

La estructura de apoyo de la unidad modularizada está conectada rígidamente al pilar de hormigón y actúa como una viga de apoyo para los módulos. A través de esta conexión se transmite la fatiga inducida por las olas en la estructura del módulo. Un reciente avance, previsto para la plataforma noruega Troll, consiste en proporcionar una conexión flexible entre el módulo y el pilar de hormigón, con lo que se elimina de esta forma la fatiga en el módulo [10].

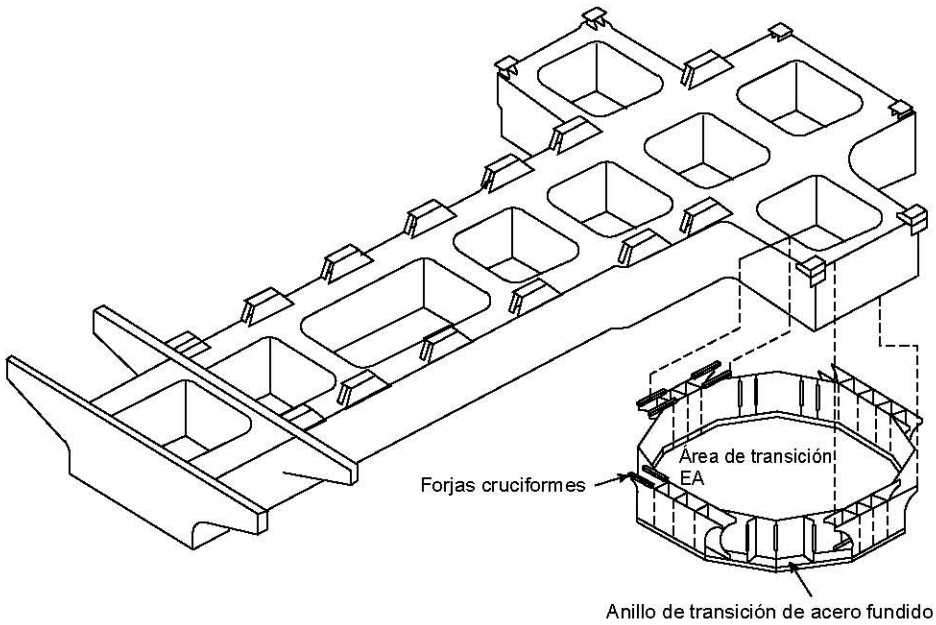


Figura 5 Estructura de soporte modulada para subestructuras basadas en la gravedad

6. EQUIPOS Y MÓDULOS DE VIVIENDA

Los módulos para el equipo (20-75 MN), tienen forma de cajas rectangulares provistas de uno o dos pisos intermedios.

Los suelos son de chapa de acero (de un grosor de 6, 8 o 10 mm) para el techo y el piso inferior y de enrejado para los pisos intermedios.

En los módulos habitables (5-25 MN) las ventanas son necesarias en todos los dormitorios y deben colocarse varias puertas en las paredes exteriores. Este requisito puede interferir gravemente con la disposición de las vigas de celosía. Los módulos son de chapa plana o rigidizada.

Pueden distinguirse tres tipos de conceptos estructurales, todos ellos evitando los pilares interiores:

- vigas de celosía convencionales en las paredes.
- paredes de chapa rigidizada (también llamada revestimiento resistente o tipo casa de cubierta).
- estructura de soporte fuerte (con arriostramiento anti viento en las paredes).



Diapositiva 5

7. CONSTRUCCIÓN

7.1 Introducción

El diseño de plataformas petrolíferas ha de considerar varias exigencias de la construcción relacionadas con:

1. fabricación
2. peso
3. embarque en la barcaza
4. transporte marítimo
5. montaje en el mar
6. montaje de módulos
7. uniones
8. puesta en servicio

Se debe disponer de una estrategia de construcción documentada durante todas las fases del diseño y debe efectuarse un seguimiento del desarrollo real del diseño, cotejándolo con la estrategia de construcción.

A continuación se ilustra la construcción mediante cuatro ejemplos.

7.2 Construcción de jackets, módulos, instalaciones y equipos

7.2.1 Jackets Instaladas con Grúa

Se construye la jacket en posición vertical (jackets más pequeñas) u horizontal (jackets más grandes) en un muelle del emplazamiento de fabricación.

Se iza y sujeta la jacket a bordo de una barcaza. En el emplazamiento de la plataforma, se fondea la barcaza junto a un buque grúa.

Se levanta la jacket de la barcaza, se coloca en posición vertical desde la horizontal en la que estaba y se coloca cuidadosamente sobre el lecho marino.

Tras colocar la jacket, se instalan los pilotes en sus alojamientos y se introducen en el lecho marino. La fijación de los pilotes a la jacket concluye el montaje.

7.2.2 Jackets Instaladas mediante Lanzamiento

Se construye la jacket en posición horizontal.

Para su izado a bordo de la barcaza de transporte, se coloca la jacket sobre rodillos que se deslizan sobre una vía recta de vigas metálicas y se la arrastra para subirla a la barcaza.

Una vez en el emplazamiento de la plataforma, se desliza la jacket fuera de la barcaza. Se sumerge profundamente en el agua y posteriormente adopta una posición flotante (véase la figura 6).

Se necesitan dos vigas de celosías verticales y paralelas fuertes en la estructura de la jacket, capaces de absorber las reacciones en el apoyo durante el lanzamiento. Con el fin de reducir las fuerzas y momentos en la jacket, se acoplan balancines a la popa de la barcaza.

La siguiente fase consiste en colocar la jacket en posición vertical por medio del llenado controlado de los tanques de flotabilidad y a continuación se coloca sobre el lecho marino. Las jackets con capacidad de colocarse por sí mismas en posición vertical lo hacen así tras el lanzamiento. El montaje se completa con el pilotaje y la fijación de los pilotes/jacket.

7.2.3 Módulos, instalaciones y equipos sobre estructura vertical de hormigón (E.V.H.)

Los módulos, instalaciones y equipos que componen una plataforma, se montan sobre una estructura de apoyo temporal sobre el mar y cercana a los astilleros. Después se la transporta en una barcaza de unas dimensiones tales que encaje entre las patas de la estructura de apoyo tem-

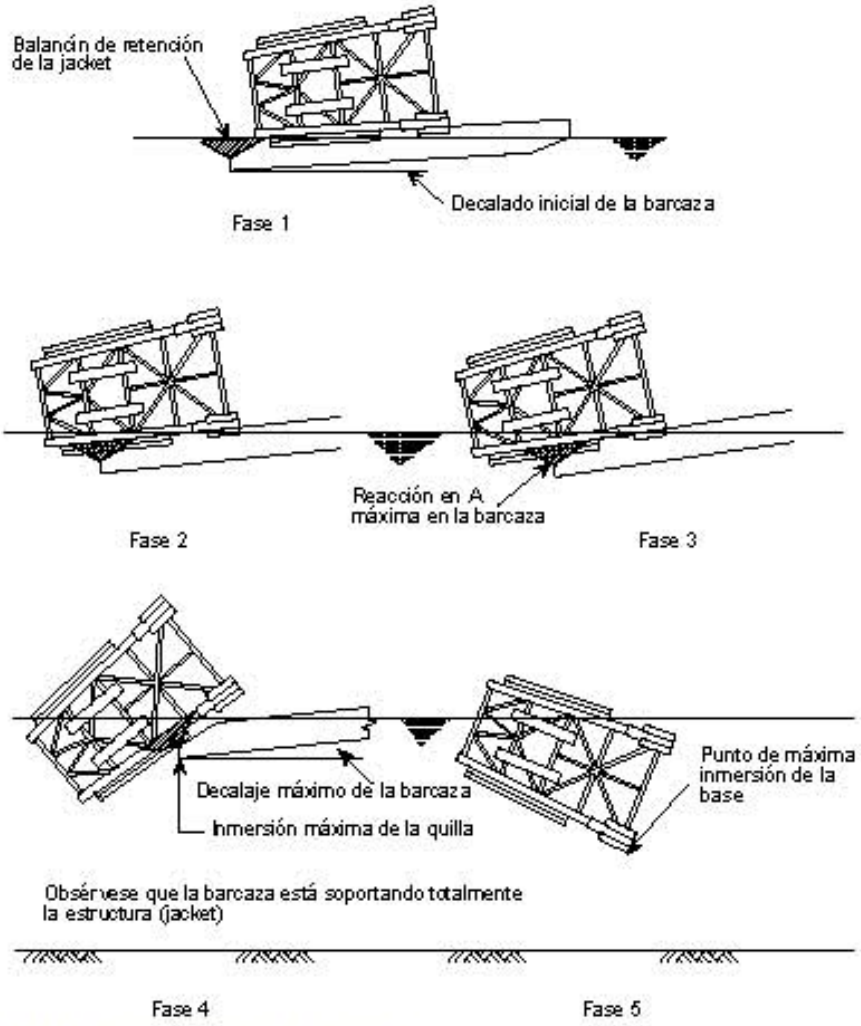


Figura 6 Lanzamiento de una jacket

poral y entre las patas de la E.V.H. A continuación se transporta la E.V.H., en un estado de flotación profunda, a un emplazamiento protegido, por ejemplo un fiordo noruego. Se coloca la barcaza entre los pilares y se descarga de lastre la E.V.H. para que se ajuste y soporte los módulos de la barcaza. Finalmente se remolca la E.V.H. flotante con los módulo hasta el emplazamiento en el mar y se coloca sobre el lecho marino.

7.2.4 Módulos de Jackets

En el caso de módulos de hasta aproximadamente 120 MN, es posible efectuar su montaje en un solo levantamiento. La diapositiva 6 muestra el montaje de un módulo de 60 MN realizado por grúas flotantes.

En el caso de la unidad modularizada, se ha de instalar en primer lugar la estructura de apoyo para los módulos, seguida inmediatamente por los módulos.

7.3 Levantamientos en alta mar

El levantamiento de cargas pesadas desde barcazas (diapositiva 6) constituye una de las actividades de construcción de gran importancia y espectacularidad y que requiere atención a la hora de desarrollar los conceptos. Para estas operaciones son necesarias las llamadas "ventanas meteorológicas", es decir, los periodos de condiciones meteorológicas adecuadas.



Diapositiva 6

7.3.1 Buque Grúa

El levantamiento de cargas pesadas en el mar exige el uso de buques grúa especializados. La figura 7 ofrece información sobre un buque grúa típico con dos grúas. La tabla 1 (página 16) presenta una lista de algunos de los principales buques grúa.

7.3.2 Disposición de las Eslingas, Eslingas y Grilletes

Para el levantamiento se utilizan eslingas de acero en una disposición de cuatro cables que descansan directamente en el gancho de cuatro puntos del buque grúa (véase la figura 8). La eslinga más pesada disponible actualmente tiene un diámetro de aproximadamente 350 mm, una carga de rotura de aproximadamente 48 MN y una carga útil de seguridad (CUS) de 16 MN. Hay grilletes disponibles con una carga útil de seguridad de hasta 10 MN para conectar los cáncamos (padeyes) instalados en los pilares de los módulos. Debido al espacio necesario, la unión de más de un grillete al mismo pilar no resulta una opción muy atractiva. Así pues, cuando la carga de la eslinga supera los 10 MN, los muñones (trunnions) se convierten en una opción.

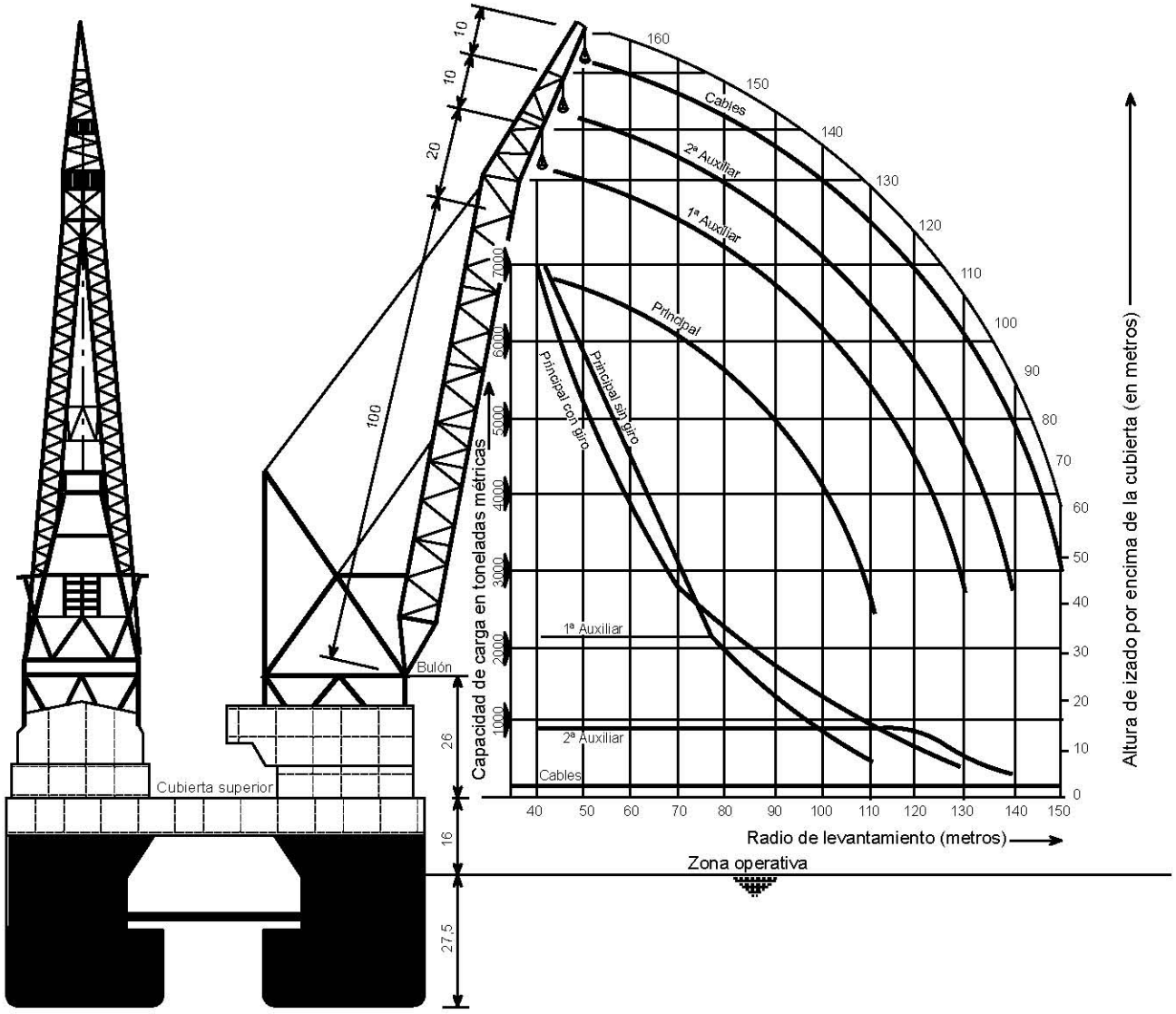


Figura 7 Diagrama de la capacidad de carga para un buque-grúa grande y doble

Operador	Nombre	Tipo	Modo	Capacidad de carga (toneladas)
Heerema	Thor	Monocasco	Fijo	2720
			Giratorio	1820
	Odín	Monocasco	Fijo	2720
			Giratorio	2450
	Hermod	Semisumergidas	Fijo	4536 + 3628 = 8164
			Giratorio	3630 + 2720 = 6350
	Balder	Semisumergidas	Fijo	3630 + 2720 = 6350
			Giratorio	3000 + 2000 = 5000
McDermott	DB50	Monocasco	Fijo	4000
			Giratorio	3800
	DB100	Semisumergida	Fijo	1820
			Giratorio	1450
	DB101	Semisumergida	Fijo	3600
			Giratorio	2450
	DB102	Semisumergidas	Giratorio	6000 + 6000 = 12000
Micoperi	M7000	Semisumergida	Giratorio	7000 + 7000 = 14000
ETPM	DLB1601	Monocasco	Giratorio	16000

Notas:

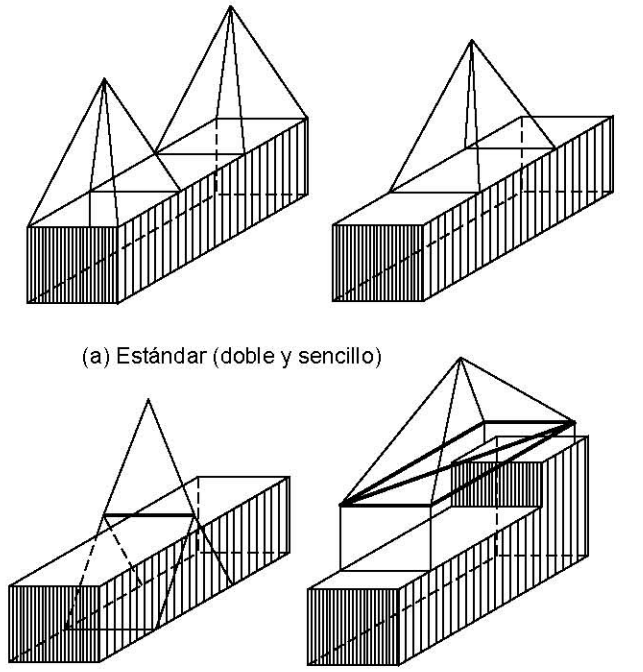
1. Capacidad de carga nominal en toneladas métricas.
2. Cuando los buques grúas están provistos de dos grúas, éstas se encuentran en la proa y popa del buque, aproximadamente a 60 m de distancia entre ejes.
3. Giratorio = Capacidad de carga con grúa totalmente giratoria.
   Fijo = Capacidad de carga con grúa fija.

Tabla 1 Buques grúa más importantes

7.4 Transporte Marítimo y Sujeción Durante el Mismo

El transporte se efectúa a bordo de una barcaza de cubierta plana o, si fuera posible, sobre la cubierta del buque grúa.

Es necesario sujetar el módulo a la barcaza (véase la figura 9) con el fin de que resista el movimiento de la barcaza en aguas embravecidas. El concepto de la sujeción durante la travesía lo determinan las posicio-



(a) Estándar (doble y sencillo)

(b) Con viga de reparto y puntos de elevación en la parte inferior del módulo

(c) Con estructura de distribución y puntos de elevación en la cubierta del módulo

Figura 8 Varias disposiciones de eslingas sobre cuatro puntos

nes de la estructura del módulo, así como los "puntos fuertes" de la barcaza.

7.5 Izado a Bordo

7.5.1 Introducción

Para el izado a bordo se aplican tres métodos básicos:

- deslizamiento
- plataformas remolque
- cabrias en A.

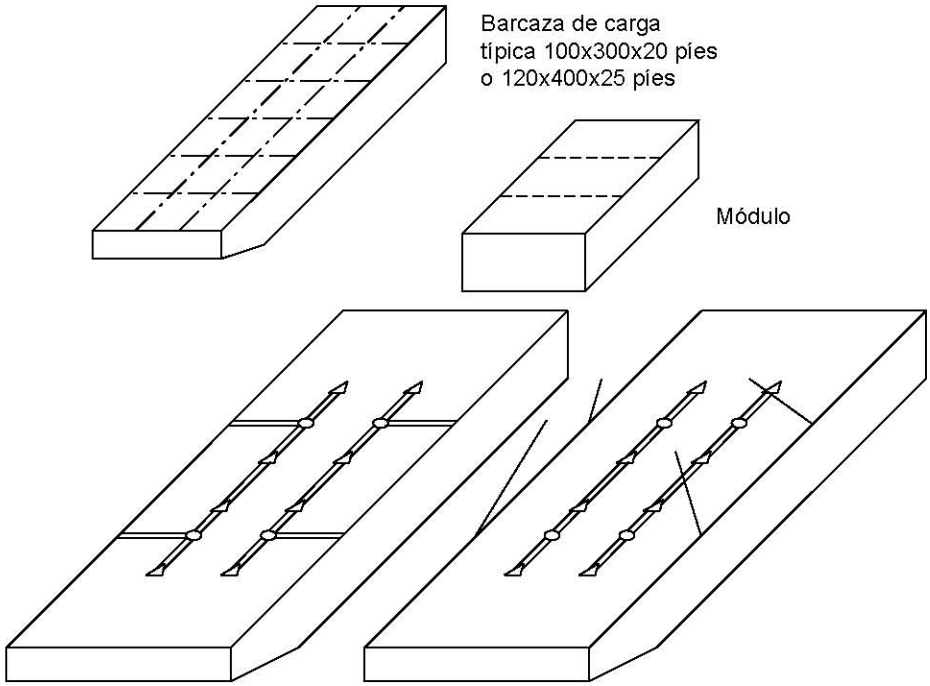
7.5.2 Deslizamiento

El deslizamiento es un método viable para elementos de cualquier peso. Este sistema consiste en una serie de vigas metálicas, que sirven de vía, sobre las cuales se dispone un grupo de patines, cada uno de ellos con una capacidad de carga de 6 MN. Cada patín está provisto de un gato hidráulico para el control de la reacción.

7.5.3 Plataformas Remolque

Es posible combinar unidades de remolque especializadas (véase la figura 10) con el fin de que se comporten como una sola unidad para cargas de hasta 60-75 MN. Las ruedas están suspendidas individualmente y los gatos integrados permiten el ajuste hasta 300 mm.

La capacidad de carga sobre el área de módulo proyectada varía desde aproximadamente 55 hasta 85 kN/milla cuadrada



(a) Sólo se fija la base

(b) Se fija la base y se usan abrazaderas

Figura 9 Conceptos de fijación en el mar