

# **PROBLEMAS QUE SE GENERAN EN LAS HÉLICES: CAVITACIÓN Y AVERIAS**



## **MEDIDAS CORRECTIVAS A BORDO Y OTROS SISTEMAS PROPULSIVOS**

**Toni Justes Fradera**

**Alberto Martinez Salguero**

**PFC-LTNM**

**Directora de proyecto: Marcel·la Castells Sanabra**

**FNB UPC 2008**



0	Introducción	7
1	La hélice	11
1.1	Propulsores marinos	13
1.1.1	Propulsión a remo	13
1.1.2	Propulsión a vela	14
1.1.3	Efecto magnus: El rotor Flettner	15
1.2	Resistencia al avance	19
1.2.1	Resistencia hidrodinámica	19
1.2.2	Resistencia aerodinámica	21
1.3	Introducción a la hélice	29
1.3.1	Elementos característicos de las hélices marinas	29
1.3.2	Representación gráfica de las hélices	31
1.3.3	Descripción de las proyecciones	32
1.4	Tipos de hélices	33
1.4.1	Hélices de paso fijo	33
1.4.2	Hélices de paso variable	34
1.4.3	Hélice tobera	36
1.4.4	Hélice contra-rotativa	37
1.4.5	Hélice de eje vertical (azimutales)	37
1.4.6	Hélices supercavitantes	38
1.4.7	Hélices emergentes (surface propeller)	39
1.4.8	Hélice Voith Schneider	39
1.4.9	Hélices CLT (con extremos de pala cargados)	41
1.5	Geometría de la hélice	43
1.5.1	Superficie helicoidal o helicoide	45
1.5.2	Elementos geométricos de la hélice propulsora	45
1.5.3	Desarrollo de las palas de la hélice	51

1.6 Resistencia mecánica de las palas de la hélice	55
1.6.1 Problemática de resistencia mecánica de las palas de la hélice	55
1.6.2 Materiales utilizados en la fabricación de hélices	55
1.6.3 Fuerzas que actúan sobre las palas de la hélice en funcionamiento	59
1.6.4 Resistencia mecánica de las palas de la hélice: teoría de la viga en voladizo	60
1.6.5 Peso y momento de inercia polar de la hélice	63
1.7 La hélice como parte integrante de la planta propulsora	65
1.7.1 Acoplamiento de la hélice propulsora	65
1.7.2 El comportamiento de la hélice a lo largo de la vida del buque	65
1.7.3 Modificación de la geometría de la hélice para una mejor adecuación a las condiciones de servicio	67
1.8 Interacción hélice-carena	71
1.9 Modos de operación del conjunto hélice-carena. Autopropulsión	79
1.9.1 Modos de operación del conjunto hélice-carena	79
1.9.2 Ensayo de autopropulsión	81
1.10 Proyecto de hélices con ayuda de series sistemáticas	85
1.10.1 Proyecto de hélices propulsoras	85
1.10.2 Series sistemáticas de hélices	86
1.10.3 Diagramas de la serie MARIN	89
1.10.3.1 Diagrama $K_T - K_Q$	89
1.10.3.2 Diagrama $B_p - \delta$	91
1.10.3.3 Diagrama $B_u - \delta$	92
1.10.3.4 Diagrama $\mu - \sigma$	93
1.10.4 Elección del número de palas	94
1.10.5 Huelgos hélice-casco	94

1.10.6	La experimentación con modelos de buques: los canales de experiencias	97
1.10.7	Canal de aguas tranquilas	97
1.10.8	Canal con dispositivos generadores de olas	99
1.10.9	El buque modelo	103
1.10.10	Canal de agua circulante	106
1.10.11	Ensayo de remolque	107
1.11	Métodos de correlación modelo-buque	109
1.11.1	El problema de la correlación modelo-buque	109
1.11.2	Método de Froude-Froude	111
1.11.3	Método de Froude –ITTC 57-Schoenherr-Otros	112
1.11.4	Método de Hughes	113
1.11.5	Método ITTC-78 para buques de una hélice	114
2	Cavitación	117
2.1	Historia introductoria de la cavitación	119
2.2	¿Qué es la cavitación?	121
2.3	Descripción del fenómeno	123
2.4	Las bases físicas de la cavitación	129
2.5	Tipos de cavitación según la hélice	137
2.5.1	La cavitación por flujo laminar	139
2.5.2	La cavitación por burbuja o transitoria	140
2.5.3	La cavitación por masa de agua o nebulosa	141
2.5.4	La cavitación en torbellinos o en el extremo de la pala	142
2.5.5	La cavitación en torbellinos producidos por interacción hélice-codaste	143
2.5.6	La cavitación en torbellinos producidos por interacción hélice-hélice	145

2.5.7	La cavitación en torbellinos originados por el núcleo del propulsor	147
2.5.8	La cavitación en la cara de presión	147
2.6	Inicio de la cavitación	149
2.7	Colapso de las burbujas al cavitarse la hélice	153
2.8	Ensayo de cavitación: túnel de cavitación y canal despresurizado	157
3	Averías, mantenimiento y reparaciones	167
3.1	Problemas que pueden aparecer con la hélice	169
3.1.1	Problemas de absorción de potencia	169
3.1.2	Erosión de la pala	170
3.1.3	Fracaso de la pala	172
3.1.4	Medidas previas a la reparación	173
3.2	Causas que provocan daños en las hélices	175
3.2.1	Daños producidos por la cavitación	175
3.2.2	Maltratamiento	176
3.2.3	Daños en el sistema mecánico	177
3.2.4	Corrosión progresiva	177
3.3	Reparación	179
3.3.1	Rotura de una pala	179
3.3.2	Roturas del núcleo	180
3.3.3	Reparaciones de los daños producidos en las palas de las hélices	180
3.3.4	Reparación de los daños por erosión	181
3.3.5	Mantenimiento de las palas durante su servicio	181
3.3.6	Cambiar parte de la pala de una hélice	182
3.3.7	Enderezar una pala doblada	182
3.3.8	Soldaduras para las reparaciones	183
3.3.9	Descarga de tensiones después de las soldaduras	187

3.3.10 Casos prácticos de reparaciones y mantenimiento de las hélices en astilleros	189
3.3.11 Como calcular el paso en astilleros después de una reparación	197
4 Sistema para evitar la cavitación en las hélices	199
4.1 Inyección de aire para producir supercavitación	201
4.2 Descripción de la técnica	201
5 Ruido e impacto medioambiental	207
5.1 Zumbido de la hélice	207
5.2 Ruidos y vibraciones	209
6 Conclusión	213
Anexo	217
Bibliografía	225