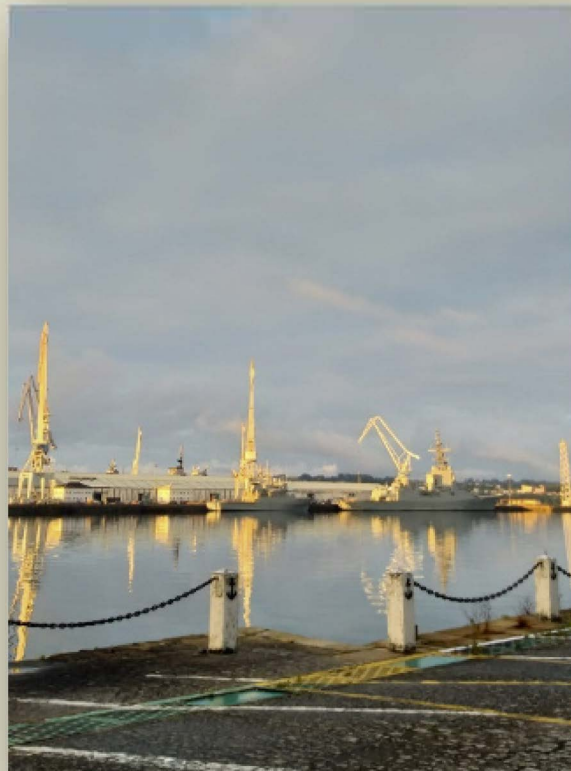




BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Diciembre 2022
Número 23



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE ARMAS NAVALES
(ETSIA-NAVALES)**



MINISTERIO DE DEFENSA



Catálogo de Publicaciones de Defensa
<https://publicaciones.defensa.gob.es>



Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado
<https://cpage.mpr.gob.es>

publicaciones.defensa.gob.es
cpage.mpr.gob.es

Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autor y editor, 2022

NIPO 083-17-203-7 (impresión bajo demanda)

NIPO 083-17-202-1 (edición en línea)
ISSN 2659-6458 (edición en línea)

Fecha de edición: diciembre de 2022

Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

Las opiniones emitidas en esta publicación son exclusiva responsabilidad del autor de la misma.

Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del copyright ©.

En esta edición se ha utilizado papel 100% libre de cloro procedente de bosques gestionados de forma sostenible.

A NUESTROS COLABORADORES

El acuse de recibo de los artículos enviados por nuestros estimados colaboradores no supone, por parte del BOLETÍN, compromiso de publicación. Normalmente no se devolverán los originales ni se sostendrá correspondencia sobre ellos hasta transcurridos seis meses de la fecha de su recibo, en cuyo momento el colaborador que los desee podrá reclamar la devolución.

Los originales habrán de ser inéditos, escritos en *Word* y se entregarán por vía informática (*Internet, Lotus Notes*) o grabados en CD. La extensión del texto no sobrepasará las seis páginas y se presentará escrito a un espacio. La Redacción se reserva la aplicación de las correcciones ortográficas o de estilo que considere necesarias.

Las siglas y acrónimos se aclararán con su significado completo la primera vez que se utilicen (excepto las muy conocidas: ONU, OTAN, etc.) y deben corresponder a su versión en español cuando la haya (OTAN en lugar de NATO, Marina de los Estados Unidos en vez de *US Navy*, etcétera).

Las fotografías, gráficos e ilustraciones se acompañarán con un pie o título y tendrán una resolución de 300 dpi como mínimo, preferiblemente en formato JPG. Si no son del propio autor, se citará su procedencia y el autor realizará los trámites precisos para que se autorice su publicación. El BOLETÍN no se responsabilizará del incumplimiento de este requisito. Las ilustraciones enviadas en papel pasarán a formar parte del archivo del BOLETÍN y solo se devolverán en casos excepcionales.

Se citará la bibliografía consultada.

Al final del artículo se incluirá el nombre y apellidos del autor, su categoría o profesión, el NIF, la dirección completa, con distrito postal, el número de teléfono y su dirección de correo electrónico.

Maquetación:

M^a José Pizarro García



Índice

EDITORIAL	Pág. 1
ESTUDIOS DE ESPADA EUROPEA CON INFLUENCIA CAROLINGIA-VIKINGA. SIGLOS X/XI	Pág. 2
CN (CIA) DR. D. Jesús Ibarz Fernández	
VALORACIÓN DE LA ACEPTABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE ACERO FUERA DE TOLERANCIAS	Pág. 33
CN (CIA) DR. D. Pedro Antonio Casas Alcaide	
ASPECTOS EXTERIORES DE BUQUES	Pág. 48
CF (CIA) D. Luis de la Puente del Pozo	
FUNDAMENTOS CFD DE APLICACIÓN EN INGENIERÍA II: TURBULENCIA	Pág. 53
CC (CIA) DR. D. Julio Manuel Pernas Urrutia	
«SYSTEM SAFETY» Y LA «ANEP-77»	Pág. 69
CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro	
D ^a . Sonia Bellón Pose	
DR ^a . D ^a . María Penedo Baeza	
BIOGRAFÍA: JOAQUÍN BUSTAMANTE Y QUEVEDO	Pág. 77

Foto portada: "Amanecer en Ferrol"

Autora: Elena Fernández del Campo Carreño



EDITORIAL



**El Capitán de Navío del Cuerpo de Ingenieros
Comandante-Director de la ETSIAN
D. JESÚS IBARZ FERNÁNDEZ**

Estimados amigos y compañeros:

Como enamorados de la ciencia, compartimos en este Boletín, una vez más, conocimientos y novedades que seguro son de interés para todos.

Cuando se realiza un trabajo académico o científico, se aprende y profundiza sobre determinadas materias, se sigue una metodología, y sobre todo se comparte, al final se enriquece a toda la comunidad, y no solo a su autor

Es posible que el tema despierte inquietudes en otros ingenieros o, incluso, que sea capaz de generar una posterior discusión que fomente el contraste de opiniones y perfile matices.

Compartir inquietudes, estar informado de las novedades y fomentar la curiosidad sobre ciertos temas es connatural al ingeniero. Como dice el físico Michio Kaku: «si no compartes el conocimiento, este no sirve para nada».

En este Boletín incluyo una pequeña aportación mía con el «Estudio de espada europea con influencia carolingia – vikinga siglos X/IX», donde hago una serie de observaciones sobre la estructura y las líneas de forja, forma y detalles de esta espada, en cuanto arma de combate, aunque de otros tiempos.

En este artículo también añado bastante información histórica que permite entender el contexto histórico de la espada.

Asimismo, me complace informaros de que estamos bastante cerca de conseguir la verificación de enseñanza oficial del Doctorado en Ingeniería de Armas Navales solicitada a la ANECA. Dicho esto sigo animándoos a sondear posibles áreas de investigación para futuros doctorados.

También os informo que, felizmente, la incorporación de la Ingeniería de Sistemas a nuestra enseñanza tanto de formación como de perfeccionamiento ha sido un éxito. Puedo comentaros sin sonrojo que hemos sido los pioneros de los tres Ejércitos en esta disciplina.

El proyecto ARES se ha reconvertido en el proyecto AIMUR con los mismos participantes y mismos objetivos, desarrollo de nuevos materiales para chalecos de protección balística y desarrollo de métodos de ensayo no destructivos para la determinación del envejecimiento y vida remanente de chalecos en servicio. La novedad es una mayor participación de la industria y una explicación más detallada sobre el empleo de la Inteligencia Artificial en el proyecto.

Finalmente, aprovecho para felicitaros a todos vosotros estas próximas Navidades y os deseo lo mejor para el próximo 2023, y os pido que hagáis extensiva esta felicitación a vuestros familiares y seres queridos.

Un fuerte abrazo a todos.

ESTUDIO DE ESPADA EUROPEA CON INFLUENCIA CAROLINGIA - VIKINGA SIGLOS X / XI

CN (CIA) D. JESÚS IBARZ FERNÁNDEZ

Doctor Ingeniero Industrial

Ingeniero Aeronáutico



Figura 1. Vista general de la espada. (Fuente: el autor)

1. Introducción histórica de la espada medieval Europea

Se puede afirmar que la espada medieval española, sería más propio decir de los reinos cristianos de la Península Ibérica, procede de una serie de elementos celtas, germánicos y mediterráneos introducidos en lo que se conocía como espada europea de tipo latino.

El rey visigodo Alarico y sus tribus conquistaron Roma en 410 d.C. y tras cruzar Francia y llegar a la Península Ibérica, fundó el reino visigodo de España que duraría 300 años hasta la llegada de los musulmanes en el 711 d.C.

Cuando llegaron los visigodos todavía existía una infantería en el sur de Europa, equipada con spathas, las sucesoras del «gladius hispaniensis»¹.

Los romanos acabaron incorporando la spatha, a su caballería. Esta espada, al ser más larga y pesada que el gladius, permitía mantener una mayor distancia con el enemigo y facilitaba golpear dando tajos, algo necesario a caballo para luchar contra otros jinetes y los peones²

Ambos tipos de espadas coexistieron durante el imperio romano a partir del siglo III.

¹ El nombre técnico es gladius hispaniensis porque los romanos adoptaron este estilo de arma de los celtas ibéricos durante las Guerras Púnicas del siglo III a.C. El gladius fue diseñado para combates mano a mano, cuerpo a cuerpo contra el enemigo en el campo de batalla. Las espadas más largas necesitaban espacio para empuñarlas y balancearlas, lo que significaba mover o retirar momentáneamente el escudo romano, dejando el cuerpo expuesto. El gladius más corto eliminó este problema.

² La spatha fue inspirada por las largas espadas de los celtas en Alemania y Gran Bretaña. Guerreros germánicos que lucharon como aliados de los romanos mantuvieron sus espadas más largas y la práctica parece haberse pasado a los romanos.

Aunque tanto los pueblos mediterráneos del imperio romano como las tribus germánicas al norte de los Alpes y al este del Rin están influidos por casi los mismos pueblos de Oriente, esta influencia evoluciona en dos direcciones, una latina y otra germánica³.

Efectivamente, las fuentes de las que las espadas medievales europeas toman prestado el diseño son hasta cierto punto comunes, son originarios del mismo rincón del Este. Pero las rutas de las corrientes se mueven no solamente a lo largo de las costas norte y sur del Mediterráneo, sino incluso a través de Hungría y Bohemia. Los Alpes y el Rin hacen de límite superior de estas líneas fronterizas.

La línea latina recibe una influencia muy importante del imperio bizantino. Esta influencia bizantina tiene su origen en Persia durante el reino Sasánida y durante el Califato Omeya, también conocido como temprano. Se mueve a través de las islas del Mediterráneo al sur de Italia, Sicilia por un lado y por el otro a lo largo de las costas del norte de África a través de Gibraltar a España. Cuando el Califato de Damasco se separa en un califato oriental y otro occidental con centros en Bagdad y Córdoba, la línea occidental se refuerza en la Península Ibérica.

Cuando algunos siglos después nuevas tribus bereberes cruzan el estrecho de Gibraltar, particularmente las tribus Benu Marin (Benimerines), con sus guerreros zenetes (cuyo nombre dará apodo al tipo de espada «jineta») en los siglos XII y XIII, la línea latina recibe una influencia muy importante del imperio bizantino.

Este nuevo diseño ya se encuentra en la península ibérica en el siglo XIII, si no antes. Las relaciones durante los siglos VIII y IX d.C. entre el califato de oriente, el emperador bizantino y el emperador franco Carlomagno, constituyen excelentes apoyos a la evolución de la espada en Europa occidental. La espada que tratamos en este artículo podría ser carolingia o bizantina o lo que en Europa se conoce como vikinga, como razonaremos más adelante.



Figura 2. Espada nazarí atribuida a Ali Atar (1393-1483) (Fuente: Museo del Ejército de Toledo)

Según el Dr. A. Rahman Zaky⁴ las espadas árabes más antiguas eran siempre rectas y de doble filo en la mayor parte de los casos⁵, como la figura superior, no apareciendo los sables curvados hasta el año 1500. El estilo usual durante la primera época musulmana sigue, para este autor, la moda antecedente sasánida-pérsica

³ OPECIT *Introduction to the history of the european sword* By, Gladius, I (1961), pp. 30-75 ISSN 0435-029X, Dr. Ada Bruhn Hoffmeyer Pág. 46.

⁴ Investigador especializado en estudios de armas y armaduras islámicos.

⁵ Margot Gil Melitón, José Luis Lerma García *Patrimonio histórico militar: digitalización 3d de la espada nazarí atribuida a Ali Atar* <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6771422>>

con arriaces curvados hacia la hoja, estilo que también aparece en Bizancio durante los siglos octavo al décimo.

Con las espadas jinetas o también conocidas como «espadas de Boabdil» se perseguía movimientos rápidos y ágiles, los guerreros zenetes introdujeron el estribo corto y aligeraron el peso de sus defensas haciendo la espada más corta y manejable, con pomo redondo y pesado para acercar el centro de gravedad al arriaz y equilibrar la espada. En general se trataba de una espada con una hoja fuerte de 2 filos, ancha de 40-50 mm recta, de una longitud total entrono a 1 metro, arriaces caídos con número de canales variables más pensados para herir de corte que de punta.

Se tiene claro que en muchos aspectos; el mundo hispanoárabe y el cristiano se influenciaron mutuamente produciéndose fenómenos de aculturación mutuos. Esto quiere decir que en muchas ocasiones las armas usadas por ambos bandos no diferían en exceso.

Un ejemplo de ello lo constituye la famosa Tizona, que tiene un arriaz del siglo XIV pero una hoja genuinamente nazarí, espada recta, de doble filo con canal o vaceo hasta la mitad, en definitiva una espada «jineta»⁶.

La línea germánica también se vio influenciada por las olas migratorias del este, que pasaron por el valle del Danubio, Hungría hasta Sajonia, el norte de Alemania, y cruzaron el Báltico hasta Escandinavia.

Esta línea muestra un tipo de espada más pesada, más ancha, menos puntiaguda, con gavilanes rectos, otra manera de agarrar el mango de la espada, y particularmente el golpe cortante. Siglos más tarde, durante los siglos XV y Siglo XVI, las corrientes de Oriente trajeron a Europa los turcos el sable curvo.

Curiosamente las líneas fronterizas entre los modelos de espada latino y germánico todavía siguen de cerca las fronteras del antiguo imperio romano.

El desarrollo de las espadas y estoques en Inglaterra se caracterizó por una extraña mezcla de elementos latinos y germánicos, mientras que por ejemplo los Países Bajos y particularmente las partes flamencas, recibieron más influencia latina que germánica.

Como comentamos en líneas anteriores, la espada de caballero clásica de la Edad Media tiene su base en el spatha del tiempo de las migraciones producto de la espada de sármata⁷ de corte y punción, y de la espada

⁶ La Tizona fue depositada en el Museo del Ejército de Madrid en julio de 1944 por el XIV marqués de Falces, José María Velluti, donde permaneció expuesta al público hasta 2007. Ciertas espadas anteriores al Cid se denominaban Tizón, nombre traducido por llama o relámpago. En el Cantar de Mío Cid se exalta el brillo perlítico del acero, usado en la forja de las «tizonas» y una de esas espadas fue un trofeo de combate del Cid el 21 de octubre de 1094, en la batalla de Cuarte a pocos kilómetros de Valencia. No hay evidencias objetivas, al parecer, salvo la tradición desde los Reyes Católicos, de que la espada que estuvo en el Museo del Ejército de Madrid fuera exactamente la tizona de Cid pero desde luego sí que es una de las 20 tizonas forjadas en Córdoba. Efectivamente el Hualá señala que el rey Bucar le regaló a su primo Yusuf ibnTashfin una de las 20 «tizones» con puño de oro y pedrería y 30 de plata, forjadas en Córdoba. Una de las de oro sería para el Cid como trofeo de Guerra en Cuarte, la Tizona. Con la finalidad de conocer la antigüedad de la hoja, se investigó la microestructura por parte de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid, con la observación por microscopía electrónica de barrido, se dedujo que el acero de la Tizona tenía unos 950 años y la semejanza de su composición con espadas de la época de las coras (demarcaciones territoriales califales) aseguraba su origen árabe andalusí. La fecha era muy próxima al año 1002 de la era cristiana y, sin embargo, en la impresión del vaceo o acalanadura de la Tizona, figura «FUE FECHA EN LA ERA DE MIL E QVARENTA». Este anacronismo del grabador, que la aumentó en 38 años, es la diferencia entre la era cesárea (los años que tenía César al nacer Jesús) y la cristiana. La fecha de la forja conservaba la tradición de los cristianos-árabes forjadores.

⁷ Sármatas: pueblo iranio. En el siglo III a.C. los sármatas avanzaron desde el Cáucaso invadiendo gran parte del territorio que hasta entonces ocupaban los escitas. Su final como potencia bélica se produce hacia el siglo III, cuando se extiende el «imperio» de los godos hasta Crimea y luego deben afrontar el ataque de los vándalos y los hunos.

cortante celta. La espada de caballería romana, la *spatha* recibió influencia de los viejos *gladius hispaniensis* con su punta punzante. Aunque más largas que los *gladius* para llegar a los peones desde el caballo.

Efectivamente las espadas de la caballería romana de los siglos II y los siglos III son largas, delgadas con nervadura central y una punta afilada. Técnicamente eran de una excelente calidad, con acero en las hojas con los bellos resultados construidas con el modelo soldadura patrón (se verá más adelante en qué consiste este método) de las fábricas en Noricum⁸ y varios lugares del norte de Italia y también importadas de España.

Pronto surgieron fabricantes de hojas en el Cuarteles militares romanos a lo largo del Rin. A menudo, las hojas de estas fábricas tenían sellos como lo tenían algunas espadas celtas. Estas tendrán nombres en latín puro o un nombre bárbaro latinizado.

Posteriormente al siglo III las espadas de sármatas y góticas conservaron su punta afilada. Sin embargo el tipo *spatha*, que se desarrolló en la Francia merovingia, se desarrollará particularmente más larga y más ancha y una punta más roma durante el periodo Carolingio.

La espada vikinga nórdica es básicamente una evolución continental más de la espada de la migración merovingia, que también se desarrolló aún más en las forjas carolingias. Se encuentran trabajos y producciones locales de empuñaduras con artículos de imitación e importación de los modelos franco-carolingios en la parte oriental de Escandinavia.

En el este de Escandinavia, pueden verse influencias de los territorios del Bósforo, pero más o menos transformados, debido al paso por Alemania del Este, Polonia y las tierras de la costa báltica.

Las empuñaduras, vainas, las guarniciones y conteras de espadas vikingas algunas veces muestran esta influencia extranjera del Bizancio, Persia y otras partes de Oriente.

Pero esta influencia se ve sobre todo en el estilo de la decoración y en los elementos decorativos más que en las formas de los pomos.

La espada medieval continental o más bien germánica del siglo XI al siglo XII y hasta después de Medios del siglo XIII es un tipo de espada continental común, con el pomo normalmente con la forma de lo que se conoce como nuez de Brasil, (sucesores simplificados de los pomos carolingios y vikingos de los tipos Jan Petersen⁹ tipo X e Y y el horizontal) con gabilanes de sección cuadrada).

⁸ Reino o federación de tribus célticas ubicado en territorios de la actual Austria, la Baviera alemana y parte de Eslovenia.

⁹Jan Greve Thaulow Petersen, (1887-1967)), Investigador e historiador noruego entre sus trabajos más famosos se pueden citar la clasificación de las hojas de espadas medievales. La tipología de Oakeshott del historiador e ilustrador británico Ewart Oakeshott (1916-2002) se basó en el trabajo de Petersen.

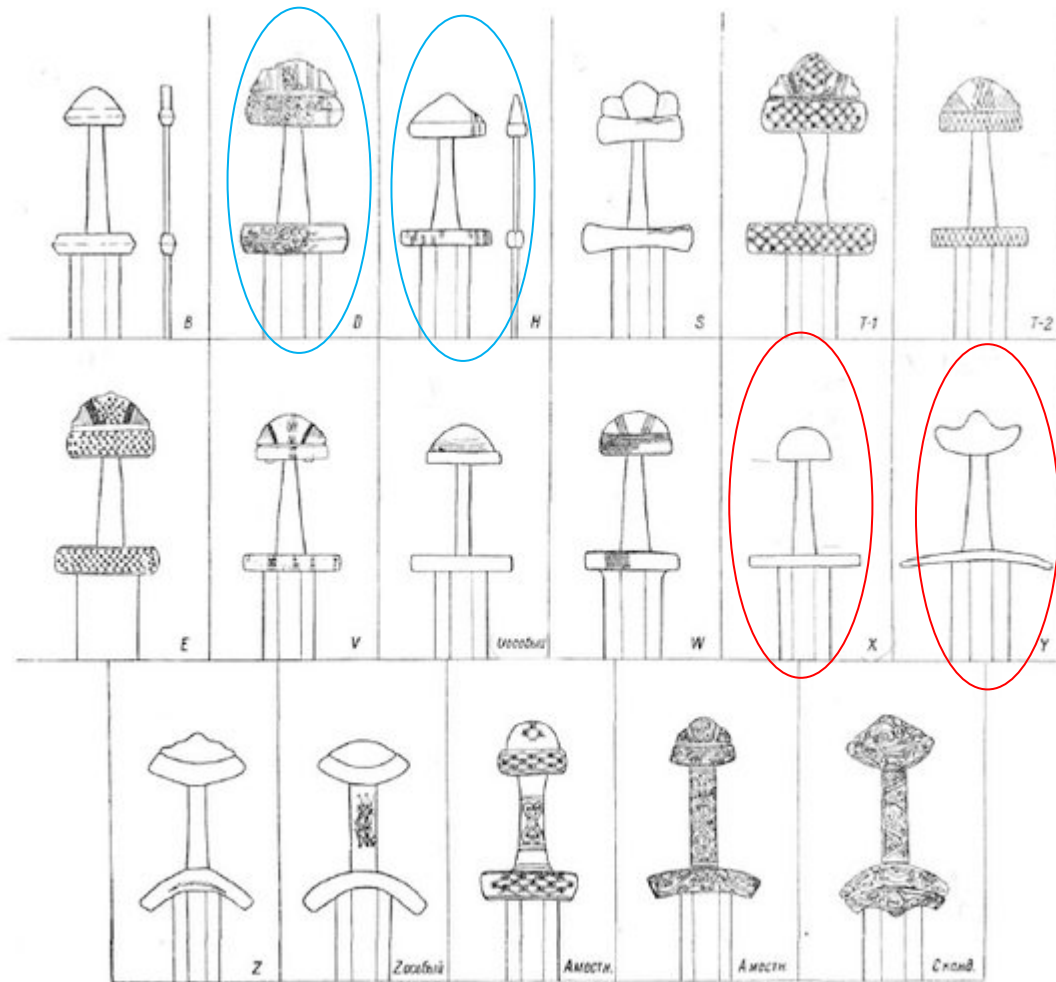


Figura 3. Clasificación de Jan Petersen (Fuente: the norwegian viking swords by Jan Petersen (1919))



Figura 4. Pomo con forma de nuez del Brasil. (Fuente: Powell collection, encontrada en un río cerca de Gales)

El pomo con forma de nuez del Brasil nunca llegó a ser habitual en el mundo latino.

Este pomo se llegó a encontrar en el norte de Italia, posiblemente debido a la influencia suiza y austriaca y se encuentra, pero raramente, en el arte pictórico del norte de España.

El pomo que predominaba en los países latinos, era un pomo con forma de rueda o disco lenticular o plano.

Cuando este pomo en forma de rueda o disco fue, del sur, a las tierras del norte, comenzó a reemplazar al pomo de nuez de Brasil, tomando una forma más sólida y pesada que la encontrada en el sur y el oeste, y con perfiles pronunciados.

Otra influencia en el norte del sur fueron las guarniciones curvas, que nunca llegaron a ser tan frecuentes, como en el mundo latino aunque se abrieron paso desde el sur incluso a los países de la línea germánica.

Aunque la espada de caballero de tipo latino no se basaba completamente en la tipología de los francos merovingios o carolingios, sí se vio influenciada por ellos.

Particularmente los visigodos y hasta cierto punto las espadas lombardas jugaron un papel mucho más importante en la espada de caballero de tipo latino. Y estos tipos, aunque traídos por tribus germánicas, incluían una buena cantidad de elementos del entono sármata alano, bizantino y sasánida.

El desarrollo, en España con sus tradiciones romanas, comienza con la spatha gótica, la espada de caballería, cuyas raíces se encuentran en la espada de caballería sármata.

La espada visigoda es más delgada y puntiagudo que la de los tipos francos.

Se encontraron excelentes espadas en tumbas visigodas en Castiltierra, Segovia, aunque no se conservaron las empuñaduras. *La espada larga de dos filos era, entre los germanos, el arma del jefe, está presente en las tumbas principescas y más tarde en los cementerios enfilados de tradición germánica. Por su gran longitud era arma para luchar a caballo, como lo demuestra su acompañamiento de espuelas en algunas tumbas merovingias. La espada merovingia, es muy semejante en tipo a las de Castiltierra. Sitúa su origen en la cultura celta de la Tène III y no en la espada utilizada por el ejército romano regular, arma algo más corta y más puntiaguda, para herir con ella y también descargar golpes con los filos. Ésta es arma de combatientes a pie. Modelo distinto es el que aparece en representaciones de caballeros bárbaros al servicio de la Roma tardoantigua, algunas de cuyas espadas han sido halladas en tierras nórdicas. Analizadas, se ha comprobado su estrecho parentesco con las espadas de las grandes invasiones y luego con las merovingias¹⁰.*

Las guardas de las espadas españolas medievales siguieron las modas de Bizancio y el mundo islámico, aunque conservaran algunas tradiciones de la particular antigüedad del mundo ibérico.

Las Iluminaciones mozárabes de los siglos X-XII con sus tradiciones visigóticas muestran excelentes ejemplos de la espada española de la Alta Edad Media. Las distintas ediciones de los Comentarios sobre el Apocalipsis de Beato de Liébana dispersas por los museos de medio mundo, o el Códice Emilianense de El Escorial descubren auténticos modelos gráficos de espadas de esa época. Algunos de ellos tienen pomo muy parecido al de las espadas góticas o sármatas, otras tienen un pomo trilobulado, que parece carolingio o vikingo. Esta forma (la trilobulada) que se encuentra en espadas vikingas pero no con demasiada frecuencia, puede tener más influencia carolingia y por tanto bizantina. Las espadas trilobuladas de los beatos tienen desde mi punto de vista más influencia carolingia que vikinga. Al fin y al cabo, como ya se ha comentado, la vikinga es una

¹⁰ OPECIT *La necrópolis de época visigoda de Castiltierra (Segovia), Excavaciones dirigidas por E. Camps y J. M^a. de Navascués, 1932-1935, Materiales conservados en el Museo Arqueológico Nacional Tomo II: Estudios, Pág. 154.*

<http://www.man.es/man/dam/jcr:eb7fea42-15c8-4b6b-b18c-4d940b2656a5/2018-castiltierra-ii.pdf>

evolución continental de las espadas merovingias y carolingias, muchas importaciones e imitaciones de modelos franco-carolingios.

Como hemos comentado antes, existe gran relación entre las espadas árabes, bizantinas y carolingias durante esta época (siglos X-XII).

A lo largo de toda esta introducción hemos tratado la evolución de la espada básicamente desde final del imperio romano, la alta Edad Media (entre los siglos V y X d.C.), hasta la plena Edad Media (del siglo XI al XIII). Cabe decir que más adelante, sigue la baja Edad Media de los siglos XI al XV (final de la Edad Media en 1492).

Un poco antes de la caída del imperio Romano de Occidente se suele hablar del periodo de las migraciones germánicas¹¹, que comprende desde el año 300 d.C. hasta el 568 d.C. (invasión de la Italia bizantina por parte de los lombardos). Eso implica una parte en la que existe el Imperio romano de Occidente y otra parte posterior hasta el 586 d.C., parte de la alta Edad Media en la que hubo migraciones.

El periodo de la alta Edad Media se distingue por la coexistencia de tres imperios y su influencia en Europa el islámico, bizantino y carolingio. A este periodo el mundo anglosajón lo suele denominar era vikinga para los europeos del norte.

En el siglo X los herreros descubrieron cómo refinar el acero hasta el punto de poder hacer una hoja con una sola barra, en lugar de tener que usar el tiempo que consumía (aunque hermoso) proceso antiguo de soldadura patrón que es el que se había usado hasta entonces para construir hojas con acero, desde el comienzo de la Edad del Hierro, alrededor del 1200 a. C., hasta el siglo X. En el proceso soldadura patrón se forjan una serie de pequeños pedazos de hierro carburado y no carburado entrelazados, y esa era una forma de conseguir un material similar al acero de propiedades más o menos controlables. Es aspecto es similar al damasquinado pero no tiene nada que ver.

El periodo iniciado en el siglo X con la forja de espadas de una hoja con una sola barra, comprendido aproximadamente los siglos X al XIV, es un período de tiempo que vio el final de la era alta Edad Media y el amanecer de la Europa feudal. Esta técnica se conoce como procedimiento de laminación que consiste en reunir varias piezas de hierro y acero en una barra y forjarlas juntas, sin torcerlas u otra elaboración

El periodo de la plena Edad Media es el conocido como la Europa Feudal, estuvo marcada por la nobleza y los caballeros que vestían armaduras de malla, mientras que la infantería tendía a usar gambesones de lino. La espada de este período era el arma caballeresca de último recurso: si el caballero desenvainaba su espada, significaba que la carga de la caballería había fallado y el caballero ahora estaba rodeado de enemigos¹².

La espada de esta época era principalmente un arma cortante, utilizada para derribar a los oponentes con armadura ligera a caballo, y las formas de sus hojas reflejan esto. Es una hoja con la tipología X de Oakeshott¹³ (lo veremos más adelante), la tipología X corresponde a espadas con una serie de características y situadas temporalmente entre el 900 y 1130 d.C., siglos X-XI d.C.). Esta tipología se extiende a ambos lados de la frontera entre la baja y plena Edad Media. Los bordes son casi paralelos, con un más largo, profundo y ancho,

¹¹ Esta expresión de las invasiones bárbaras acuñada por los historiadores del siglo XIX y principios del siglo XX comprende los movimientos migratorios de las poblaciones germánicas y otros desde la llegada de los hunos al este de Europa central hasta la invasión de los lombardo en Italia en 586 d.C.

¹² *Ibidem* 10

¹³ Ewart Oakeshott (1916 – 2002), Investigador entre sus trabajos más famosos está la clasificación de las hojas de espadas medievales, continuación del trabajo del Dr. Greve Thaulow Petersen (1887-1967)

y una punta que puede empujar, pero claramente no está hecha para perforar una armadura más pesada. Este tipo de espada se fabrica hasta el siglo XII, pero no se fabrica después del 1200 d.C.

Se puede concluir con que la espada medieval de la Península Ibérica en los reinos cristianos durante al alta Edad Media era muy parecida a las árabes en la hoja y se podía incluir en las que hemos denominado tipo latino con influencias árabes, bizantinas y carolingias.

Como en el resto de Europa según fue evolucionando el armamento defensivo y ofensivo durante la plena y baja Edad Media, tanto las espadas de la línea latina como las de la germánica se fueron afilando y se hicieron más punzantes, de mayor longitud y duras para poder atravesar las uniones de las armaduras incluso estas últimas. Tanto las de la línea latina como la germánica.

2. Vistas de la espada objeto del estudio



Figura 5. Vista general de la espada. (Fuente: el autor)



Figura 6. Vista parcial de la espada. (Fuente: el autor)



Figura 7. Vista parcial de la espada. (Fuente: el autor)



Figura 8. Vista parcial de la espada. (Fuente: el autor)



Figura 9. Vista parcial de la espada. (Fuente: el autor)

Espada sin la empuñadura. Se aprecia la espiga, en una única pieza con la hoja y el pomo. Se observa la misma pátina en toda la espada, hoja, gavalanes pomo, por lo que parecen originales a la espada todas las piezas. Se observa también en la hoja la acanaladura central ancha y forjada manualmente, con las irregularidades correspondientes.



Figura 10. Vista parcial de la espada. (Fuente: el autor).

Se ven los trabajos del martillo de forja en la parte central, en la acalanadura.



Figura 11. Vista parcial de la espada. (Fuente: el autor)

Se observan a simple vista las líneas de forja



Figura 12. Vista parcial de la espada, punta. (Fuente: el autor)

Se observan a simple vista las líneas de forja.



Figura 13. Vista parcial. (Fuente: el autor)
Se observan a simple vista las líneas de forja



Figura 14. Vista parcial. (Fuente: el autor)

3. Ubicación en la historia de la espada en estudio (*Figura 1*)

Tras una primera vista, la forma de esta espada y en especial, el pomo, recuerda las famosas espadas vikingas, no obstante, a la vista de lo comentado hasta ahora, no deja de ser una evolución continental de la espada merovingia-carolingia.

En el Beato de Liebana aparecen espadas con esa forma, recta, de dos filos, hoja fuerte con una acanaladura ancha central, con gavlán recto y pomo trilobulado.

Este tipo de pomo, no muy común, llegó a utilizarse en las espadas vikingas pero era más común en las espadas carolingias.

En principio, se puede decir que no parece que exista mucha diferencia entre el tipo de armas empleadas en los reinos cristianos del norte de la península y el resto de Europa, incluida Europa del norte. El tipo más común parece ser la espada ancha, tipo Oakeshott X, con acanaladura central, guarda corta y pomo semiesférico o trilobulado. A partir del XI los gabilanes se hacen más largos, al igual que en resto de la Cristiandad. Ya en el siglo XII y XIII el pomo más frecuente es en forma de disco.

Realmente la espada de la era vikinga o carolingia se desarrolló en el siglo VIII a partir de la espada merovingia, Aunque popularmente llamada «espada vikinga», sobre todo en el mundo anglosajón, este tipo de espada se produjo en el Imperio franco durante la época carolingia. «Las diversas ediciones de los Comentarios sobre el Apocalipsis de Beato de Liébana en particular los más antiguos del siglo X, actualmente en León, Nueva York, Valladolid, Gerona y Madrid, o el Códice Emilianense de El Escorial muestran magníficos ejemplos de espadas de caballería. Algunos de ellos tienen los pomos no muy diferentes de las espadas góticas y sármatas, otras tienen un pomo trilobulado, que a primera vista parece carolingio o vikingo (fig. 5). Apenas hay tradiciones vikingas en esta forma, pero las hay con influencia carolingia, en definitiva bizantina¹⁴.



Figura 15. Página del Beato de Liébana. (Fuente: Beato de Liébana)

¹⁴ OPECIT *Introduction to the history of the european sword*, By Dr. Ada Bruhn Hoffmeyer, Gladius, I (1961), pp. 30-75 ISSN 0435-029X, Pág. 46.



Figura 16. Arqueta de San Millán (siglo XI) (Fuente: Arqueta de San Millán). Representa la toma de Amaya, «capital» de los cántabros, por el rey visigodo Leovigildo. En poco se diferencia esa imagen de las del mundo franco.

Aunque el beato original se escribió e iluminó en el monasterio de Santo Toribio de Liébana, todos lo que se atesoran son copias posteriores del original, desde el siglo X: El Beato de San Miguel de Escalada o Morgan (el más antiguo, del 926), El Beato Primero de la Biblioteca Nacional, Beato del Escorial, El Beato de Tábara (970), El Beato de Girona (el que contiene más ilustraciones, del 970), El Beato de Valcavado (970), El Beato de Seo de Urgell (975) y El Beato de Fernando I (1047).



Figura 17. Beato de San Miguel de Escalada o Morgan (Fuente: Beato de San Miguel de Escalada)

4. Tipología Oakeshott

La tipología hecha por Oakeshott basada en forma de pomos y hojas y su combinación, también es orientativa. Se hace en base a la acanaladura, longitud, tipos de guarda, sección de la hoja, punta y tipos de pomo. Tras muchas observaciones Oakeshott pudo clasificar las espadas en diferentes Tipos que las ubicaban temporalmente, esta clasificación se hizo según la combinación de las características citadas.

En nuestro caso, la espada en estudio, figura 1, correspondería al tipo X entre el 900 y 1130. Del siglo X- XI

Tipo X



Clasificación:	Espadas señoriales de una mano, diseñadas para el corte
Cronología:	900-1130
Longitud media de la hoja:	79 cm
Sección de la hoja:	Lenticular
Acanaladura:	Ancha, finaliza a escasos centímetros de la punta
Punta:	Generalmente redondeada
Tipos de pomo:	A, B, G, H, I, J, K, M
Tipos de guarda:	1, 2, 3.

Estas hojas se usaron desde la época tardo-vikinga hasta principios del s. XII. Sus hojas eran anchas y planas, y su punto de equilibrio muy adelantado, pensando en el corte. Guardas por lo general cruciformes, de entre 18-20 cm. de anchura, siendo esta mayor anchura del arriaz su principal diferencia con las primeras espadas vikingas. Pomos casi siempre de disco u ovals (nuez de Brasil). Fueron muy populares.

Figura 18. Tipo X de la tipología de Oakeshott
(Fuente: introducción a la tipología de Oakeshot, Antonio Lamadrid, Sala de Armas Fénix)

Pomo en el caso
que nos ocupa

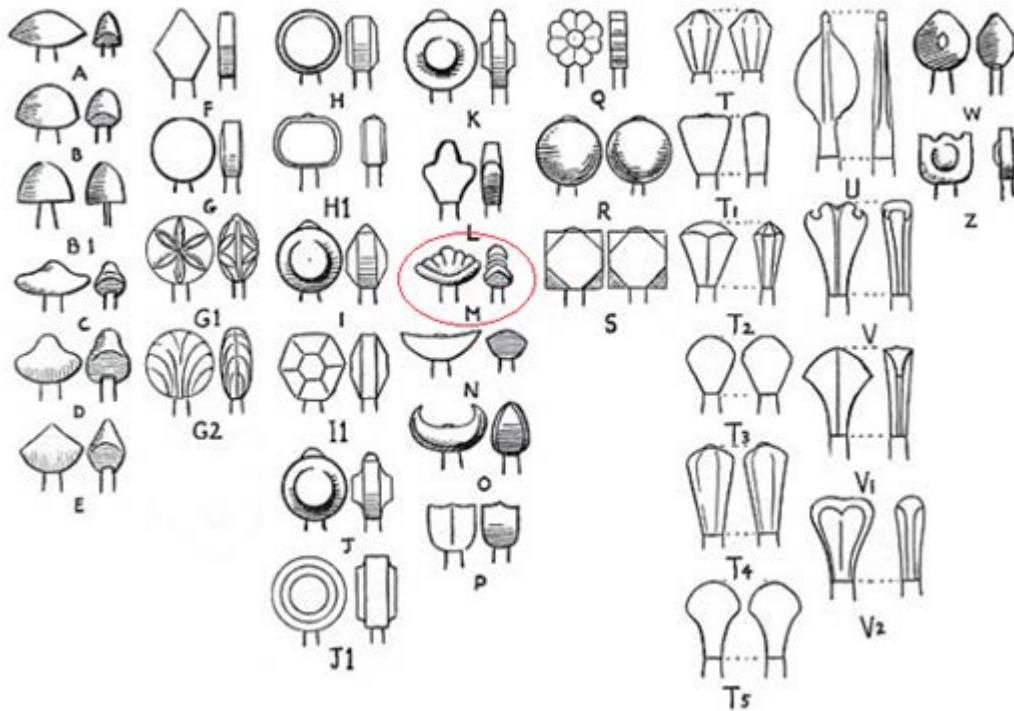


Figura 19. Pomo tipo L según Oakeshott

(Fuente: introducción a la tipología de Oakeshot, Antonio Lamadrid, Sala de Armas Fénix)

Guarda en caso que nos ocupa

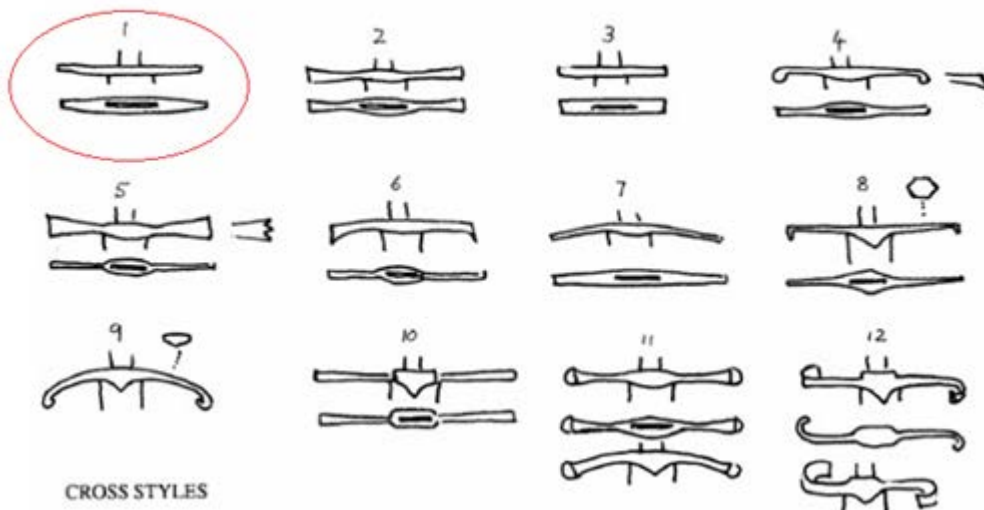


Figura 20. Guarda tipo 1 según Oakeshott

(Fuente: introducción a la tipología de Oakeshot, Antonio Lamadrid, Sala de Armas Fénix)

Podríamos concluir con que la espada es del siglo X / XI

El tipo más común parece ser la espada ancha, tipo Oakeshott X, con acanaladura central, guarda corta y pomo semiesférico o trilobulado. En nuestro caso trilobulado, sería el pomo tipo M de la figura anterior. Y la guarda un poco más ancha, numeración 1 de la figura anterior. Todo ello coherente dentro del tipo X de la clasificación de Oakeshott.

A partir del XI los gavilanes se hacen más largos, al igual que en resto de la Cristiandad. Ya en el siglo XII y XIII el pomo más frecuente es en forma de disco.

5. Consideraciones sobre las espadas vikingas



Figura 21. Vista parcial. Parte de espada vikinga, encontrada en Rosenlund Fagersta, Suecia del primer periodo vikingo (Fuente: National Museum of Denmark)



Figura 22. Un ejemplo típico de la espada Tipo H de Petersen, fechada por él en 800-950 (Fuente: The Norwegian Viking Sword by Jan Petersen)

La gran mayoría de espadas vikingas que han llegado a nuestros días fueron encontradas por arqueólogos en Gran Bretaña en tumbas donde fueron enterradas con sus dueños. Estas espadas vienen a ser considerados como los mejores modelos de espadas vikingas.

También se han encontrado muchas espadas y lanzas de los periodos vikingo y medieval temprano cerca de vados que cruzan ríos y en humedales. Quizás las armas se dejaron en esos lugares como ofrenda, o simplemente se dejaron caer y se perdieron durante el intento de cruzar las aguas.

Como hemos comentado, existen muchas espadas europeas parecidas a las vikingas, con la misma forma y hechura.

Sin embargo estas espadas eran los símbolos de estatus de unos pocos hombres de élite que podían permitirse empuñarlas y llevárselas a la tumba o hacerlas especialmente para su viaje final. Las espadas vikingas eran armas prestigiosas y la mayoría de los guerreros vikingos no podían permitírselas. Las mejores espadas vikingas eran muy apreciadas y, a menudo, se transmitían de generación en generación. Esto significa que el muestreo de estas armas, proviniendo la mayor parte de entierros, nos está dando una visión algo sesgada de lo que es una espada vikinga. Es difícil decir exactamente cuán diferentes eran estas espadas funerarias a las espadas más típicas utilizadas por los vikingos.

Efectivamente, el reciente análisis¹⁵ de tres espadas de la era vikinga (año 750 hasta el 1050 d. C.) del Museo Nacional de Dinamarca, provenientes del centro de Jutlandia, muestra que estas armas probablemente no eran lo suficientemente resistentes para la batalla o las incursiones, pudiendo ser probablemente sólo decorativas. Se utilizó por primera vez la técnica del escaneo de neutrones para observar con profundidad estas espadas de una manera no invasiva. Los escaneos de neutrones, similares a los rayos X, como su nombre indica, aprovechan que los neutrones pueden penetrar las nubes de electrones que rodean cada átomo, lo que permite escaneos mucho más profundos.

Estas tres espadas se fabricaron utilizando la soldadura por patrones (proceso pattern welding: patrón de soldadura, ya comentado en este artículo) una técnica en la que se sueldan tiras delgadas de diferentes tipos de hierro y acero y luego se doblan, retuercen y forjan de varias maneras para producir patrones decorativos en las superficies resultantes pero cuyo objetivo principal es el de distribuir según las necesidades las propiedades mecánicas de la hoja con tiras de hierro y acero entrelazadas.

Descubrieron que estas espadas no estaban bien diseñadas para el combate. Debido a que el acero es más duro que el hierro, esperaríamos encontrar, en una herramienta de combate, bordes de acero duro y un núcleo de hierro para absorber los golpes. Las espadas analizadas no muestran esta distribución preferencial. Además, los escaneos revelaron que las diferentes tiras de metal en estas espadas fueron forjadas y soldadas a altas temperaturas, lo que hace más probable que se hayan formado materiales conocidos como óxidos en la superficie de estas tiras. Estos óxidos debilitan las espadas y pueden permitir que entre óxido. Según algunos historiadores este hallazgo, junto con otros ejemplos similares de espadas que no son de combate, de la era vikinga, descritos anteriormente por los científicos, indican que las espadas eran más símbolos de poder y estatus y que rara vez se usaban. Otra posibilidad es que las de combate no se enterraran y se forjaran espadas mortuorias adrede. Con lo cual el muestreo de las espadas provenientes de tumbas no contaría a la hora de estudiar la espada real de combate vikinga.

Por tanto, para definir el posible estándar, o modelo o tipo de lo que se considera espada vikinga, si es que existe este modelo, se deben tener en cuenta las espadas vikingas reales encontradas hasta ahora en un sentido general. Se han hecho muchos intentos para hacer esto a lo largo de los años, el más influyente es definitivamente el del arqueólogo noruego Jan Petersen¹⁶.

¹⁵ *Scans of Viking Swords Reveal a Slice of Norse Culture*, Charles Q. Choi, April 12, 2017 <<https://www.livescience.com/58654-viking-sword-scans-reveal-norse-culture.html>>

¹⁶ *Ibidem* 9

Petersen publicó «De Norsk Vikingesverd» en 1919, en el que describe y clasifica los diferentes tipos de espadas vikingas. El libro fue tan influyente que todavía se consulta y emplea como referencia hoy en día, pero no está exento de fallas. En primer lugar, solo clasifica las espadas según el tipo de empuñadura y no presta atención a las hojas. Y algunas de las clasificaciones de variación de espada de Petersen se basan en variaciones pequeñas, en gran medida insignificantes.

Uno de los mayores problemas para definir una espada vikinga es que muchas de sus espadas se fabricaron fuera de Escandinavia. Las armas francas tuvieron una gran demanda durante la era vikinga, y el acero franco se exportó abundantemente a los mercados escandinavos. Muchas de estas espadas fabricadas en el área del Rin llevaban el nombre de Ulfberth, quizás en honor al maestro forjador, pero la producción de estas espadas continuó durante dos siglos.

Es posible que el taller de Ulfberth continuara usando su nombre después de su muerte. Estas espadas vikingas se convirtieron en un problema tal para el rey carolingio Carlos el Calvo que prohibió la venta de armas por parte de los franceses a los vikingos¹⁷. La venta de armas a los enemigos siempre se ha considerado como una traición. *Respecto al origen de la fabricación de las espadas, las Ulfberht parece que no hay duda de que fueron forjadas en el reino de la actual Francia y que fueron, de algún modo, llegando al territorio pagano del norte de Europa.*¹⁸

Para hacer este asunto más complicado, muchas espadas francas fueron reacondicionadas con empuñaduras escandinavas, como se comentó, en la introducción histórica de en este artículo, para convertirlas en una espada mixta franco-escandinava. Estas espadas extranjeras o espadas mixtas constituyen alto porcentaje de las espadas vikingas que se encuentran en las tumbas de toda Europa. Incluso en Escandinavia se han encontrado docenas de espadas extranjeras en tumbas vikingas.

En Escocia, se han encontrado entre 34 y 36 espadas vikingas. Al menos 10 de estas espadas son lo que Petersen clasificó como tipo H¹⁹, véase figura 3.

De las espadas restantes, 14 son de una amplia gama de otros tipos. Estas espadas son mucho más exclusivas y extravagantes.

Nos encontramos en Irlanda con una situación similar, donde se han hallado más de 80 tipos diferentes de espadas vikingas. La gran mayoría de estos son de Noruega, mientras que uno es una espada Ulfberth del Imperio Carolingio.

La espada vikinga de Donnybrook, Irlanda, define muy bien la complejidad de categorizar este tipo de espadas²⁰. Un análisis de la hoja ha revelado que tiene un bajo contenido de níquel y cobalto, dos compuestos que se encuentran en grandes cantidades en las espadas escandinavas. Incluso la empuñadura no arroja ninguna idea sobre la espada. Si bien se puede clasificar como Petersen tipo D, véase figura 3, este grupo de

¹⁷ *These are not viking swords.* 2020-08-11 National Museums Scotland Dr Adrián Maldonado. <https://blog.nms.ac.uk/2020/08/11/these-are-not-viking-swords/>

¹⁸ OPECIT. *La importancia de las espadas en la sociedad escandinava*, Iris Baena Jiménez, Universidad de Barcelona, Trabajo de Final de Grado Vikingos, pág. 32 http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/109855/1/TFG_Baena%20Jimenez_Iris.pdf

¹⁹ *Ibidem* 17

²⁰ OPECIT. *A metallurgical study of some viking swords*, Alan Williams, pág 140, GLADIUS, XXIX (2009), pp. 121-184, ISSN: 0436-029X <https://core.ac.uk/download/pdf/268620377.pdf>

espadas tiene mucha diversidad desde el punto de vista decorativo. Es posible que la empuñadura y la espada se hicieran en dos lugares separados.

La empuñadura de espada Eigg (Escocia) es similar a la empuñadura de la espada Donnybrook. Se trata también una empuñadura de Petersen tipo D, véase figura 3, y se ha mantenido como un ícono de la Edad vikinga debido a lo bien que se ha conservado. Es difícil saber si estos tipos D son de inspiración franca o puramente vikingos.

En general, lo que se define como una espada vikinga depende exactamente de lo que queramos decir. Limitar la definición a las espadas fabricadas en Escandinavia entre los siglos IX y XI d. C. sería incorrecto. Limitar la definición a las espadas con un estilo escandinavo también significaría descartar muchas de las espadas vikingas más famosas encontradas.

A los vikingos realmente no les importaba de dónde venía la espada, ni en qué estilo estaba diseñada (recordemos la Tizona del Cid con hoja de una jineta forjada en Córdoba). El símbolo de la espada en sí era lo que importaba. Al final, no tiene mucho sentido vincular o definir una espada vikinga por estilo u origen.

Probablemente lo que distinguió a la espada vikinga durante la era vikinga no fue su diseño u origen, sino su historia y su uso como símbolo de poder y prestigio. Las espadas se transmitían con frecuencia de generación en generación o se daban como regalos a personas de alto estatus para mantener o fomentar las buenas relaciones con ellas.

6. Pesado y medidas en laboratorio

Dimensiones



Figura 23. Las dimensiones son coherentes con espadas de esta época.

Laboratorio de metalotecnia de la ETSIAN (Fuente: el autor)



Figura 24. El peso es coherente con espadas de esta época.
Laboratorio de metalotecnia de la ETSIAN (Fuente: el autor)

Tal vez ligeramente superior, pero por decenas de gramos.

En el laboratorio de metalotecnia de la ETSIAN se pesó dando 1,366 kg. Peso muy estándar para las espadas de la época.



Figura 25. Centro de Gravedad. (Fuente: el autor)

El centro de gravedad se encuentra en el primer tercio de la hoja.

7. Estudio óptico en detalle

Se estudió en detalle con un microscopio de metales y una lupa para metales.



Figura 26. Lupa para metales a la derecha y microscopio para metales a la izquierda. Laboratorio de metalotecnia de la ETSIAN (Fuente: el autor)



Figura 27. Primer tercio de la hoja con lupa x50 aumentos. (Fuente: el autor)

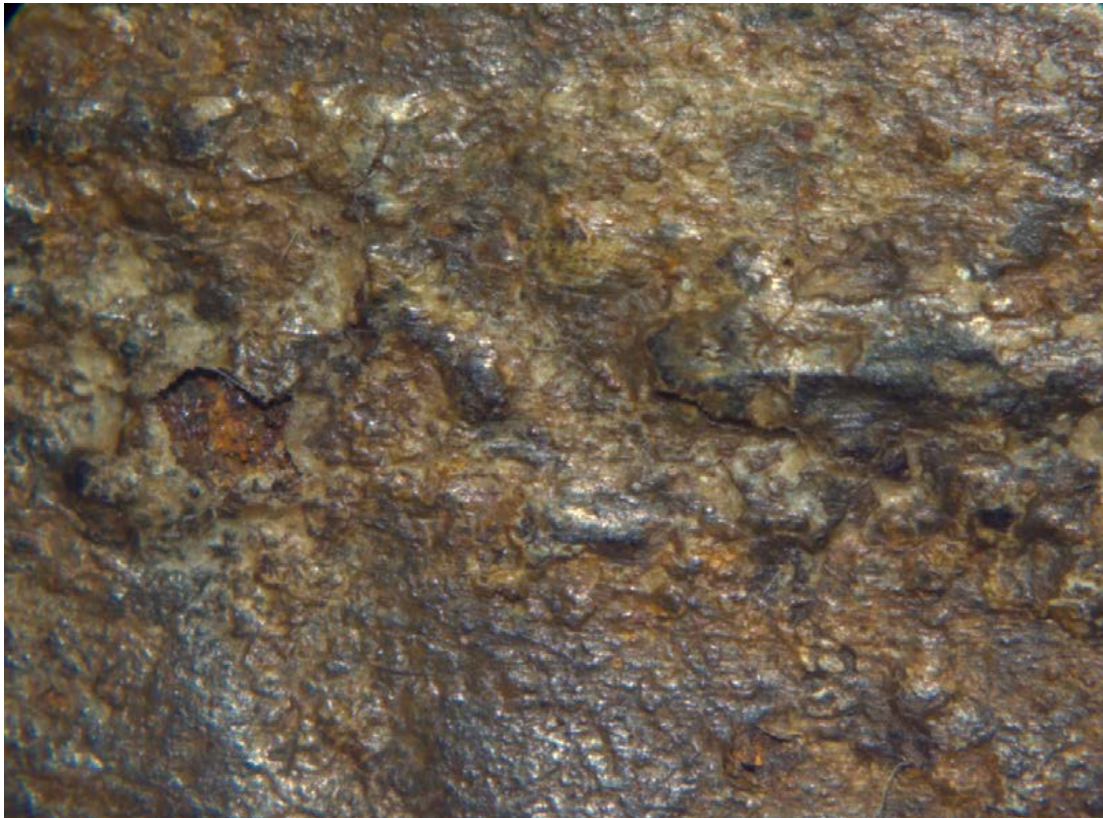


Figura 28. Segundo tercio de la hoja con lupa x 50 aumentos, en todo momento se aprecian las líneas de forja.
(Fuente: el autor)



Figura 29. Segundo tercio de la hoja con lupa x50 aumentos. (Fuente: el autor)

Se pueden apreciar desprendimientos de la capa superficial de la espada viéndose los gránulos o cráteres que deja con un óxido más vivo e intenso. Son partes que han caído recientemente. La capa de óxido protege el avance de la corrosión de la espada. Ese color rojo oscuro es el típico de la Ferrita. También se observan las líneas de forja. Se ve el desprendimiento del material ferrico en el proceso de corrosión. Se forma la ferrita, esta aumenta de tamaño y acaba desprendiéndose dejando un «cráter». Este es uno de los procesos de corrosión. El otro es el de la delaminación, en esta espada no se observa este segundo tipo de proceso.



Figura 30. Segundo tercio de la hoja con incrustaciones x 10 aumentos. (Fuente: el autor)

Dentro del círculo rojo de la figura superior se pueden apreciar inclusiones de sílice/arena al haber estado en tierra o lodo mucho tiempo.

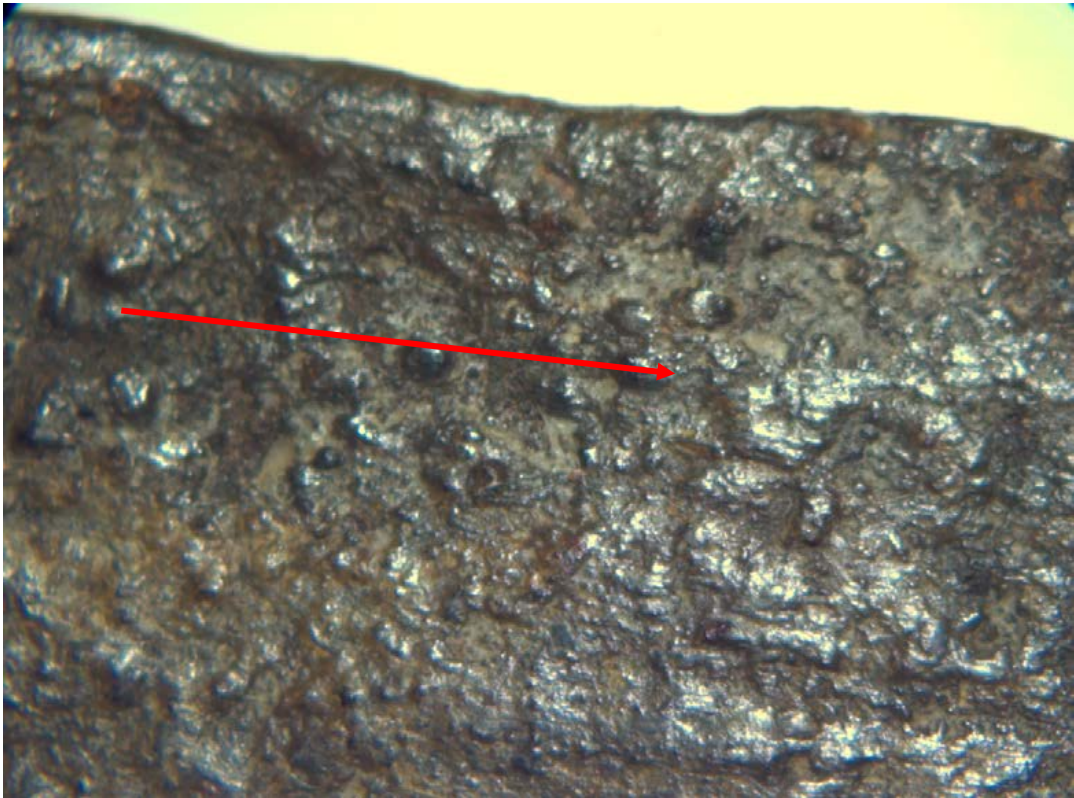


Figura 31. Segundo tercio de la hoja final, borde x 10 aumentos. (Fuente: el autor)

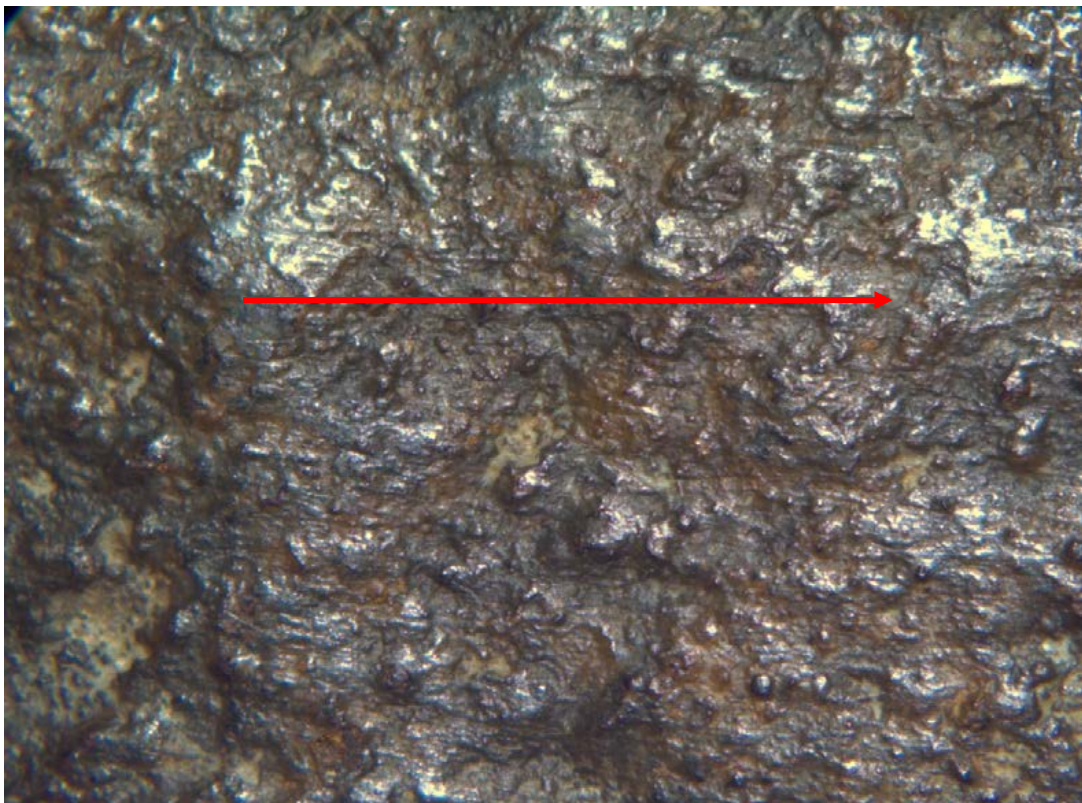


Figura 32. Tercer tercio de espada x 10 (Fuente: el autor), se ve fácilmente la dirección de la forja



Figura 33. Tercer tercio de espada punta, final de la espada x10, (Fuente: el autor)

Se aprecian los pliegues del remate de la punta en la forja. La punta es, obviamente, una de las partes más exigidas, debe ser de las más duras así como tenaces. Combinar estas dos propiedades es sumamente difícil.



Figura 34. Microscopio metales Laboratorio de metalotecnia de la ETSIAN (Fuente: el autor)

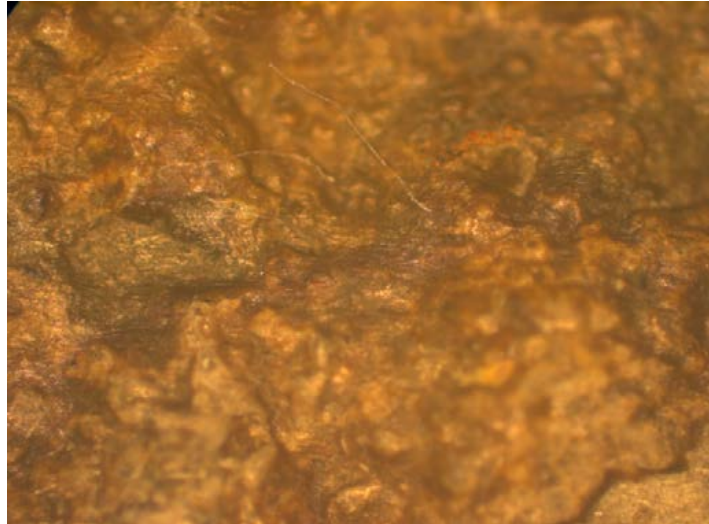


Figura 35. Primer tercio microscopio x 50 (Fuente: el autor)

Se observan fibras de sucesivas limpiezas así como las líneas de forja.

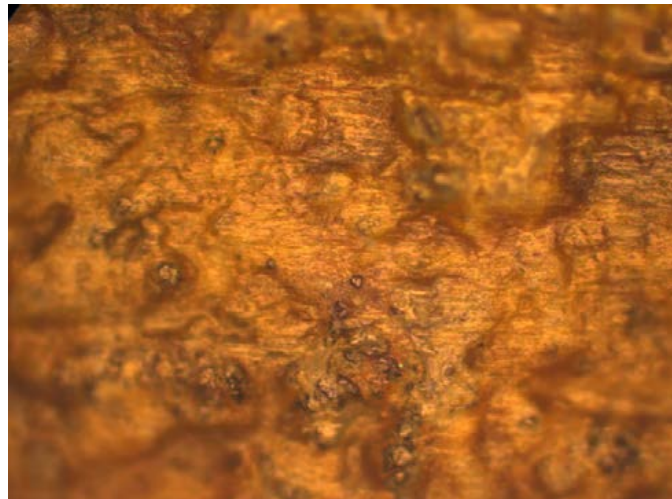


Figura 36. Primer tercio de la hoja microscopio x 100 (Fuente: el autor)

Se ven con más detalle las líneas de forja.

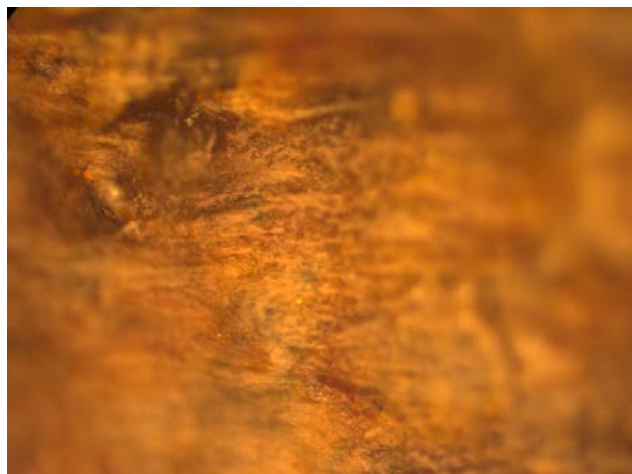


Figura 37. Primer tercio microscopio x 200. (Fuente: el autor), las líneas de forja más definidas.

8. Otros métodos de estudio

Se pueden hacer ensayos de durezas como el estudio titulado: «Identificación de una espada jineta de guerra»²¹ de Jose Maria Berasategui Liuzeaga, José Antonio Crespo Francés y Genaro Rosado Galdos, parece demasiado agresivo, este estudio es más una caracterización que una identificación. Esta espada fue encontrada en Sangüesa, Navarra. Es un método irreversible pues quedan los punzonados en las espadas.

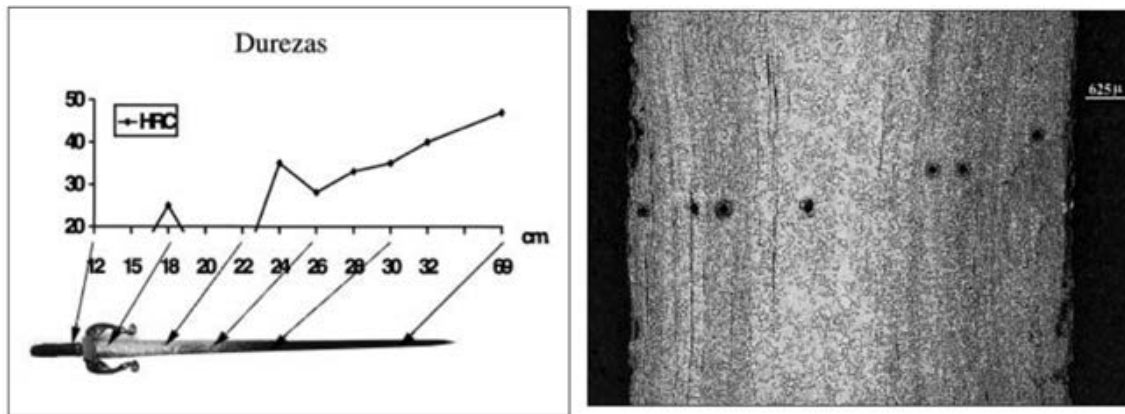


Figura 38. Catas de dureza a lo largo de la hoja de roma longitudinal. Foto contigua, catas transversales de dureza. (Fuente: artículo Identificación de una espada jineta de guerra)

En la figura de la izquierda se observa que la dureza aumenta según nos acercamos a la punta.

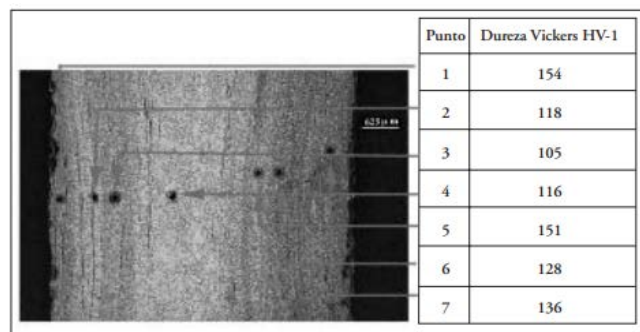


Figura 39. Catas de dureza transversales de dureza. (Fuente: artículo Identificación de una espada jineta de guerra)

En la figura se observa que la dureza aumenta según nos acercamos a los bordes de la hoja.

El obtener datos de dureza en la espada que nos ocupa y compararlos con esta u otras parecidas no aporta nada en la identificación, pues no existe una base de datos lo suficientemente amplia para describir este tipo de espadas. Los resultados del estudio serían un dato más añadir sobre las durezas de espadas del siglo XI pero nada más.

Se dispone de otros medios, actualmente no a nuestro alcance, como los estudios de la valoración del envejecimiento natural citados en el artículo titulado «modelos para la datación de hierros y aceros antiguos aplicados a la Tizona»²² que trata sobre el estudio de la valoración del envejecimiento natural de piezas

²¹ *Identificación de una espada jineta de guerra* Jose Maria Berasategui Liuzeaga, José Antonio Crespo Francés y Genaro Rosado Galdós.

https://www.culturavarra.es/uploads/files/04_TAN18_Berasategui-Crespo-Gos-Irasategui-Crespo-Ros_WEB.pdf

²² *Modelos para la datación de hierros y aceros antiguos aplicados a la Tizona* por José Manuel Jiménez, Daniel Arias, Esther Bravo, Juan Antonio Martínez y Antonio J. Criado -abstract

arqueológicas, como modelo para la datación de piezas de hierro y acero antiguas. No disponemos de esos medios²³

Existe por otra parte de un estudio²⁴ que trata de la datación por carbono de armas antiguas de hierro y acero, incluso sus óxidos en algunos casos (que retienen partículas de carburo de hierro).

9. Comentarios a las imágenes obtenidas. Originalidad y clasificación.

Se trata de una pieza antigua de forja tradicional. Esta espada está cubierta por una pátina de óxido y sílice uniforme y antigua.

Por el aspecto de la espada, la pátina suave y las incrustaciones de sílice, esta espada probablemente estuvo enterrada en un lago, río o suelo arcilloso. Abandonada a propósito o perdida. No era raro que los caballeros derrotados o a punto de serlo, las arrojaran a ríos o lagos antes de ser capturados. No parece una espada ceremonial de enterramiento sino de combate.

Por la forma se puede concluir con que es una espada europea típica del siglo X-XI con influencia carolingia, en definitiva bizantina. También podría ser vikinga con las salvedades comentadas.

10. Conclusiones

Con este artículo se muestra un ejemplo de datación y morfología de materiales metálicos antiguos. Este estudio es extrapolable cañones y demás elementos metálicos utilizados por la Armada.

Esta espada objeto del estudio se puede considerar como un arma empleada en el siglo X-XI d.C, tanto en caballería, infantería como en otras armas incluyendo el germen de la Armada de Castilla.

https://www.researchgate.net/publication/250312459_Modelos_para_la_datacion_de_hierros_y_aceros_antiguos_aplicados_a_Tizona/download

²³ Métodos basados en estudios del Carbono 14 y en la difusión de elementos a través de la capa de corrosión y a través de escorias. Algunos métodos se han aplicado al caso concreto de la espada Tizona, como el estudio citado en la referencia anterior: «modelos para la datación de hierros y aceros antiguos aplicados a la Tizona» proponiendo un método que nos permite averiguar su antigüedad. Para este estudio se emplearon técnicas como la Microscopía Óptica y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), tanto de baja como de alta resolución.

²⁴ *Archeometallurgy related to swords* Jeffrey Wadsworth, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH 43201, US, 2014
[http://refhub.elsevier.com/S1044-5803\(14\)00321-0/rf0075izona](http://refhub.elsevier.com/S1044-5803(14)00321-0/rf0075izona)

11. Referencias bibliográficas

- Dr. Ada Bruhn Hoffmeyer, *Introduction to the history of the european sword by, Gladius, I* (1961), pp. 30-75 ISSN 0435-029X.
<<https://pdfs.semanticscholar.org/ef86/033eb08186aeb83abc190fcf799f25945b84.pdf>>
- Dr Adrián Maldonado *These are not viking swords*. 2020-08-11 National Museums Scotland.
<<https://blog.nms.ac.uk/2020/08/11/these-are-not-viking-swords/>>
- Alan Williams , a metallurgical study of some viking swords, , pág 140, GLADIUS, XXIX (2009), pp. 121-184, ISSN: 0436-029X
<<https://core.ac.uk/download/pdf/268620377.pdf>>
- E. Camps y J. M^a. de Navascués, *La necrópolis de época visigoda de Castiltierra (Segovia), Excavaciones dirigidas por 1932-1935, Materiales conservados en el Museo Arqueológico Nacional Tomo II: Estudios*.
<<http://www.man.es/man/dam/jcr:eb7fea42-15c8-4b6b-b18c-4d940b2656a5/2018-castiltierra-ii.pdf>>
- Charles Q. Choi *Scans of Viking Swords Reveal a Slice of Norse Culture*, April 12, 2017
<<https://www.livescience.com/58654-viking-sword-scans-reveal-norse-culture.html>>
- Ewart Oakeshott, *Records of the medieval sword*, 1991 ISBN 085115539
<<http://www.knifehelp.net/Media/docs/Oakeshott%20Ewart%20%20Records%20of%20the%20Medieval%20Sword.pdf>>
- Iris Baena Jiménez *Vikingos. La importancia de las espadas en la sociedad escandinava*, Universidad de Barcelona , Trabajo de Final de Grado , pág. 32
<http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/109855/1/TFG_Baena%20Jimenez_Iris.pdf>
- Dr. Jan Greve Thaulow Petersen , *the norwegian viking swords* translated by Kristin Noer
<<http://www.vikingsword.com/petersen/ptsn054.html#anchor294927>>
<<http://www.vikingsword.com/petersen/>>
- Jeffrey Wadsworth , *Archeometallurgy related to swords, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH 43201, US, 2014*
<[http://refhub.elsevier.com/S1044-5803\(14\)00321-0/rf0075izona](http://refhub.elsevier.com/S1044-5803(14)00321-0/rf0075izona)>
- José María Berasategui Liuzeaga, José Antonio Crespo Francés y Genaro Rosado Galdós. *Identificación de una espada jineta de guerra*
<https://www.culturana Navarra.es/uploads/files/04_TAN18_Berasategui-Crespo-Gos-Irasategui-Crespo-Ros_WEB.pdf>
- José Manuel Jiménez, Daniel Arias, Esther Bravo, Juan Antonio Martínez y Antonio J. Criado *Modelos para la datación de hierros y aceros antiguos aplicados a la Tizona*
<https://www.researchgate.net/publication/250312459_Modelos_para_la_datacion_de_hierros_y_aceros_antiguos_aplicados_a_Tizona/download>
- Margot Gil Melitón, José Luis Lerma García, *Patrimonio histórico militar: digitalización 3d de la espada nazarí atribuida a Ali Atar*
<<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6771422>>

VALORACION DE LA ACEPTABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE ACERO FUERA DE TOLERANCIAS

CN (CIA) D. PEDRO ANTONIO CASAS ALCAIDE

Doctor Ingeniero Naval por la UPM

Resumen.- Este documento se basa en algunos desarrollos efectuados por el autor en relación con la aceptabilidad de estructuras de acero fuera de tolerancias, presentándose el concepto de superficie límite de fallo en combinación con el método de los elementos finitos así como tres criterios alternativos derivados al efecto mediante la aplicación de herramientas de tipo estadístico.

1. Introducción

Ocurre a menudo durante la construcción de estructuras de acero que, por diferentes motivos, el valor de ciertos parámetros de control (dimensionales, propiedades mecánicas, etc.) acaba por salirse de las tolerancias fijadas al efecto, y una vez en estas circunstancias, cabe preguntarse si la estructura es aceptable tal cual está o no. Antes de seguir conviene aclarar que, en este trabajo, no se considerará la posibilidad de aceptar estructuras mermadas funcionalmente, o dicho de otro modo, que una estructura fuera de tolerancias será aceptable únicamente si cumple su función de la misma forma que lo haría la estructura dentro de tolerancias.

Por otro lado, el método de los elementos finitos (MEF) es una de las herramientas numéricas más usadas actualmente para caracterizar la capacidad resistente de una estructura, consistiendo esencialmente en un conjunto de técnicas para reducir a una cantidad finita el número de grados de libertad del problema y pasar así de un sistema diferencial a otro puramente algebraico (ver cualquier tratado sobre el tema para profundizar en los detalles).

En tercer lugar, conviene darse cuenta de que:

- La validez de cualquier estructura pasa en realidad por reducir a un valor aceptable la probabilidad de que falle cuando se somete a las cargas para las que fue diseñada
- La probabilidad de que falle coincide con la probabilidad de que su capacidad resistente sea inferior al valor de la sollicitación aplicada.

Nótese que esto es así independientemente del formalismo que adopte el código de diseño/dimensionamiento utilizado: por ejemplo, el hecho de aplicar un coeficiente de seguridad aparentemente determinista no impide que detrás haya un trasfondo probabilístico, aunque este no sea visible para el usuario.

A la vista de lo anterior, el trabajo se ha estructurado en dos grandes bloques:

- Presentación del concepto de superficie límite de fallo y de su obtención aplicando el MEF.
- Establecimiento de tres criterios de aceptabilidad alternativos, aplicando al efecto herramientas estadísticas.

Se finaliza el documento con el desarrollo de un ejemplo numérico sencillo (en relación con el criterio de aceptabilidad descrito en el punto 3.3) así como con algunas reflexiones sobre coeficientes de seguridad parciales.

Tabla 1.- Nomenclatura

x_i	Variable aleatoria i-ésima (con las dimensiones que correspondan)
y	Solicitud aplicada (con las dimensiones que correspondan)
N	Número de variables aleatorias de diseño
M	Número de variables aleatorias para la estructura fuera de tolerancias
K	Factor de modelado
P	Probabilidad de fallo de la estructura
C	Coefficiente de seguridad
S	Coefficiente de dispersión
Subíndice 0	Denota valor medio de una variable aleatoria
Subíndice F	Denota punto de fallo de la estructura
Subíndice D	Denota condición de diseño dentro de tolerancias
Subíndice T	Denota condición anormal fuera de tolerancias
Subíndice R	Denota valor usado como referencia
Subíndice L	Denota límite de aceptabilidad de una estructura
Subíndice α	Denota incertidumbres de cálculo
Subíndice β	Denota incertidumbres de construcción
Mayúscula	Cantidad NO DIMENSIONAL
Minúscula	Cantidad con DIMENSIONES FISICAS

Antes de seguir, conviene indicar que el ámbito de este trabajo se limita a estructuras:

- En fase de diseño/construcción y, por tanto, que todavía no han sido sometidas a pruebas de carga
- En las que sea posible definir su fallo mediante una sola superficie límite y cuyo esquema de solicitaciones pueda hacerse depender de un solo valor escalar
- Que soportan cargas estáticas y de naturaleza puramente determinista (esto último reduce la parte probabilística al estudio de la capacidad resistente)

Aunque el análisis en profundidad de todos los temas arriba indicados presenta gran interés en la práctica, plantea inevitablemente una problemática extensa cuyo tratamiento se deja para mejor ocasión.

2. Superficie límite de fallo

La capacidad resistente de cualquier estructura depende de una serie de parámetros dimensionales (más o menos extensa según sea la geometría de la misma) y de las propiedades mecánicas del acero (más o menos numerosas según el detalle con que se defina el modelo de deformación/rotura del material).

Por tanto, la superficie límite de fallo de una estructura puede definirse (despreciando la existencia de tensiones residuales y fenómenos de histéresis) como la función que relaciona todos los factores arriba citados con el valor de la sollicitación que es necesario aplicar para alcanzar el fallo.

$$y_F = Kf(x_1 \dots x_N) \quad (2.1)$$

Nótese que la expresión anterior incluye un factor K para tener en cuenta el hecho de que las herramientas de modelado disponibles arrojan normalmente resultados distintos a los encontrados en las estructuras realmente construidas.

En este trabajo, la función f se determinará mediante el procedimiento siguiente: se halla el valor de la sollicitación al fallo aplicando el MEF a una serie más o menos amplia de casos de estudio (combinaciones de valores de las variables independientes) y, a continuación, se establece la superficie de ajuste correspondiente mediante alguna de las técnicas usuales: mínimos cuadrados, etc.

Una vez en este punto, el paso al ámbito probabilístico resulta inmediato, pues para ello no hay más que considerar las variables situadas a la derecha de la expresión 2.1 (incluyendo K) como variables aleatorias.

En la superficie de fallo arriba presentada se han tenido en cuenta todas las variables aleatorias que intervienen en el diseño de la estructura (N), pero en la estructura fuera de tolerancias el número de variables aleatorias se reducirá a un valor inferior (M), dado que muchas de dichas variables dejarán de ser aleatorias al haberse medido su valor en obra (nótese que no todos los valores medidos se encontrarán fuera de tolerancias).

Conviene resaltar que la función f será la misma tanto en la condición de diseño como en la condición anormal fuera de tolerancias (lo único que cambia es la naturaleza aleatoria/determinista de algunas de las variables) y que el factor de modelado K mantiene su naturaleza aleatoria tanto en el análisis de diseño como en el análisis concreto que se haga para la estructura fuera de tolerancias.

El carácter aleatorio de esta última variable (K) es lo que permite tener en cuenta las incertidumbres asociadas al método de cálculo usado (en este caso el MEF), siguiendo la estimación de su distribución de probabilidades un proceso totalmente análogo al usado en el resto de variables aleatorias: inferencia estadística a partir de bases de datos experimentales (se fabrican las estructuras necesarias para cubrir adecuadamente el rango de configuraciones seleccionado, se usa el MEF para estimar las sollicitaciones al fallo de todas ellas y finalmente se comparan estos valores con los obtenidos al efectuar las pruebas correspondientes).

A continuación, y únicamente al objeto de facilitar los desarrollos del resto del documento, se transformará la expresión 2.1 en otra más conveniente. Para ello, simplemente se tomará cada variable aleatoria como la suma de su valor medio y de un valor incremental, lo que permite llegar a lo siguiente:

$$y_F = K_0 \left(1 + \frac{\Delta K}{K_0} \right) f \left(x_{10} \left(1 + \frac{\Delta x_1}{x_{10}} \right) \dots x_{N0} \left(1 + \frac{\Delta x_N}{x_{N0}} \right) \right) \quad (2.2)$$

Nótese que:

- Ahora se dispone de una colección de variables aleatoria incrementales (los cocientes incluidos en el segundo miembro), cada una de las cuales tiene un valor medio exactamente igual a cero.
- Igualando a cero todas y cada una de las variables aleatorias incrementales arriba citadas se obtiene la expresión 2.1 particularizada para los valores medios de las variables aleatorias originales.

Obsérvese también que, al haber conferido un carácter no dimensional a las variables aleatorias incrementales, es de esperar que sus distribuciones de probabilidad cambien poco al pasar de un caso de estudio a otro (en este trabajo se supondrá que dichas distribuciones de probabilidad se mantienen invariables, al menos dentro de los límites correspondientes al proceso de ajuste usado para determinar f).

3. Criterios de aceptabilidad

Una vez conocidas las distribuciones de probabilidad de las $N+1$ variables aleatorias incrementales arriba citadas, resulta posible usar el método de MONTECARLO (ver por ejemplo referencia [2]) para hallar la distribución de probabilidades de y_f .

A partir de la distribución de probabilidades de y_f , resulta inmediato establecer la probabilidad de fallo de la estructura (en su condición de diseño) para un valor dado de la sollicitación aplicada, y una vez en este punto, siempre será posible aproximar esta última probabilidad (con más o menos sesgo) mediante la formulación presentada en la referencia [1], lo que conduce al siguiente resultado:

$$P_D = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C_D} \frac{y}{y_R} \right)^{1/S_D} \quad (3.1)$$

En donde:

- El valor de los coeficientes de seguridad (C_D) y de dispersión (S_D) se establecerá tratando de conseguir el mejor ajuste posible, una vez más mediante alguna de las técnicas usuales (mínimos cuadrados, etc.)
- La constante y_R es un valor de referencia en principio arbitrario, aunque lo usual es que se haga coincidir con el valor de la sollicitación máxima de servicio.

En la figura 1 puede verse (a modo de ejemplo) el grado de ajuste esperable entre una distribución de tipo normal (GAUSS) y una expresión de tipo potencial como la 3.1.

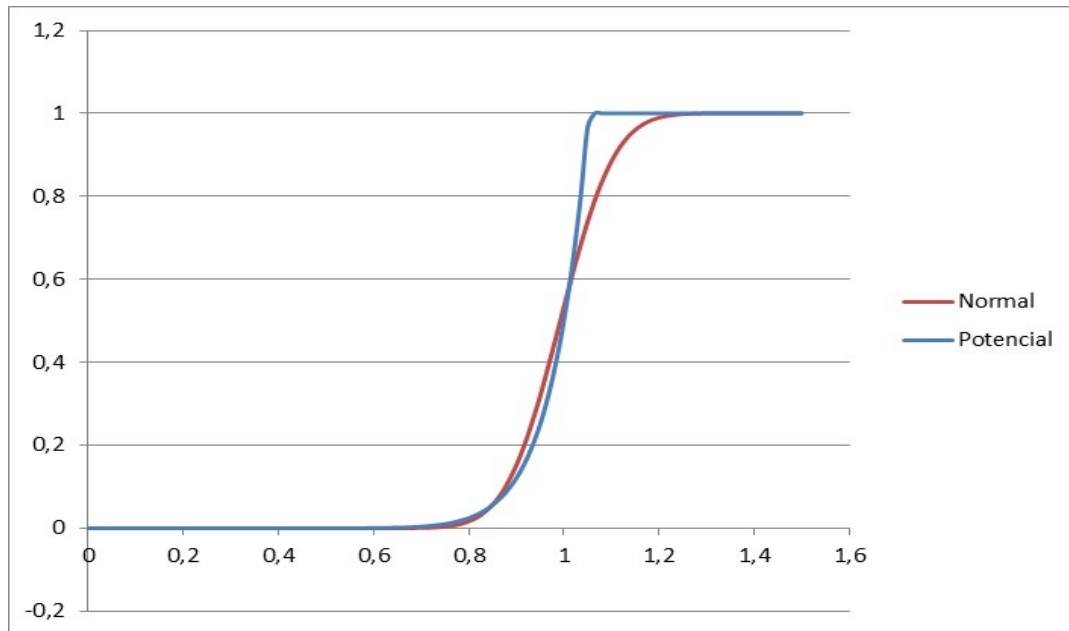


Figura 1.- Gráfica comparativa para ilustrar el grado de ajuste obtenible entre una distribución de probabilidades de tipo normal y otra derivada por truncamiento de la expresión de tipo potencial 3.1.

Repitiendo el proceso descrito para la estructura fuera de tolerancias se llega a una expresión totalmente análoga a la anterior:

$$P_T = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C_T} \frac{y}{y_R} \right)^{1/S_T} \quad (3.2)$$

Conviene recordar que las variables aleatorias consideradas en este caso son las mismas que en el caso anterior excepto las medidas en obra, que adoptan ahora un valor perfectamente determinado.

Nótese que:

- Al reducir el número de variables aleatorias ($N > M$), es de esperar una disminución en el nivel de dispersión (es decir, que $S_D > S_T$)
- Al estar la estructura fuera de tolerancias, algunos de los valores de las variables medidas podrían quedar sensiblemente alejados de sus valores medios como variables aleatorias, por lo que es de esperar una disminución en la capacidad resistente de la estructura (es decir, que $C_D > C_T$)

Esto último implica asumir que las desviaciones que han llevado a la estructura fuera de tolerancias únicamente reducirán la capacidad resistente de la estructura diseñada inicialmente, lo cual podría no ser cierto en todos los casos.

3.1.- Aceptabilidad de tipo absoluto

Fijando un valor límite para la probabilidad de fallo de la estructura es posible plantear la siguiente desigualdad:

$$P_L > \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C_T} \right)^{1/S_T} \quad (3.3)$$

En donde y/y_R se ha tomado igual a uno (es decir, que únicamente se analizará la aceptabilidad de la estructura para el valor de la sollicitación máxima de servicio).

El criterio de aceptabilidad constituido por la expresión 3.3 es el más directo de todos, pero tiene la desventaja de que necesita asignar un valor concreto a la probabilidad de fallo máxima admisible.

3.2.- Aceptabilidad en base a un argumento comparativo

Para eliminar la desventaja arriba citada, se usará como criterio de aceptabilidad que la probabilidad de fallo (para el valor de la sollicitación máxima de servicio) de la estructura fuera de tolerancias sea menor que la de la estructura diseñada inicialmente, lo que conduce a la siguiente desigualdad:

$$1 < C_T \left(\frac{1}{C_D} \right)^{S_T/S_D} \quad (3.4)$$

Nótese que dados unos valores determinados de los coeficientes de dispersión, esta última expresión fija un valor mínimo admisible para el coeficiente de seguridad de la estructura fuera de tolerancias.

3.3.- Aceptabilidad en base a correlaciones estadísticas entre M/N y S_T/S_D

En el límite de la aceptabilidad de la estructura fuera de tolerancias (es decir, cuando el coeficiente de seguridad de dicha estructura alcanza el valor mínimo admisible arriba citado), la desigualdad 3.4 se transforma en la siguiente ecuación:

$$C_{TL} = (C_D)^{S_T/S_D} \quad (3.5)$$

Obsérvese que sea cual sea el valor de C_D , de la igualdad 3.5 se deduce que conforme disminuya el valor de la relación S_T/S_D , el valor del coeficiente C_{TL} tenderá a la unidad, y por tanto, menor será el margen de capacidad resistente exigible a la estructura fuera de tolerancias.

Si se dispusiese de una base de datos lo suficientemente amplia, sería posible establecer una correlación estadística entre el valor de los cocientes M/N y S_T/S_D . Teniendo en cuenta que este último cociente será necesariamente igual a uno cuando el primero (M/N) adopte dicho valor, y asumiendo una correlación potencial entre ambos, es inmediato transformar la expresión 3.5 en esta otra:

$$C_{TL} = (C_D)^{Q+(1-Q)(M/N)^X} \quad (3.6)$$

En donde las constantes no dimensionales X y Q se fijarían mediante alguno de los métodos de ajuste usuales.

Se incluye al final del documento (ver anexo A) un ejercicio de comparación entre la expresión 3.6 y otra derivada a partir de una versión simplificada de los métodos de primer orden que aparecen en la referencia [3].

Una vez en este punto, conviene hacer notar que el producto C_{TYR} coincide con el valor de la sollicitación para el que la probabilidad de fallo de la estructura fuera de tolerancias alcanza exactamente el 50%. Por tanto, es razonable suponer (al menos en una primera aproximación) que el valor de dicho producto se encuentre muy cerca del valor de y_F calculado según la expresión 2.2 cuando en esta última se igualan a cero las variables aleatorias incrementales que quedan tras determinar el valor de las medidas en obra.

A la vista de lo anterior, resulta inmediato transformar la expresión 3.6 en esta otra forma equivalente:

$$\frac{y_{FTL}}{y_R} = (C_D)^{Q+(1-Q)(M/N)^X} \quad (3.7)$$

En donde el miembro de la izquierda sería el cociente de la sollicitación mínima admisible al fallo de la estructura fuera de tolerancias y la máxima de servicio.

Por último, cabe mencionar dos temas importantes.

El primero se refiere al hecho de que, en la práctica, puede ser difícil encontrar un valor adecuado para el cociente M/N , y si este fuera el caso, se recomienda tomar un valor igual a la unidad y pasar directamente a un escenario conservador en el que no se admitiría reducción alguna respecto de la capacidad resistente de la estructura en su condición de diseño inicial.

El segundo tema se refiere al hecho de que igualando el cociente M/N a la unidad, se puede reescribir la ecuación 3.6 del siguiente modo:

$$C_D = (C_D)^Q (C_D)^{1-Q} \quad (3.8)$$

Y teniendo en cuenta el significado del primero de los dos multiplicandos situados en el segundo miembro (coeficiente de seguridad mínimo admisible para una estructura cuando la única variable aleatoria es el factor de modelado), de la expresión 3.8 se podría colegir directamente un valor para los coeficientes de seguridad frente a las incertidumbres de cálculo así como frente a las incertidumbres de construcción:

$$C_\alpha = (C_D)^Q \quad (3.9)$$

$$C_\beta = (C_D)^{1-Q} \quad (3.10)$$

4. Coeficientes de seguridad parciales

La expresión 3.5 constituye una vía metódica y rigurosa (capaz de garantizar una probabilidad de fallo en todo momento exactamente igual al valor fijado como objetivo) para establecer coeficientes de seguridad parciales para cualquier combinación de variables aleatorias que se desee, incluyendo el caso extremo de fijar uno por cada una de las $N+1$ variables aleatorias no dimensionales incluidas en la expresión 2.2.

La vía arriba citada no es la única posible para establecer coeficientes de seguridad, y en este sentido, otra alternativa pasaría por hacerlo en base a la siguiente expresión:

$$C_D = (C_D)^\alpha \prod_{i=1}^N (C_D)^{\beta_i} \quad (4.1)$$

En donde:

- La suma de los $N+1$ exponentes (constantes no dimensionales) debe ser igual a la unidad.
- Cada uno de los exponentes representará exclusivamente la contribución de la variable aleatoria asignada al mismo.

Esta forma de proceder permite una conexión sencilla entre el ámbito probabilístico y el formalismo que exhiben algunos códigos de diseño estructural, en los que se recurre al uso de productos de coeficientes de seguridad para establecer un margen adecuado frente a las incertidumbres identificadas. Un ejemplo típico de lo anterior sería el que se describe al final del punto 3, pudiendo reescribirse ahora los coeficientes de seguridad para las incertidumbres de cálculo y construcción del siguiente modo:

$$C_\alpha = (C_D)^\alpha \quad (4.2)$$

$$C_\beta = \prod_{i=1}^N (C_D)^{\beta_i} \quad (4.3)$$

Sin embargo, hay un detalle importante a tener en cuenta si se usa este enfoque: el autor no conoce ningún procedimiento de validez general para determinar los exponentes incluidos en la expresión 4.1 de manera que la probabilidad de fallo asociada a todos y cada uno de los coeficientes de seguridad parciales implícitos en dicha expresión mantenga un valor exactamente constante.

Por tanto, no quedará más remedio que usar al efecto algún método de ajuste (o si se prefiere, de optimización) que permita situar las probabilidades arriba citadas lo más cerca posible del valor fijado como objetivo de diseño, y esto abre la puerta a la posibilidad de tener dificultades a nivel práctico, ya que los valores óptimos finalmente alcanzados podrían quedar sensiblemente lejos del objetivo fijado.

Es interesante observar que las dificultades mencionadas en el párrafo anterior pueden:

- Presentarse incluso sin alterar los valores medios que aparecen en la expresión 2.2 conforme las variables aleatorias vayan siendo medidas en obra.
- Eliminarse por completo sin más que fijar el orden en el que las diferentes variables aleatorias deberán ser medidas en obra (ver anexo B).

5. Ejemplo numérico

Se desea analizar el casco resistente de un submarino tomando el colapso hidrostático como modo de fallo relevante y usando como datos de entrada los siguientes:

- Cota máxima operativa (y_R): 300 metros

- Valor de las constantes X y Q : 1 y 0,65 respectivamente
- Coeficiente de seguridad de diseño (C_D): 1,5
- Valor medio del factor de modelado (K_0): 0,98

En base a la expresión 3.1, la cota de colapso (de diseño) sería de 450 metros, y según las ecuaciones 3.9 y 3.10, los coeficientes de seguridad (de diseño) frente a las incertidumbres de cálculo y construcción serían iguales a 1,3 y 1,15 respectivamente.

Si en un momento dado del proceso de construcción el número de variables medidas en obra fuese:

- Un 20% del total de variables aleatorias de diseño, el cociente M/N adoptaría un valor igual a 0,8 y de la expresión 3.7 se obtendría una cota de colapso mínima admisible igual a 437 metros.
- Un 50% del total de variables aleatorias de diseño, el cociente M/N adoptaría un valor igual a 0,5 y de la expresión 3.7 se obtendría una cota de colapso mínima admisible igual a 419 metros.

Esto último significa que si alguna de las variables medidas se encontrase fuera de tolerancias y se hiciese un cálculo (usando el MEF) para valorar el estado de la estructura, el criterio de aceptabilidad sería que la cota de colapso calculada fuese superior a 446 ($437/K_0$) metros en el primer caso y 428 ($419/K_0$) en el segundo, lo cual pone de manifiesto un hecho importante: al margen de que puedan encontrarse o no fuera de tolerancias, cuantas más variables se hayan medido en obra (es decir, cuanto menor sea la incertidumbre existente), menos restrictivo será el nivel de capacidad resistente exigible a la estructura.

Respecto al uso directo del MEF para llevar a cabo cálculos justificativos como el arriba indicado, conviene aclarar un tema cuyas implicaciones quizá no resulten evidentes al lector: en este trabajo, el MEF se ha usado exclusivamente para establecer una función f de tipo analítico como base para calcular la sollicitación al fallo (y_F), lo cual introduce un error debido específicamente al proceso de ajuste necesario para establecer dicha función que no se ha tenido en cuenta y que, en un sentido estricto, obligaría a reescribir la ecuación 2.1 del siguiente modo:

$$y_F = K_A K f(x_1 \dots x_N) \quad (5.1)$$

En donde la variable aleatoria K_A vendría a cubrir el efecto de los errores asociados al proceso de ajuste arriba citado.

En este documento se ha tomado K_A igual a uno, ya que el error introducido al usar una función de ajuste en lugar de un cálculo directo con el MEF podrá reducirse a un valor despreciable tanto más fácilmente cuanto más cerca del diseño inicial estén los casos de estudio empleados para determinar dicha función (nótese que el objetivo aquí es valorar estructuras fuera de tolerancias y no comparar casos de diseño esencialmente distintos).

6. Conclusiones y comentarios finales

En este documento se ha presentado el concepto de superficie límite de fallo, la forma de calcularlo mediante el MEF y, a partir de lo anterior, una serie de criterios para valorar la aceptabilidad de una estructura de acero fuera de tolerancias:

- De tipo absoluto, usando un valor determinado para la probabilidad de fallo máxima admisible (ver expresión 3.3)
- De tipo comparativo, aceptando como válida una estructura cuando su probabilidad de fallo sea menor que la del diseño inicial (ver expresión 3.4)
- De tipo comparativo, pero usando al efecto correlaciones estadísticas efectuadas entre los cocientes M/N y S_T/S_D (ver expresión 3.6)

A partir de este último criterio, se ha llevado a cabo un ejemplo numérico sencillo para ilustrar el efecto que produce la reducción de las incertidumbres existentes en el nivel de capacidad resistente mínimo exigible a una estructura fuera de tolerancias.

También se ha presentado una breve discusión sobre coeficientes de seguridad parciales, en especial sobre la posibilidad de obtenerlos como productos de factores totalmente independientes (ver expresión 4.1).

Por otro lado, se hace notar la existencia de algunos temas importantes sobre los que convendría investigar en trabajos futuros:

- Cambios inducidos, al modificar el punto de diseño, en las distribuciones de probabilidad asociadas a las variables aleatorias no dimensionales que aparecen en la expresión 2.2
- Definición de las tolerancias asociadas a todas y cada una de las variables aleatorias incluidas en la expresión 2.1, exceptuando evidentemente el factor de modelado
- Error introducido al usar la formulación de la referencia [1] para aproximar la probabilidad de fallo de la estructura como función de la sollicitación aplicada.

En relación con esto último, cabe esperar que la influencia del error arriba citado sea poco relevante en los resultados obtenidos al aplicar criterios de naturaleza comparativa como los presentados en los puntos 3.2 y 3.3 (ver anexo A para una confirmación preliminar en este sentido).

7. Referencias bibliográficas

[1] Casas P.A., 2017, Consideraciones SAFETY sobre resistencia a choque de submarinos en inmersión, *Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada n°12*.

[2] Raychaudhuri S., 2008, Introduction to Monte Carlo simulation, *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*.

[3] Morandi A.C., 1994, Computer aided reliability based design of ring-stiffened cylindrical shells under external pressure, *PhD thesis (University of Glasgow)*.

ANEXOS

A.- Utilidad práctica de la expresión 3.6

En este anexo se va a establecer una valoración preliminar de la utilidad práctica que presenta la expresión 3.6 comparándola con otra derivada a partir de una versión simplificada de los métodos de primer orden que aparecen en la referencia [3].

Para ello, se considerará el caso sencillo de un tanque esférico sometido a presión interior, lo que permite acudir en una primera aproximación (y tomando la entrada en régimen plástico como modo de fallo relevante) a la superficie límite de fallo siguiente:

$$y_F = K \frac{4tl}{d} \quad (\text{A.1})$$

En donde y_F sería la presión de fallo, K sería el factor de modelado, d sería el diámetro interno, t sería el espesor y la variable l sería el límite elástico del material.

A.1.- Probabilidad de fallo del tanque

Seleccionando un punto de diseño concreto y hallando la expansión en serie de la expresión anterior respecto al mismo, se obtiene lo siguiente:

$$y_F = \frac{4K_0 t_0 l_0}{d_0} + \frac{4t_0 l_0}{d_0} \Delta K + \frac{4K_0 l_0}{d_0} \Delta t + \frac{4K_0 t_0}{d_0} \Delta l - \frac{4K_0 t_0 l_0}{d_0^2} \Delta d \quad (\text{A.2})$$

Y dotando de carácter no dimensional a esta última expresión dividiendo las variables incrementales por los valores en el punto de diseño, es fácil transformarla de la manera siguiente:

$$y_F = y_{F0} \left(1 + \frac{\Delta K}{K_0} + \frac{\Delta t}{t_0} + \frac{\Delta l}{l_0} - \frac{\Delta d}{d_0} \right) \quad (\text{A.3})$$

En donde y_{F0} vendría definido por la siguiente ecuación:

$$y_{F0} = \frac{4K_0 t_0 l_0}{d_0} \quad (\text{A.4})$$

Las variables incrementales no dimensionales de la expresión A.3 coinciden con las de la expresión 2.2, pudiendo considerarse variables aleatorias de valor medio igual a cero. Si a cada una de estas cuatro últimas variables aleatorias se le asocia una distribución de probabilidades de tipo normal, la variable aleatoria y_F también resultaría normal, con un valor medio igual a y_{F0} y una desviación típica definida por la ecuación siguiente:

$$\Omega_y = y_{F0} \Omega \quad (\text{A.5})$$

En donde Ω vendría definido tal y como sigue (cada subíndice denota directamente la variable aleatoria cuya desviación típica se está referenciando):

$$\Omega = (\Omega_K^2 + \Omega_t^2 + \Omega_l^2 + \Omega_d^2)^{1/2} \quad (\text{A.6})$$

Así pues, llamando G a la distribución normal estándar (de media cero y desviación típica unitaria), la probabilidad de fallo del tanque para cualquier valor de la presión interior sería la siguiente:

$$P = G\left(\frac{y - y_{F0}}{y_{F0}\Omega}\right) \quad (\text{A.7})$$

Mediante una manipulación algebraica muy sencilla, esta última expresión puede transformarse en la que sigue:

$$P = G\left(\frac{y/y_{F0} - 1}{\Omega}\right) \quad (\text{A.8})$$

Y recordando ahora lo dicho en el punto 3.3 sobre el valor de la sollicitación para el que la probabilidad de fallo se iguala exactamente al 50%, es fácil llegar al siguiente resultado:

$$P = G\left(\frac{1/C - 1}{\Omega}\right) \quad (\text{A.9})$$

En donde una vez más se ha tomado y/y_R igual a uno (es decir, que se ha considerado el tanque sometido únicamente a la presión máxima de servicio).

Esta última igualdad resultará tanto más aceptable cuanto más pequeña sea la desviación típica de las variables incluidas en la expresión A.3, residiendo su interés en que permite relacionar la probabilidad de fallo con el coeficiente de seguridad del tanque mediante una formulación puramente analítica (tal y como ocurre con la ecuación 3.1).

A.2.- Coeficientes de seguridad parciales

Repitiendo la línea de razonamiento del punto A.1 para cualquier combinación de variables aleatorias que se desee, es muy fácil llegar al resultado siguiente:

$$P = G\left(\frac{1/C_\delta - 1}{\Omega_\delta}\right) \quad (\text{A.10})$$

En donde Ω_δ se define tal y como sigue:

$$\Omega_\delta = (\delta_K \Omega_K^2 + \delta_t \Omega_t^2 + \delta_l \Omega_l^2 + \delta_d \Omega_d^2)^{1/2} \quad (\text{A.11})$$

Nótese que cada una de las cuatro deltas minúsculas arriba indicadas constituye una variable binaria que tomará un valor igual a uno o cero según aparezca o no la correspondiente variable aleatoria en la combinación considerada.

Igualando ahora las expresiones A.9 y A.10 puede llegarse al siguiente resultado:

$$\frac{1/C - 1}{\Omega} = \frac{1/C_\delta - 1}{\Omega_\delta} \quad (\text{A.12})$$

Y mediante una manipulación algebraica sencilla de esta última igualdad, es fácil establecer finalmente una expresión para el coeficiente de seguridad parcial correspondiente a cualquier combinación de variables aleatorias:

$$C_{\delta} = \frac{1}{1 + (1/C - 1) \Omega_{\delta}/\Omega} \quad (\text{A.13})$$

Recuérdese que esta última expresión permite obtener coeficientes de seguridad con una probabilidad de fallo asociada exactamente igual al valor que se haya fijado como objetivo de diseño.

A.3.- Resultados obtenidos

Asumiendo aproximadamente iguales las desviaciones típicas de todas las variables aleatorias excepto la correspondiente al factor de modelado, la expresión A.13 podría transformarse del modo siguiente:

$$C_{\delta} = \frac{1}{1 + (1/C - 1)[A + (1 - A) M/N]^{1/2}} \quad (\text{A.14})$$

En donde A sería una constante no dimensional.

Y adoptando la nomenclatura usada en la expresión anterior, la 3.6 quedaría tal y como sigue:

$$C_{\delta} = (C)^{Q+(1-Q)(M/N)^X} \quad (\text{A.15})$$

Una vez en este punto, puede verse mediante simulaciones numéricas que alcanzar un ajuste satisfactorio entre las dos últimas expresiones:

- Resulta sencillo para valores bajos de C ($C \leq 4$).
- Se va haciendo cada vez más complicado según aumenta el valor de C .

Con los datos arriba presentados cabe adelantar una primera conclusión: que la expresión 3.6 resultará de utilidad al menos en aquellos casos en donde la expresión A.14 sea válida y los valores de C no superen el límite arriba indicado.

Por otro lado, se llama la atención sobre el hecho de que manteniendo constante el término entre corchetes, la expresión A.14 llevará a valores de C_{δ} tendiendo asintóticamente hacia un máximo finito conforme C crezca indefinidamente, lo cual se explica con facilidad observando que la igualdad A.9 exige un valor de la probabilidad de fallo no nulo por muy grande que se haga C .

Esto justifica el comportamiento encontrado en las simulaciones numéricas y lleva a plantear la posibilidad de que la expresión A.15 sea más adecuada que la A.14 para valores altos de C .

En este sentido, cabe esperar que la expresión 3.6 funcione bien para valores altos de C cuando la probabilidad de fallo se anule a la vez que lo hace la sollicitación aplicada (algo imposible con distribuciones de tipo normal como la A.8).

B.- Utilidad práctica de la expresión 4.1

Las dificultades mencionadas al final del punto 4 tienen una solución muy sencilla, la cual pasa por planificar en detalle la secuencia con la que las diferentes variables aleatorias serán medidas en obra.

Lo anterior elimina la necesidad de llevar a cabo ningún tipo de optimización y permite, por tanto, alcanzar una probabilidad de fallo (para cada coeficiente de seguridad parcial) exactamente igual al valor fijado como objetivo de diseño, asegurando así la validez de la expresión 4.1 al menos en algunas situaciones de interés práctico.

Para ilustrar lo arriba indicado con un ejemplo sencillo, se tomará el caso presentado en el anexo A, definiéndose para el mismo la siguiente secuencia de mediciones:

- El límite elástico del material se medirá mediante ensayos con probetas justo al inicio de la construcción del tanque
- El espesor y el diámetro se medirán ambos justo al finalizar la construcción del tanque

Una vez que el límite elástico se determina (y deja de ser una variable aleatoria), la ecuación A.13 adoptará la forma siguiente:

$$C_1 = \left(1 + (1/C - 1) \sqrt{\frac{\Omega_K^2 + \Omega_t^2 + \Omega_d^2}{\Omega^2}} \right)^{-1} \quad (\text{B.1})$$

Y mediante un proceso de ajuste similar al descrito al inicio del punto 3, la expresión anterior podrá aproximarse mediante esta otra:

$$C_1 = (C)^{X_1} \quad (\text{B.2})$$

En donde el exponente será, evidentemente, una constante no dimensional

Fijando ahora el valor del espesor y del diámetro a partir de las mediciones efectuadas al final de la construcción, es inmediato repetir lo que se acaba de hacer para llegar a los dos resultados siguientes:

$$C_2 = \left(1 + (1/C - 1) \frac{\Omega_K}{\Omega} \right)^{-1} \quad (\text{B.3})$$

$$C_2 = (C)^{X_2} \quad (\text{B.4})$$

Una vez en este punto, y dada la sencillez del ejemplo considerado, mediante simple inspección de la estructura de la ecuación 4.1 es fácil obtener la expresión siguiente:

$$C = (C)^{X_2} (C)^{X_1 - X_2} (C)^{1 - X_1} \quad (\text{B.5})$$

En donde el multiplicando situado a la izquierda sería el coeficiente de seguridad asociado a las incertidumbres de cálculo, el del centro sería el coeficiente de seguridad asociado a las incertidumbres dimensionales y el de la derecha sería el correspondiente a las incertidumbres relacionadas con el valor esperado del límite elástico del material.

Nótese que:

- En el caso extremo de fijar un momento de medición específico para cada una de las variables aleatorias, se obtendría un coeficiente parcial de seguridad para cada una de ellas
- Si se cambia la secuencia de mediciones fijada al inicio, también cambiarán los valores de los exponentes que aparecen en la expresión B.5

Al margen de todo lo dicho hasta el momento, si se asume una desviación típica para el factor de modelado claramente superior a la del resto de variables aleatorias, las simulaciones numéricas mencionadas en el anexo A enseñan que es aceptable tomar la constante no dimensional X igual a la unidad y transformar así la expresión A.15 en esta otra:

$$C_{\delta} = (C)^Q (C)^{(1-Q)M/N} \quad (\text{B.6})$$

Esto implica que hay casos donde la expresión 4.1 resultará útil incluso sin necesidad de establecer una secuencia concreta de mediciones (siempre que el factor de modelado conserve su carácter aleatorio), a cambio de lo cual, los coeficientes de seguridad implícitos en dicha expresión deberán asociarse a probabilidades de fallo muy parecidas pero no exactamente iguales.

ASPECTOS EXTERIORES DE BUQUES

CF (CIA) D. LUIS DE LA PUENTE DEL POZO

1. Antecedentes

A lo largo de mi Carrera he encontrado problemas diversos en nuestros buques. En este artículo pretendo presentar algunos relacionados con el casco exterior, evidentemente hay muchos más elementos exteriores que los que yo voy a señalar, me limitaré a comentar algunos para conocimiento, ya que estos elementos son fácilmente visibles y de alguna forma dan imagen de la Armada por lo que conviene conocer estos conceptos.

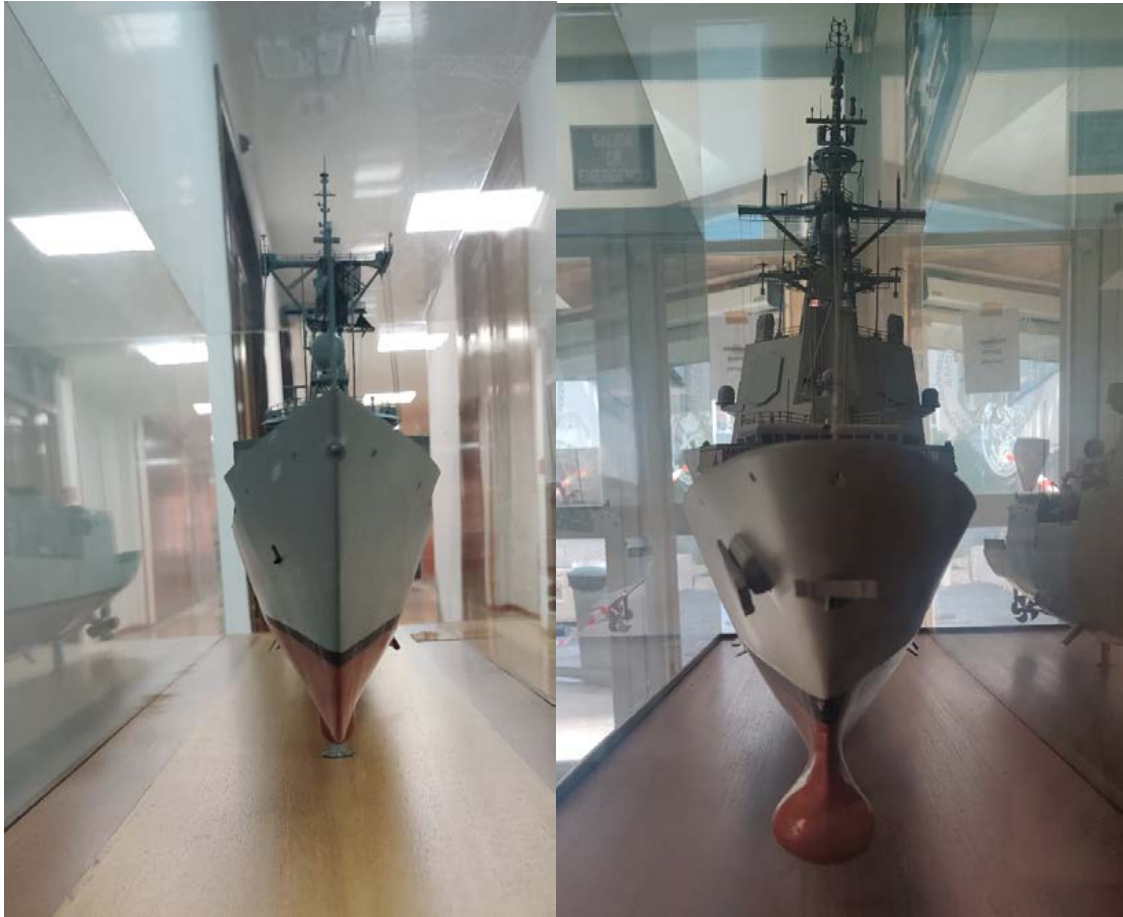
2. Las formas

Las prestaciones propulsivas del buque dependen en gran medida de las formas de la carena. Para mover el buque es necesario superar la resistencia que opone a la propulsión. Esta resistencia del buque depende principalmente de la velocidad, el desplazamiento y las formas del casco.

De entre todas las resistencias la que prevalece a velocidades altas en buques de desplazamiento (sin efecto planeo) es la resistencia por formación de olas, resistencia debida a las olas que genera el buque al perturbar la superficie del agua. Esta resistencia llega a crear una especie de muralla de agua en la proa, de modo que un aumento adicional de potencia de propulsión del buque no dará lugar a una velocidad más alta, ya que toda la energía se convierte en energía de creación de ola.

Al diseñar el buque siempre consideramos una velocidad máxima y una velocidad de crucero o velocidad con la que se logra el mayor alcance, pero las formas se deben diseñar considerando la velocidad máxima debido al problema de la formación de olas.

Este fue el caso por ejemplo de las FFGs. Sin embargo, hoy en día, por temas de movimientos, capacidades de vuelo... se considera también para las formas una mejora en el comportamiento en la mar (Seakeeping) y se utilizan formas con mayores abanicos en las amuradas o con el domo del sonar integrado para disminuir las olas generadas, como fue el caso de las F-100. Esa diferencia de diseño las vemos en las imágenes de ambos tipos de fragata.



Maquetas de fragatas (JAL). Fuente: Autor del artículo

3. El sistema de fondeo

Si observamos la proa de la F-100 en la imagen anterior, vemos que lleva un ancla principal en cruz, que es la que se usa habitualmente para fondear y una segunda ancla a estribor, esto básicamente se debe a que como en el hemisferio norte al empeorar el tiempo el viento rola hacia el sur, si hay que fondear una segunda ancla es mejor que esté a estribor para que haya menos probabilidad de enredarse las cadenas. Sin embargo, si el buque tiene una banda preferida de ataque, por ejemplo, la F-110 que tiene a estribor el espacio multimisión, es preferible poner el ancla en la banda contraria para hacer cabeza sobre ella.

Así mismo en las armadas se emplean maquinillas de levar de eje vertical o cabrestantes, sin embargo, la mayoría de los buques mercantes y algunos militares de origen civil, las llevan de eje horizontal o molinete. Aunque la maniobra con molinete ocupa menos espacio en cubierta, los cabrestantes permiten que la cadena vaya paralela a la cubierta y el correcto trabajo de las bozas de forma que la maniobra de remolque estándar para buques de guerra se ve facilitada.

4. El pintado

La acumulación de capas y el límite de la vida útil de la pintura sobre los buques suponen un deterioro de los recubrimientos, que hacen necesario eliminar las pinturas viejas. El intervalo de varada reglamentaria que

corresponde a cada tipo de buque se define de acuerdo con sus pinturas y tratamientos. Por ello, las varadas se clasifican en varadas con decapado parcial y varadas con decapado total de la obra viva y flotación y de la obra muerta y superestructura. Los decapados totales se realizan cuando han llegado al límite de su vida útil los diversos recubrimientos que se aplicaron en construcción.

La F-101 tenía en 2019 en su obra muerta y superestructura un acabado alquídico siliconado de construcción, al límite de su vida útil y sufría decoloración por la acción solar. Se decidió, entonces, el empleo de pinturas de polixilosano de dos componentes, antes de su aplicación, las zonas fueron chorreadas completamente.

Por su parte el P-64 «*Tarifa*», en construcción fue pintado con pintura de base alquídica la F506-EO (no coincidente con lo prescrito en la PPT), al salir el buque del astillero se le asignó un cupo de pintura de base acrílica e incompatible con la anterior. Así pasó también con la pintura de la numeral. El buque llegó a Vigo para obras de garantía y se le pintaron las numerales nuevamente. Pero debido a la mezcla, las pinturas eran incompatibles y se desprendían. Entre otros problemas, en la foto podemos ver el «gracioso» color rosado que tomó, tras salir a la mar, la numeral del buque, como consecuencia de la incompatibilidad de las pinturas y ante el asombro de su dotación, finalmente se chorreó y pintó todo el buque.



P-64 «*Tarifa*». Fuente: Comandante del patrullero

5. Puertas y escotillas

Las puertas y escotillas son otro elemento tanto interior como exterior del buque que manejamos continuamente a través de cubiertas y superestructura para acceso a los espacios.

Las diferencias entre puertas estancas al agua, al aire, al gas, al aceite o a los rociones estriba básicamente en la calidad de la junta de goma que hace la estanqueidad y sobre todo en la resistencia de la propia puerta, que se puede comprobar mediante en número de trincas que monta.

En los accesos deben estar previstos rutas de escape principales y de emergencia por lo que el estudio e instalación de puertas y escotillas es vital, por ejemplo, la cubierta de vuelo se considera un espacio y debe tener una ruta de acceso y escape principal y de emergencia, de ahí la disposición de un pasillo independiente del hangar y de una escotilla en la esquina contraria de la cubierta.

6. OTROS ELEMENTOS

Hay otros muchos elementos con los que me he «enfrentado» a lo largo de mi vida profesional, me gustaría reseñar.

Tras el DDG-1000 se consideró que era mejor dar visión al puente de gobierno con cámaras y otros elementos electrónicos, pero la práctica impuso nuevamente la instalación de alerones, especialmente tras un accidente de un LCS en el Canal de Panamá. En la imagen siguiente podemos ver dos LCS de la clase «Independence» uno con sus nuevos alerones ya montados y el otro pendiente de la modificación.



Fuente: Página web US NAVY

El trancanil es la chapa más alta del costado, es un elemento resistente del costado y no debe ser modificado. En algunos buques los imbornales de las cubiertas con los años no desaguan correctamente formándose charcos por las deformaciones de las cubiertas. Hay otras soluciones como el trancanil redondeado de las corbetas o las tejas de descarga de los buques americanos en la imagen, pero el diseño del trancanil no debe modificarse sin un análisis previo.



Fuente: Página web US NAVY

Finalmente incidir en que aunque no tan visibles, por facilidad de mantenimiento y limpieza deben reducirse al mínimo las esquinas inaccesibles, los pilares deben ser redondeados y en la medida de lo posible los soportes de las estibas deben ser de tubo o de media caña.

También se ponen medias cañas en algunas descargas al mar aunque no siempre es aconsejable pues hace inaccesible el acceso a esa zona del casco y cáncamos para el pallete anticollisión, resultado de la experiencia de las frecuentes pérdidas de las proa por esfuerzos en buque accidentados o tras una colisión, en las primeras F-100 se montaron dichos cáncamos pero en las últimas se abandonó esta práctica por el uso de palletes magnéticos.



Fuente: Página web US NAVY

FUNDAMENTOS CFD DE APLICACIÓN EN INGENIERÍA II: TURBULENCIA

CC (CIA) D. JULIO MANUEL PERNAS URRUTIA

Doctor Ingeniero Naval y Oceánico

Resumen

La descripción del fenómeno de turbulencia en los fluidos resulta altamente compleja y constituye un problema sin solución desde el punto de vista de los métodos numéricos.

Por lo tanto, habrá que acudir a modelos en base a diferentes aproximaciones, entre los que destacan los de simulación directa (DNS), simulación de grandes vórtices (LES) y promediado temporal de las ecuaciones de gobierno (RANS).

En el presente artículo se realiza una descripción somera de los principales modelos de turbulencia utilizados en la actualidad, basados tanto en métodos de simulación de grandes vórtices LES como de promediado de las ecuaciones RANS.

Al final del artículo se incluyen, a modo de ejemplo, dos simulaciones de turbulencia a partir de la aplicación de modelos de turbulencia LES y RANS, con el fin de facilitar la asimilación de los conceptos aquí planteados.

Introducción

Se define como régimen laminar aquel en el que las capas de fluido se deslizan unas sobre otras como si se tratase de verdaderas láminas fluidas. Es además estacionario, lo que significa que sea cual sea el instante considerado en cada punto del espacio ocupado por el fluido, la velocidad de la partícula que en él se encuentra es la misma, aunque varíe de unos puntos a otros. En consecuencia, el vector velocidad que define el campo en dicho punto es independiente del tiempo, dependiendo únicamente de la posición. ^[1]

Se define como régimen turbulento aquel en el que, en cada punto del espacio ocupado por el fluido, la velocidad de la partícula toma más de un valor a medida que transcurre el tiempo y en su corriente hay formación de torbellinos o remolinos.

En el régimen turbulento, las diferentes variables fluidas (presión, velocidad, etc.) fluctúan de manera desordenada. Se trata de un estado no estacionario desde el punto de vista macroscópico, en el que las variables fluidas adoptan valores dependientes tanto de la posición como del tiempo de un modo aleatorio.

El número de Reynolds (Re) de un flujo dará una medida de la importancia relativa de las fuerzas de inercia, asociadas a efectos convectivos, respecto de las fuerzas viscosas, asociadas a efectos difusivos:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (1)$$

donde V es la velocidad, L es una longitud característica (el diámetro de una tubería o la distancia desde el borde de una placa plana) y ν es la viscosidad cinemática.

La viscosidad cinemática (ν) se encuentra, a su vez, relacionada con la viscosidad dinámica (μ) de la siguiente forma: ^[1]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

En el caso concreto de flujos interiores (tuberías), se puede comprobar que el flujo es laminar si $Re < 2000$. Para valores $2000 < Re < 4000$ el régimen es de transición. Y para valores $Re > 4000$ el flujo es claramente turbulento. A este respecto, se considera una buena aproximación tomar como valor crítico $Re = 2400$ para flujos interiores. ^[1]

Debido a la complejidad de la descripción del fenómeno turbulento, será necesario acudir a métodos y modelos de simulación, entre los que destacan los de simulación directa o DNS (*“Direct Numerical Simulation”*), simulación de grandes vórtices o LES (*“Large Eddy Simulation”*) y promediado temporal de las ecuaciones de gobierno o RANS (*“Reynolds Averaged Navier Stokes”*). ^[2]

El presente artículo se centra en la descripción de los modelos LES y RANS, debido a que la simulación DNS resultará abordable únicamente con problemas simples de interés académico debido, principalmente, a las limitaciones de memoria y tiempos de cálculo que hacen inviable su uso de forma generalizada.

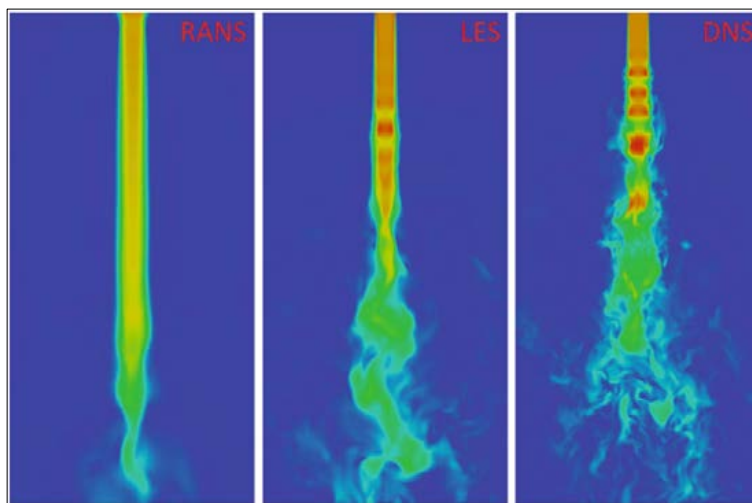


Ilustración 1. Simulación de campos de velocidades con modelos RANS, LES y cálculo DNS ^[3]

1. Concepto de viscosidad turbulenta

A partir de la ecuación del momento con variables promediadas: ^[4]

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (3)$$

surge el término de fluctuación de velocidades denominado “tensiones de Reynolds”:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (4)$$

Dicho término hace que la ecuación de gobierno resulte irresoluble, lo que obligará a reescribirlo con valores medios de variables, proceso conocido como “cierre” de las ecuaciones.

En este sentido, los modelos de viscosidad turbulenta permitirán el cálculo del término de tensiones de Reynolds a partir de la suposición de movimiento “browniano”, de forma análoga al movimiento aleatorio de las partículas de un gas.

Si bien las fluctuaciones del fenómeno turbulento están producidas por torbellinos, y estos presentan un movimiento correlacionado, la suposición browniana para los modelos de viscosidad turbulencia permitirá, en la práctica, obtener resultados numéricos bastante precisos.

En el caso de flujos cortantes próximos a la pared, las partículas lentas más próximas a esta son aceleradas por las más rápidas que se encuentran más alejadas, a partir del intercambio de momentos en la dirección del gradiente de velocidades:

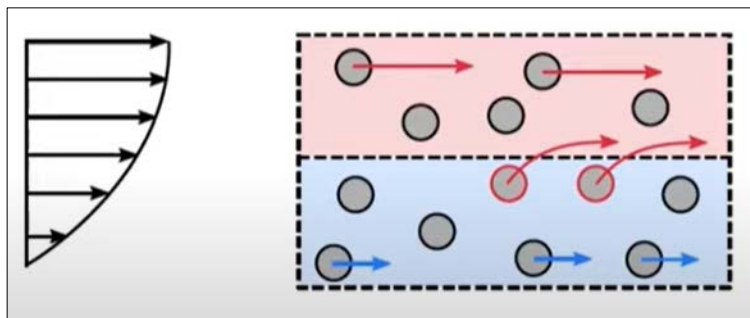


Ilustración 2. Partículas aceleradas a partir de la mayor velocidad del flujo superior ^[5]

Por lo tanto, el término de tensión de Reynolds será proporcional a:

$$-\overline{\rho u'v'} = \mu_t \frac{\partial U}{\partial y} \quad (5)$$

siendo la constante de proporcionalidad μ_t la “viscosidad turbulenta”. Presentado por Boussinesq en 1877, se trata de un artificio que representa la fuerza de “difusión” o colisión entre partículas (intercambio de momentos). Análogamente, para el eje y:

$$-\overline{\rho v'u'} = \mu_t \frac{\partial V}{\partial x} \quad (6)$$

Como $-\overline{\rho u'v'} = -\overline{\rho v'u'}$, la componente tangencial de la tensión resultará:

$$-\overline{\rho u'v'} = \mu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (7)$$

siendo a su vez la componente normal de la tensión igual a:

$$-\overline{\rho u'v'} = 2\mu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) \right) - \frac{1}{3} (2\rho k) \quad (8)$$

donde k es la energía cinética asociada al fenómeno turbulento:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (9)$$

Con el fin de encontrar una única expresión que aglutine las componentes tangencial y normal asociadas al fenómeno turbulento, se introducen ambas componentes en notación tensorial (i, j):

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \quad (11)$$

Las anteriores expresiones se podrán combinar en una gracias a la multiplicación por el operador "delta de kronecker" (δ_{ij}) de los términos extra de la componente normal:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (12)$$

A partir de la parte "desviadora" (S_{ij}^*) del tensor tasa media de gradientes (S_{ij}):

$$S_{ij}^* = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{1}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (13)$$

la ecuación integradora de componentes de esfuerzos tangencial y normal asociados a la turbulencia resulta la siguiente:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = 2\mu_t S_{ij}^* - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (14)$$

2. Modelos de turbulencia LES

Como se ha comentado con anterioridad, el flujo turbulento se caracteriza por torbellinos de diferentes tamaños y energías. De lo que se trata con los modelos LES es de resolver, a través del mallado, algunos de estos torbellinos.

Para resolver por mallado un torbellino harán falta, al menos, 4 celdas de mallado:

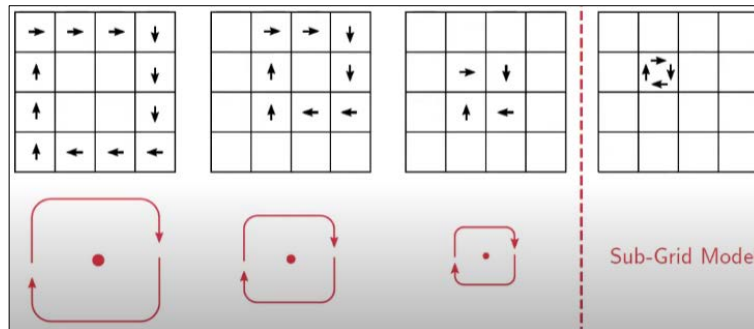


Ilustración 3. Torbellinos representados por vectores velocidad en los centroides de las celdas ^[5]

Si bien a partir del mallado se pueden resolver torbellinos de diferentes tamaños, no se pueden resolver torbellinos de tamaño inferior al de la celda, debido a que únicamente se pueden referenciar velocidades en los centroides de estas. En estos casos habrá que acudir a modelos denominados de “escala sub-red” (SGS). Por lo tanto, será el mallado el que establezca el tamaño mínimo de torbellino que puede ser resuelto (modelo LES implícito).

A la hora de establecer el tamaño de mallado óptimo para llevar a cabo una simulación LES, habrá que hacer uso del denominado número de Wave (W), número que determina la frecuencia espacial del torbellino: ^[4]

$$W = \frac{2\pi}{d} \quad (15)$$

donde d es el tamaño de celda. Conforme se reduce el tamaño de celda, el número W aumenta y viceversa.

A través de ensayos experimentales se puede establecer que la energía cinética asociada al fenómeno de turbulencia se distribuye en función del tamaño de torbellino, en lo que se conoce como cascada de energía turbulenta de Kolmogorov. En este caso, serán los torbellinos de mayor tamaño (menor número W) los que presenten mayor cantidad de energía cinética, según se desprende de la siguiente ilustración:

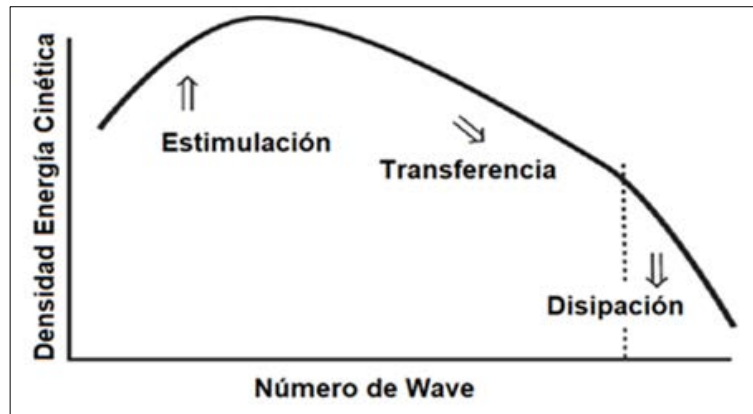


Ilustración 4. Cascada de energía turbulenta de Kolmogorov (elaboración propia)

El mallado seleccionado no va a resolver la totalidad de torbellinos generados, por lo que únicamente resolverá parte de dicha energía. Así, un buen modelado LES resolverá por mallado un total de torbellinos equivalentes, al menos, al 80% de la energía cinética turbulenta, mientras que el resto serán resueltos a partir de modelos SGS.

Como el tamaño de torbellinos y energía cinética turbulenta varían a lo largo del dominio, se define la “*escala de longitud integral*” (l_0) como el valor representativo de los torbellinos en una localización concreta del dominio, es decir, l_0 coincidirá con la longitud de torbellino de energía cinética media:

$$l_0 = \frac{\int_0^\infty k^{-1} E(k) d(k)}{\int_0^\infty E(k) d(k)} \quad (16)$$

A este respecto, un mallado con celdas de un tamaño correspondiente a la quinta parte de l_0 resolverá un total de torbellinos equivalente al 80% de la energía cinética turbulenta: ^[4]

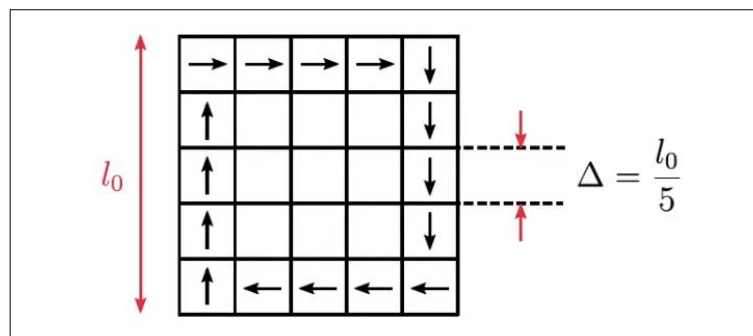


Ilustración 5. Mallado óptimo para modelado LES (elaboración propia)

Por lo tanto, la energía cinética total asociada al fenómeno turbulento será igual a la resuelta por mallado (k_{res}) más la resuelta a partir de modelos SGS (k_{sgs}):

$$k = k_{res} + k_{sgs} \quad (17)$$

La forma de determinar k_{sgs} dependerá del modelo SGS seleccionado. Por lo general, se resolverá la siguiente ecuación de transporte para k_{sgs} :

$$\frac{\partial(\rho k_{sgs})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k_{sgs}) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k_{sgs}) - C_\epsilon \frac{\rho k_{sgs}^{\frac{3}{2}}}{\Delta} + \rho G_{sgs} - \frac{2}{3} \rho k_{sgs} \nabla \cdot U \quad (18)$$

Además de la resolución de la ecuación de transporte, existen modelos SGS que calculan k_{sgs} a partir del término denominado "escala de longitud sub-red" (l_{sgs}):

$$k_{sgs} = \left(\frac{\mu_{sgs}}{\rho l_{sgs}} \right)^2 \quad (19)$$

que se corresponde con el tamaño de torbellino que presenta una energía cinética equivalente a la media del total de torbellinos de tamaño inferior al de la celda, de manera análoga a lo que ocurre con el término de escala de longitud integral (l_0). Además, l_{sgs} debe de ser menor que el tamaño de celda:

$$l_{sgs} = C_s * (Volumen Celda)^{1/3} \quad (20)$$

donde $C_s = 0.173$ es el denominado coeficiente de Smagorinsky.

En zonas próximas a la pared, como la ratio de aspecto de las celdas se hace cada vez más grande, los torbellinos son amortiguados de forma que, en estos casos, la anterior expresión toma la siguiente forma:

$$l_{sgs} = \min(\kappa y, C_s * \Delta^{1/3}) \quad \kappa = 0.41 \quad (21)$$

Una vez obtenidos los valores de energía k_{res} y k_{sgs} asociados a la turbulencia, se puede conocer la relación entre la energía turbulenta resuelta por mallado y la resuelta por el uso de modelos SGS mediante la siguiente relación:

$$\frac{k_{res}}{k_{res} + k_{sgs}} > 0.8 \quad (22)$$

Con el proceso de refinado de malla (reducción de tamaño de celda), lo que se conseguirá es incrementar k_{res} en detrimento de k_{sgs} , aumentándose la ratio por encima del valor de 0.8 buscado para una buena simulación LES.

3. Modelos de turbulencia RANS

Debido al elevado coste computacional de los modelos DNS y LES, surgen los modelos RANS o modelos de promedio temporal de las ecuaciones de gobierno. Estos modelos se basan en la descomposición de las variables fluidas en su valor medio y valor fluctuante. [2]

La aplicación de modelos de turbulencia RANS dará lugar a un campo de flujo promediado y simulado, más uniforme que en el caso del flujo real, reduciéndose de forma drástica el número de puntos necesarios para una correcta discretización espacial y temporal del problema:

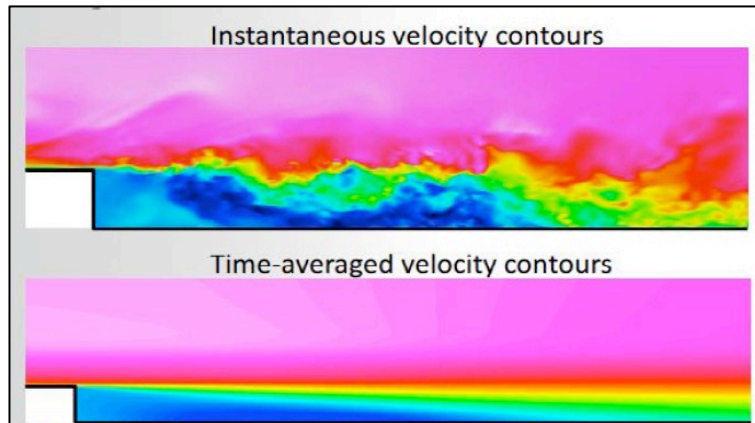


Ilustración 6. Velocidad instantánea vs velocidad promediada [5]

La siguiente ilustración muestra un listado de modelos de turbulencia RANS, ordenados de menor a mayor coste computacional, integrados en la mayoría de códigos CFD de uso generalizado:

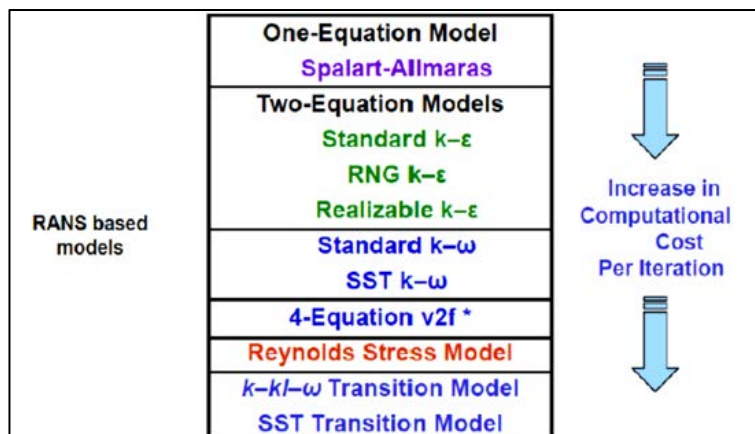


Ilustración 7. Velocidad instantánea vs velocidad promediada [5]

A continuación se exponen las características principales de los modelos de turbulencia Spalart-Allmaras, la variante "realizable" del modelo $k-\epsilon$ y la variante SST ("Shear-Stress Transport") del modelo $k-\omega$.

El modelo de turbulencia Spalart-Allmaras fue propuesto en el año 1994, coincidiendo con el modelo $k-\omega$ SST y varios años después del modelo $k-\omega$ (1988). Para entender cómo funciona el modelo

Spalart-Allmaras, la siguiente ilustración muestra el perfil de velocidades correspondiente a un flujo viscoso que discurre sobre una placa plana:

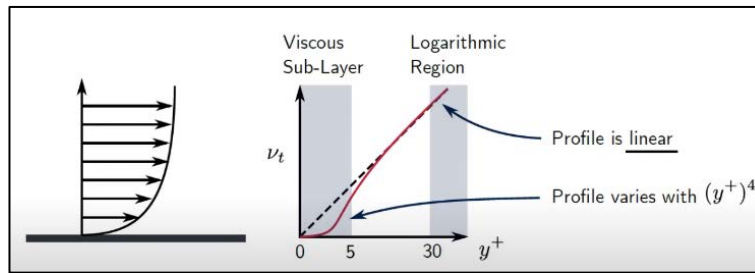


Ilustración 8. Representación de v_t e y^+ para una placa plana ^[4]

donde valores de y^+ se obtienen a partir de la siguiente expresión:

$$y^+ = \frac{\rho u y}{\mu} \quad (23)$$

En la subcapa viscosa ($y^+ < 5$) el perfil de velocidades varía conforme a $(y^+)^4$. Debido a esto, habrá que dividir el dominio en multitud de celdas de espesores muy finos con el fin de obtener un perfil de la forma más precisa posible debido a que, en los códigos CFD, la variación de las magnitudes fluidas resulta lineal a través de las celdas.

A partir de aquí, el modelo introduce una nueva variable de viscosidad $\tilde{\nu}$ o variable Spalar-Allmaras. Para el caso de una placa plana cuya capa límite no se encuentra sometida a gradientes de presiones adversos, $\tilde{\nu}$ se va a comportar como una recta:

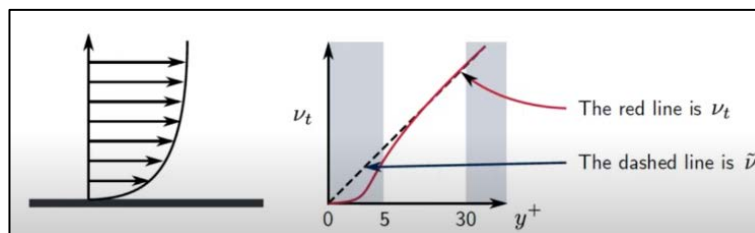


Ilustración 9. Representación de v_t e y^+ para una placa plana ^[4]

En este caso, $\tilde{\nu}$ coincidirá con v_t en zonas alejadas de la pared, mientras que en zonas cercanas se comportará como una recta, mejorándose la estabilidad hacia la convergencia y reduciéndose el número de celdas necesarias para captar los detalles.

Ahora bien, como no todas las geometrías van a ser placas planas, habrá que plantear una ecuación de transporte para calcular $\tilde{\nu}$: ^[6]

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} \tilde{\nu}) = c_{b1} \bar{S} \tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} [\nabla \cdot (\nu + \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu} + c_{b2} (\nabla \tilde{\nu})^2] - c_{\omega 1} f_{\omega} \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 \quad (24)$$

El modelo de turbulencia $k - \epsilon$ fue propuesto por primera vez en 1973 y está basado en las ecuaciones de transporte para la energía cinética asociada a la turbulencia (k) y su tasa de disipación debido a la viscosidad (ϵ). En este caso, la viscosidad turbulenta (μ_t) se relaciona con k y ϵ de la siguiente forma: ^[7]

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (25)$$

Para k , la ecuación de transporte será la misma para todas las variantes del modelo $k - \varepsilon$:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (26)$$

donde P_k es el término de producción relacionado con la velocidad en la dirección principal de la corriente, P_b es el debido a la flotabilidad y S_k es un término fuente. En el caso de ε , la ecuación de transporte correspondiente a la variante "realizable" resulta la siguiente: [7]

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} C_3 P_b + S_\varepsilon \quad (27)$$

donde C_1 , C_2 y C_3 son coeficientes y σ_k y σ_ε son los números de turbulencia de Pradtl para k y ε .

El modelo de turbulencia $k - \omega$ fue propuesto por primera vez por Kolmogorov en el año 1942. A partir de entonces, se han desarrollado diferentes versiones en función de su aplicabilidad:

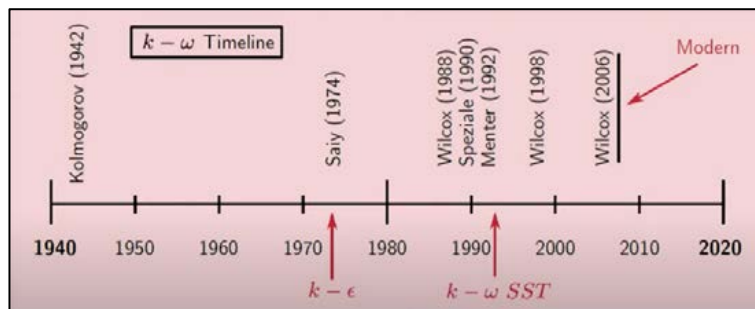


Ilustración 10. Modelos $k - \omega$ desde Kolmogorov a la actualidad [4]

A diferencia del modelo $k - \varepsilon$, en el que ε es la tasa de disipación de energía cinética asociada a la turbulencia en m^2/s^3 , en el modelo $k - \omega$ el parámetro ω coincide con la tasa de disipación específica de energía cinética asociada a la turbulencia en $1/s$:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad C_\mu = 0.09 \quad (28)$$

En el modelo $k - \omega$, las ecuaciones de transporte para k y ω resultan las siguientes:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (29)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \omega) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \omega \right) + \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (30)$$

Al contrario del modelo $k - \varepsilon$, el modelo $k - \omega$ presentará un comportamiento más preciso en aplicaciones de aerodinámica y turbo maquinas. En cambio, será más dependiente de las condiciones de turbulencia en

zonas alejadas de la pared ($Re \approx 10^6$), por lo que una posible solución consistirá en combinar ambos modelos ($k - \epsilon$ y $k - \omega$) en un único modelo, conocido como variante SST del modelo $k - \omega$.^[4]

A partir de la ecuación para ϵ del modelo $k - \epsilon$ "standard", la relación existente entre ϵ , k y ω es la siguiente:

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\omega) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \omega \right) + \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \underbrace{2 \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla k : \nabla \omega}_{\text{término adicional}} \quad (31)$$

El término adicional, multiplicado por una función de combinación F_1 , resulta:

$$2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla k : \nabla \omega \quad (32)$$

Para $F_1 = 0$, la ecuación de disipación de energía cinética será la correspondiente a ϵ (zonas alejadas), mientras que para $F_1 = 1$, será la correspondiente a ω (zonas cercanas). Para una transición lo más suave posible, se emplea la siguiente función de combinación:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4); \quad \arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500v}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right] \quad (33)$$

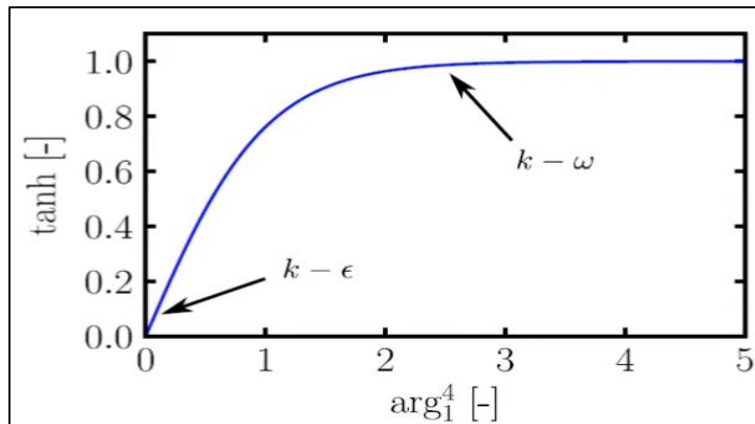


Ilustración 11. Plot de la función de combinación F_1 ^[4]

4. Ejemplo de aplicación de modelos LES ^[4]

Se parte de un canal por el que discurre un flujo determinado en régimen turbulento:



Ilustración 12. Dominio de aplicación del modelo de turbulencia LES

Debido a que el mallado seleccionado para discretizar el dominio no va a resolver la totalidad de torbellinos, únicamente se podrá resolver una parte de energía cinética asociada al fenómeno turbulento. Representando los campos de energías cinéticas turbulentas resueltas por mallado (k_{res}) y por modelado SGS (k_{sgs}):

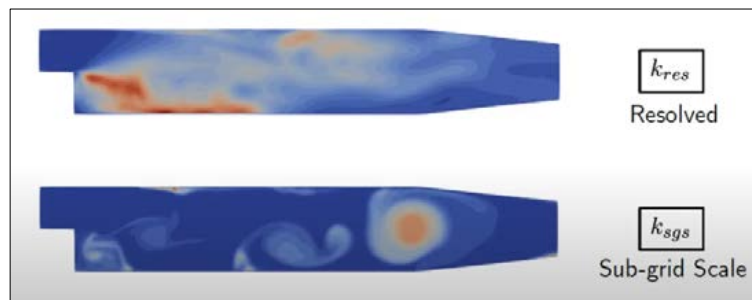


Ilustración 13. Campos de energías k_{res} y k_{sgs} a lo largo del dominio

A partir del ejemplo anterior, programando en el módulo de post-proceso del código CFD la relación entre k_{res} y k_{sgs} ($k_{res} / (k_{res} + k_{sgs})$), se obtiene el siguiente resultado:

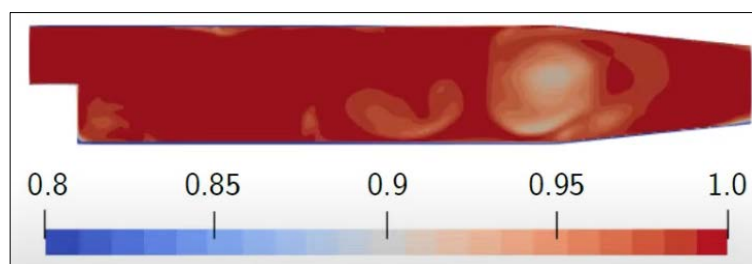


Ilustración 14. Campos de ratios de energías $k_{res} / (k_{res} + k_{sgs})$ a lo largo del dominio

Como se recordará, un buen modelado LES requiere de, al menos, la resolución mediante mallado del 80% de la energía cinética asociada al fenómeno turbulento (k_{res}).

En el ejemplo anterior se comprueba que el grado alcanzado en todo el dominio se encuentra por encima del 90% de la energía resuelta por mallado (k_{res}), lo que supone un buen ejemplo de aplicación de modelado LES para la caracterización del fenómeno de turbulencia.

5. Ejemplo de aplicación de modelos RANS

A partir del ejemplo de aplicación para un sistema HVAC publicado en el BTI N° 22 de junio de 2022 [8], se procede a la realización de simulaciones con velocidades de flujo $u_{in} = 1, 2, 3, 4$ y 5 m/s, empleando los modelos de turbulencia Spalart-Allmaras y las variantes realizables del modelo $k - \epsilon$ y SST del modelo $k - \omega$. Como se recordará, el ejemplo consistía en un conducto de descarga de aire a la atmósfera, de geometría cilíndrica y longitud determinadas por el que discurría un flujo de aire estacionario, incompresible e isoterma:



Ilustración 15. Geometría 3D del conducto de descarga de aire HVAC (cortesía ANSYS, Inc.)

La aplicación del concepto de simetría axial (respecto del eje) permitió pasar de geometría 3D (cilíndrica) a 2D (cartesiana), simplificándose enormemente las ecuaciones de gobierno:

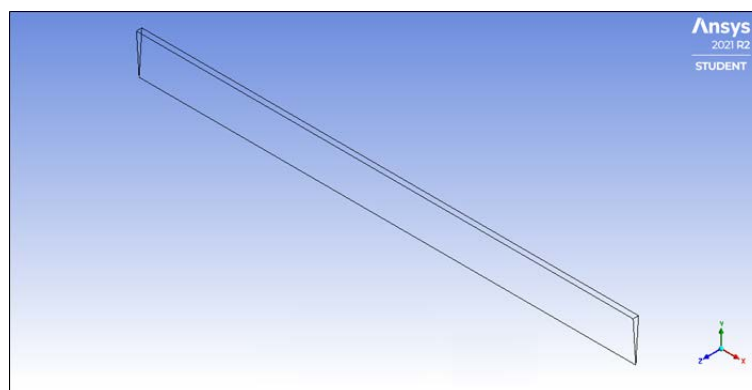


Ilustración 16. Geometría 2D del conducto de descarga de aire HVAC (cortesía ANSYS, Inc.)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (34)$$

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \bar{f}_{turb,x} \quad (35)$$

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \bar{f}_{turb,y} \quad (36)$$

Además de las ecuaciones de gobierno, para la resolución numérica del problema se precisó de la definición de las denominadas condiciones “*iniciales*” (CI) y de “*contorno*” (CC):

$$CI \rightarrow u_{in}, p_{out}$$

$$CC \rightarrow \begin{cases} u = v = 0 \rightarrow \text{"wall"} \\ \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \rightarrow \text{"axil"} \end{cases} \quad (37)$$

En cuanto a los resultados obtenidos, en la siguiente figura se muestra el campo de viscosidades turbulentas (μ_t) para el caso concreto de $u_{in} = 5$ m/s:

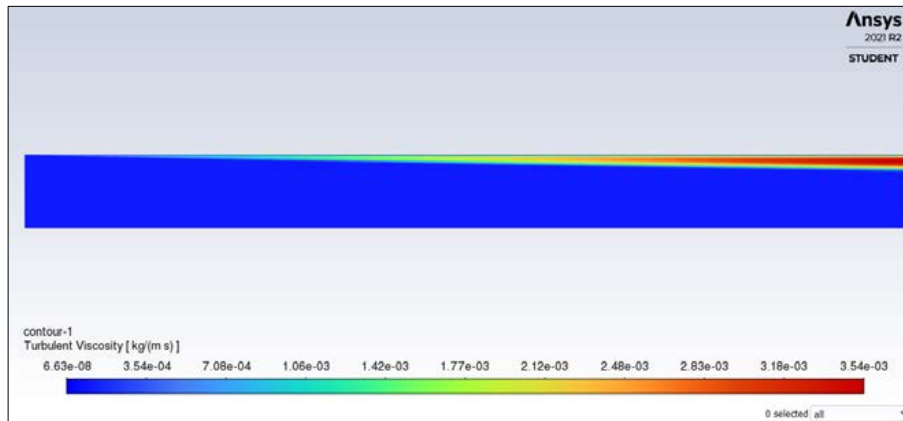


Ilustración 17. Campo de viscosidades turbulentas (μ_t) para $u_{in} = 5$ m/s (cortesía ANSYS, Inc.)

Como se recordará, el concepto de viscosidad turbulenta (μ_t) supone un artificio que trata de representar las fuerzas de colisión entre partículas. Así, en zonas próximas a la pared los torbellinos son amortiguados por lo que las colisiones disminuyen. Igualmente, las colisiones se ven reducidas en zonas alejadas de pared según se desprende de la ilustración anterior.

En la siguiente tabla y figura se resume el número de iteraciones hasta alcanzar la convergencia, en función de las velocidades u_{in} y modelos RANS empleados:

u_{in} (m/s)	1	2	3	4	5
Spalart - All.	76	76	75	77	79
k - ϵ (Realizable)	82	81	82	80	92
k - ω (SST)	88	127	146	157	158

Tabla 1. Número de iteraciones en función de u_{in} y modelo RANS (elaboración propia)

En este caso, se comprueba que el modelo Spalart-Allmaras es el que mejores resultados obtiene (menor número de iteraciones hasta convergencia) debido, principalmente, al comportamiento lineal de la viscosidad $\tilde{\nu}$ en zonas cercanas de la pared, lo que supone una mejora de la estabilidad hacia la convergencia y la reducción del número de celdas necesarias para captar todos los detalles en zonas próximas de la pared.

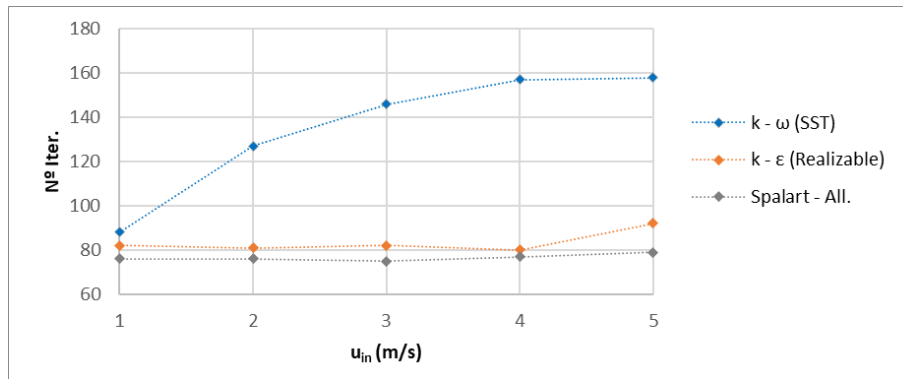


Ilustración 18. Número de iteraciones en función de u_{in} y modelo RANS (elaboración propia)

En cuanto al cálculo de los coeficientes de “drag” o arrastre (C_D), en la siguiente tabla y figura se resume los valores obtenidos en las diferentes simulaciones realizadas, destacando la similitud en los resultados, independientemente del modelo de turbulencia seleccionado, lo que da una idea de la bondad de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas:

u_{in} (m/s)	1	2	3	4	5
Spalart - All.	4,14E-03	4,05E-03	3,96E-03	3,87E-03	3,79E-03
k - ϵ (realizable)	4,31E-03	4,18E-03	4,05E-03	3,94E-03	3,83E-03
k - ω (SST)	4,27E-03	4,16E-03	4,04E-03	3,93E-03	3,84E-03

Tabla 2. Coeficientes de arrastre C_D en función de u_{in} y modelo RANS (elaboración propia)

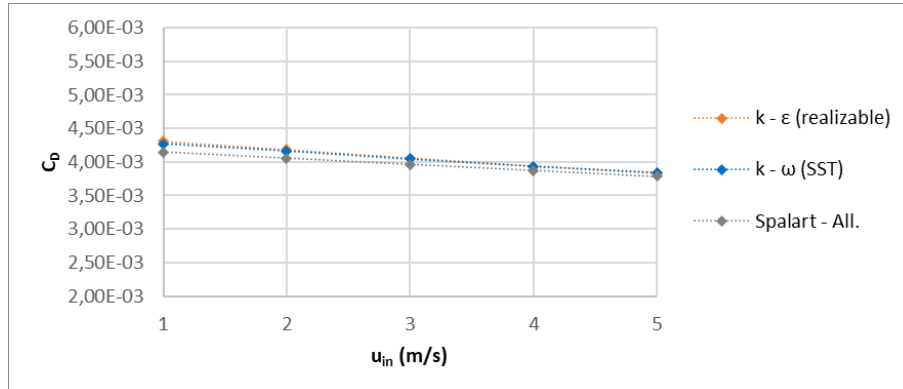


Ilustración 19. Coeficientes de arrastre C_D en función de u_{in} y modelo RANS (elaboración propia)

Por tratarse de un tramo recto de conducto, no existirá componente de presión, por lo que el coeficiente de arrastre (C_D) coincidirá con el de fricción (C_F) según la siguiente expresión: ^[1]

$$C_D = C_{\overline{p}} + C_F \quad (38)$$

siendo fácilmente comprobable, en etapas posteriores, la validez de los resultados a través de la monitorización del coeficiente de arrastre (C_D) y su comparativa con valores del coeficiente de fricción (C_F) obtenidos a partir de expresiones empíricas basadas en resultados experimentales.

6. Conclusiones

Del tratamiento del fenómeno de turbulencia, a partir del uso de técnicas CFD, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los principales modelos de uso común se clasifican en simulación directa o DNS, simulación de grandes vórtices o LES y promediado temporal de las ecuaciones de gobierno o RANS.
- Tanto los modelos DNS como LES presentan un elevado coste computacional, por lo que se acude mayoritariamente al uso de modelos RANS.
- Los modelos RANS se basan en la descomposición de las variables fluidas en su valor medio y valor fluctuante, permitiendo resultados numéricos bastantes precisos.
- El modelo Spalart-Allmaras destaca del resto de modelos RANS en estabilidad hacia la convergencia, debido al comportamiento lineal cercano a la pared de la nueva variable de viscosidad $\tilde{\nu}$ o variable Spalar-Allmaras.
- Los modelos $k - \epsilon$ y $k - \omega$ se pueden combinar en la variante SST $k - \omega$ con el fin de mejorar las predicciones en todo el rango de distancias respecto de la pared.

7. Referencias bibliográficas

- [1] Burbano, S., Burbano, E., Gracia, C., (2003) Física General, 32ª ed., Tebar, Madrid, ISBN: 8-495-44782-7.
- [2] Ballesteros, R., González, J., Fernández, J., Argüelles, K., (2003) Técnicas Numéricas en Mecánica de Fluidos, Universidad de Oviedo, Rafael Ballesteros Tajadura, Gijón, ISBN: 84-607-9546-2.
- [3] Rodríguez, S. (2019) Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling, Practical Tools, Tips and Techniques, Sandia National Laboratories, Albuquerque, Nuevo México, ISBN 978-3-030-28690-3.
- [4] Wimshurst, A. (2018) Computational Fluid Dynamics, Fundamentals Course, Edit. Fluid Mechanics 101.
- [5] ANSYS Fluent (2010) Turbulence Modeling, Lecture 6, Customer Training Material, ANSYS Inc. Southpointe 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317 Pensilvania, USA.
- [6] Spalart, P., Allmaras, S. (1992) A One Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, Technical Report AIAA-92-0439, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), USA.
- [7] ANSYS Fluent (2019) Theory Guide, Release 20.0, ANSYS Inc. Southpointe 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317 Pensilvania, USA.
- [8] Pernas, J. M. (2022) Fundamentos CFD de aplicación en ingeniería I: ecuaciones de gobierno, Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada (ETSIAN – DIENA – JEPER), Nº 22, páginas 3 – 14, NIPO (ed. línea): 083-17-202-1, ISSN (ed. línea): 2659-6458.

«SYSTEM SAFETY'» Y LA «ANEP-77»

CC (CIA) D. RAÚL VILLA CARO

Ingeniero Naval y Oceánico / Capitán de la Marina Mercante
Doctor por la Universidad de A Coruña
Jefe de Ingeniería de Plataforma de ICOFER (Arsenal Militar Ferrol)

D^a. SONIA BELLÓN POSE

Ingeniera Naval y Oceánica
Responsable de Seguridad de los Sistemas Programa F-110 (Navantia)

D^a. MARÍA PENEDO BAEZA

Ingeniera Naval y Oceánica / Doctora por la Universidad de A Coruña
Responsable de Seguridad de los Sistemas Astillero Ferrol / Autoridad Técnica de Safety Buques de Superficie (Navantia)

Introducción

En un mundo dinámico de constante evolución en diseño y aplicación de nuevas tecnologías innovadoras, está resultando cada vez más difícil aplicar el enfoque tradicional de los estándares basados en normas prescriptivas. Como resultado de esto, la atención se ha centrado en el uso creciente de una filosofía basada en objetivos por encima de los estándares técnicos, que a menudo se incorporan en reglas y regulaciones. Los estándares tradicionales, en su mayoría, se han basado en hechos históricos en lugar de centrarse en el futuro. Las nuevas tecnologías y la innovación desafían las reglas y normas existentes y cómo se derivan. Por ello, este Enfoque por Objetivos, nos permite elaborar Normativa de construcción de buques, que permitirá incluir diseños innovadores, innovar Sistemas de Sistemas (SoS); integrar la ingeniería de sistemas soportada por los Model- Based System Engineering (MSBE), así como los análisis de safety.

Desde el punto de vista de la seguridad, a través de este Enfoque por Objetivos, el diseñador puede considerar la inclusión de la identificación y evaluación de riesgos safety, a través de una aproximación de «Enfoque Riesgo» que permita considerar si las alternativas necesarias en el diseño desde el inicio del ciclo de vida de los proyectos son seguras y si éstas nos permitan mantener esa seguridad hasta la retirada del buque.

Hoy en día se usa un enfoque combinado, usando el cumplimiento de normativa y la aproximación de riesgos safety, lo que permite tener la aproximación completa de seguridad «Full Safety Case» o «Enfoque de Riesgo Safety».

Como se ha comentado y a modo de resumen, la aproximación usada para la redacción del Código, representa un cambio fundamental con respecto a lo que antes era un enfoque regulador en gran medida fragmentario y reactivo a cambiar a una aproximación que es proactiva, integrada y, sobre todo, tener la posibilidad de proponer soluciones y tener en cuenta la evaluación de riesgos safety a través de la realización de una aproximación «Full Safety Case» que nos permita una gestión de una manera transparente y justificable, fomentando así, un mayor cumplimiento del marco regulatorio Naval, mejorando la seguridad a los equipos y personas y la protección del medio ambiente.

«NAVAL SHIP CODE» ANEP77

PROPÓSITO DEL «NAVAL SHIP CODE»

Los buques mercantes operan en el marco de la legislación internacional supervisada por la Organización Marítima Internacional (OMI). Las armadas se esfuerzan por lograr un equilibrio entre la seguridad y la capacidad militar, asegurando que las actividades en tiempos de paz se lleven a cabo con un nivel aceptable de seguridad y, para muchas armadas, esto se establece como equivalente a los buques mercantes según la legislación civil. Sin embargo, el documento de seguridad clave de la OMI, Seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS), no es atractivo para muchos buques de guerra porque su función militar exige soluciones de diseño y operación que no son compatibles con las disposiciones de SOLAS; en algunos casos, especificar el cumplimiento de SOLAS puede generar importantes implicaciones de costes o comprometer la capacidad de un barco. Reconociendo estas limitaciones, la OTAN creó el Naval Ship Code, desarrollado para brindar: garantía de seguridad comparada con el estatuto, utilizando estándares comunes que son familiares en todo el mundo y que reconocen los requisitos operativos militares. El Código desarrollado es un estándar basado en objetivos que ofrece un marco para la regulación de seguridad con el mismo alcance y un nivel de seguridad equivalente a IMO SOLAS.

Se mantiene un ciclo de actualización anual con grupos de trabajo enfocados en diferentes áreas del Código. Las actualizaciones aceptadas se pasan a la OTAN para su revisión y publicación en la próxima edición.

ESTRUCTURA DEL «NAVAL SHIP CODE»

El Naval Ship Code adopta el enfoque basado en objetivos en el que éstos deben representar los niveles superiores del marco, frente al cual se verifica el buque tanto en las etapas de diseño y construcción, como durante la operación del buque.

La Parte 1 establece los objetivos generales:

En resumen, el buque debe ser diseñado, construido y mantenido de manera que cuando se opere el buque sea:

- Seguro de operar y evite lesiones a la tripulación a bordo.
- El buque siga disponiendo de las funciones esenciales de seguridad en circunstancias de daños previsibles.

La Parte 2 contiene sugerencias de soluciones para los objetivos funcionales y los requisitos de la Parte 1.

La Parte 3 proporciona justificación y la orientación para validar que los requisitos y soluciones satisfacen adecuadamente los objetivos de ANEP77.

Para el desarrollo del Naval Ship Code, se adoptó una jerarquía de niveles como se muestra en la Figura: ANEP 77: Jerarquía de Niveles. El ancho creciente del triángulo a medida que el Código desciende a través de los niveles implica incrementar el nivel de detalle.

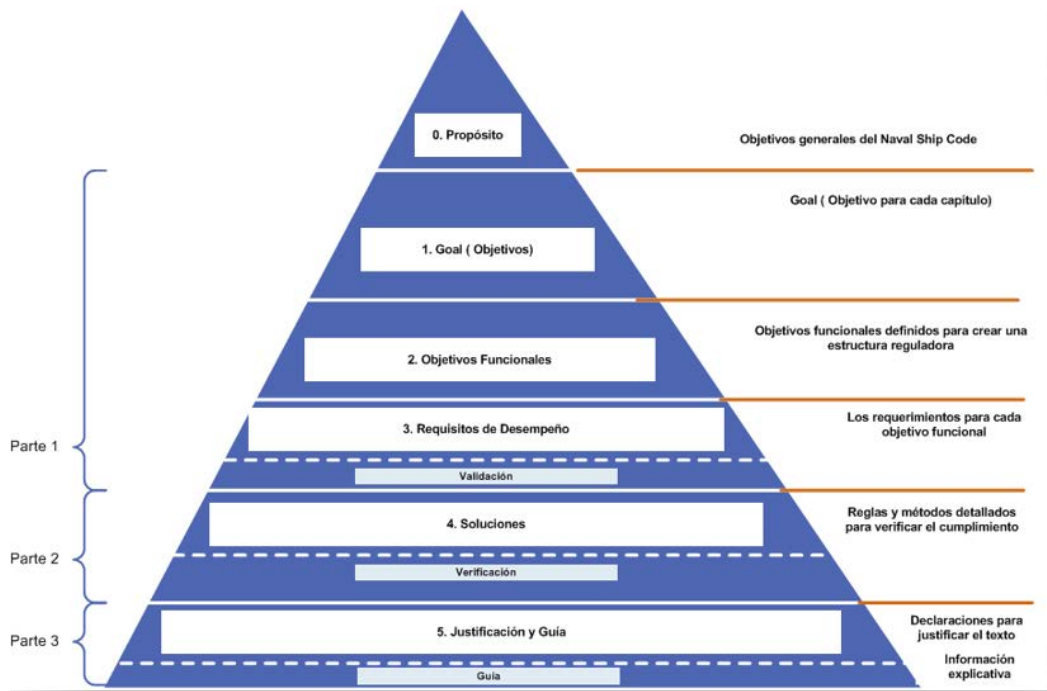


Figura 1. ANEP 77: Estructura & Jerarquía de Niveles (Fuente: ANEP 77)

La normativa ANEP 77 define un objetivo principal que se define a través de una serie de «Niveles» o marcos para la verificación a través del diseño construcción y operación, como se indica en la figura anterior.

«NAVAL SHIP CODE» & SAFETY CASE

Es necesario garantizar que la operación de los buques que se diseñan y construyen, así como los sistemas que estos integran, puede realizarse de forma segura para una aplicación dada y en un entorno operativo acordado. Para ello, realizamos un Estudio de Seguridad (“Safety Case”), cuyo objetivo es evidenciar que el buque y sus sistemas son aceptablemente seguros de acuerdo con la intención operativa especificada de acuerdo con el Concepto de Operaciones, para las personas, los equipos y el medioambiente.

Para garantizar la seguridad de los buques, realizamos una Gestión de Safety, lo que implica:

- Establecer una Política de Aseguramiento de Safety.
- Desarrollar un Marco de Aseguramiento de Safety para aplicación de la política.
- Establecer un Proceso de Certificación.

La siguiente figura muestra esta trazabilidad:

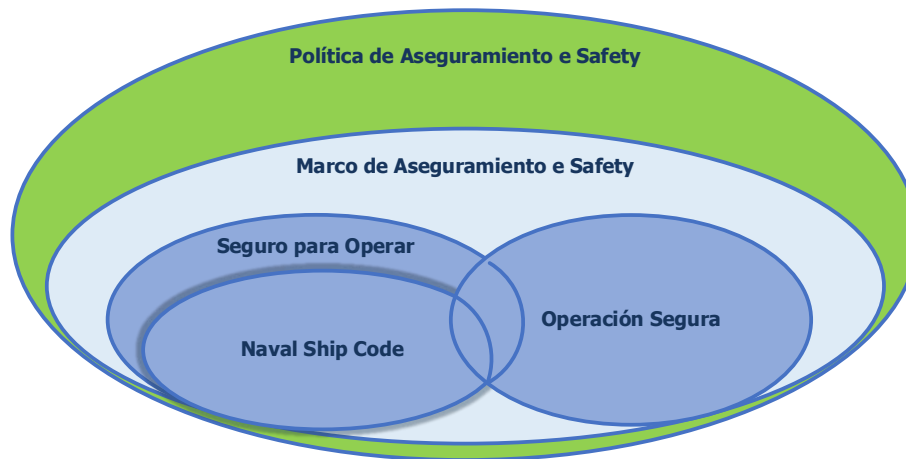


Figura 2. Interrelación entre Safety & Certificación (Fuente: Naval Ship Code Matters; Lloyd's Register Webinar)

Se consideraría adecuado un Sistema de Gestión de Safety aprobado por la Administración Naval y donde se combine la ANEP 77 con el Estudio de Seguridad («Safety Case»).

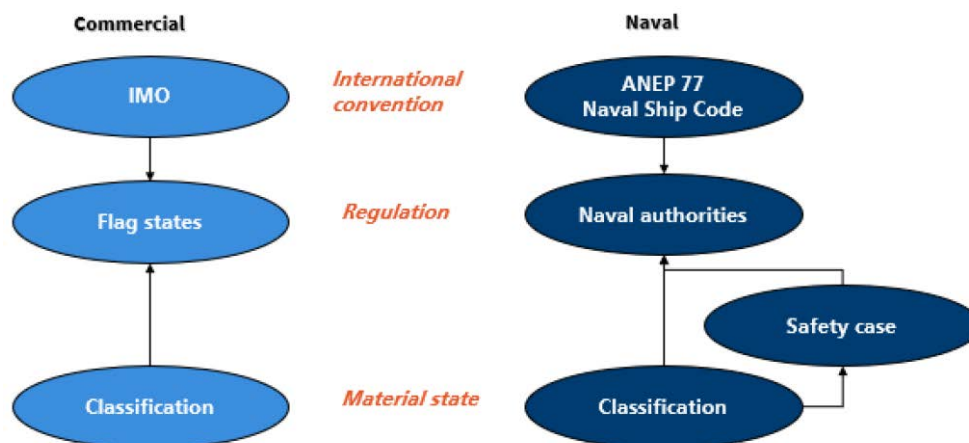


Figura 3. ANEP 77 & Safety Case (Fuente: Naval Ship Code Matters; Lloyd's Register Webinar)

A través del Estudio de Seguridad («Safety Case») junto con su Evaluación Formal de Seguridad (FSA), nos proporciona soluciones a los requisitos funcionales definidos en la ANEP 77 y como sus posibles fallos de funcionalidad nos permite identificar los PELIGROS que puedan originarse. Al identificar estos peligros de forma temprana nos permite incluir medidas de seguridad en el diseño que los eliminen o minimicen lo máximo que sea posible hasta un nivel ALARP.

Para ver la relación de safety directamente con los niveles del código ANEP 77; vemos que los análisis de safety, los riesgos se puedan identificar y tener en cuenta en el establecimiento y actualización de los **Niveles 2 y 3**. Y en relación con el **Nivel 4** se pueden usar las soluciones de análisis de riesgos safety para cubrirlo.

De forma particular y según se indica en el punto 0.21 PART 3 CHAPTER I GENERAL PROVISIONS, las técnicas de evaluación de riesgos para identificar peligros pueden usarse para establecer los objetivos funcionales.

Hay disponible una multitud de metodologías de evaluación de riesgos que ayudarán a las Comisiones de Estudio a través de este nivel y los subsiguientes. Estos pueden incluir HAZID, SWIFTS, FMECA, análisis de árbol de fallos, etc. Recientemente, la OMI investigó y aplicó el proceso de Evaluación Formal de Seguridad (FSA), que forma parte de la documentación usada en la secretaría de INSA para orientación de los Grupos de estudio según sea necesario.

Lo ideal, para las soluciones del Nivel 4, sería ir a **soluciones combinadas** (prescriptivas de cumplimiento y proactivas de análisis de riesgos) de cara a garantizar el cumplimiento con la ANEP 77. Se deja en manos de la Administración que sea la que establezca el nivel de aceptación del riesgo definido; pudiendo aquí considerarse las Sociedades de Clasificación.

Cómo el Estudio de Seguridad («Safety Case») se relaciona en el desarrollo de sus actividades con la ANEP 77 en buques de superficie; se puede ver a través de la siguiente figura:

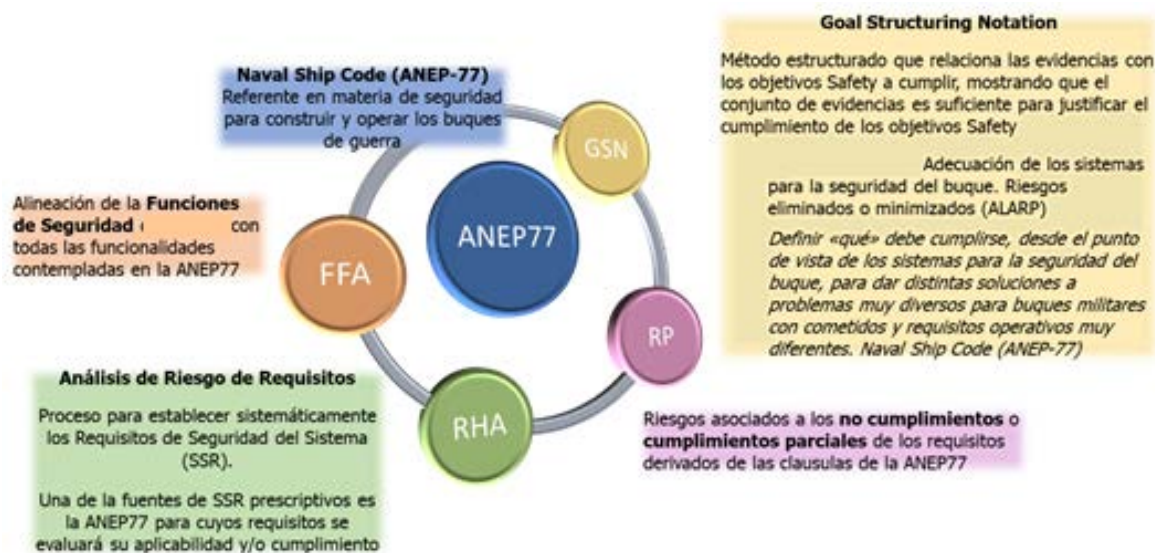


Figura 4. Actividades de Safety impactadas por ANEP77 (Fuente: Propia)

Nos vamos a centrar, a continuación, en aquellas actividades safety, que aportarían «inputs» a las revisiones de ANEP77:

Evaluación Formal de Seguridad (EFS) & ANEP 77

Desde el punto de vista de la Evaluación Formal de Seguridad (EFS) se debe realizar un análisis de **safety funcional** que nos proporciona un análisis de cómo podrían fallar las capacidades / funcionalidades del sistema de plataforma (así como la arquitectura de las funciones del subsistema que las soportan) y de sistema de combate; permitiéndonos identificar los PELIGROS y gestionarlos para asegurar que el buque es seguro de operar y mantener en un entorno operativo definido, tanto para los equipos y personas y la protección del medio ambiente.

Nos gustaría destacar que la evaluación de riesgos safety, además de contemplar la seguridad de las personas, incluye la seguridad en cuanto a funcionalidades y capacidades de los equipos y del medioambiente

en adición de lo requerido en el ANEP 77, lo que proporciona una aportación completa de la seguridad en Buques de Superficie.

Este análisis de Safety se realiza usando como base la tarea 208 de la normativa MIL-STD-882E. Este análisis identifica las Funciones del Buque a partir de sus Capacidades Operativas y de las funcionalidades definidas en la Especificación de Contrato del buque.

Definimos las funciones, como los medios mediante los cuales un sistema opera para conseguir unos objetivos o una misión. Este análisis define qué funciones son de seguridad y cuáles requieren estudio, ya que su fallo lidera en la aparición de un peligro.

Una vez identificadas las funciones de seguridad cuyo fallo genera un peligro, se realiza el análisis de los peligros asociados a esas funciones, que nos indicarán las probabilidades y severidades que nos encontremos de accidentes.

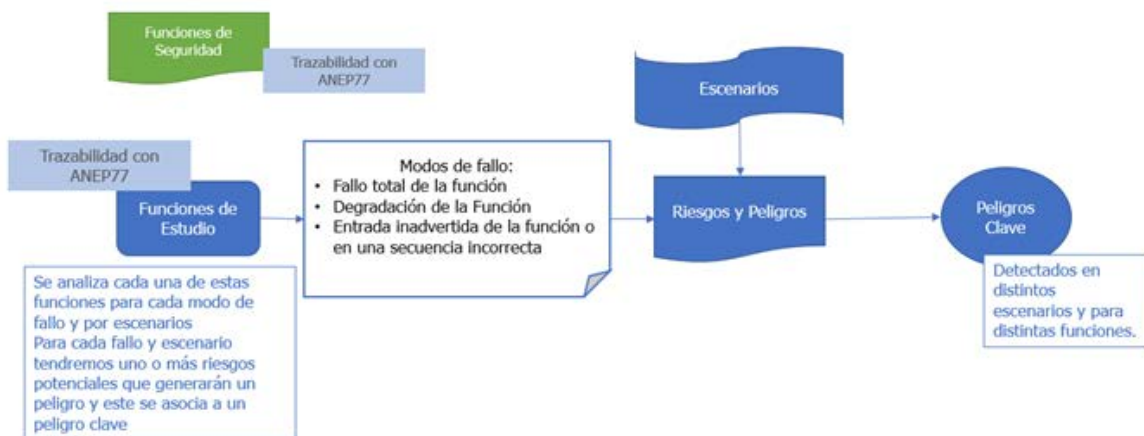


Figura 5. Funciones de Seguridad y Estudio & ANEP 77 (Fuente: Propia)

Las funciones de seguridad identificadas se trazan a través de un *Mapa de Proceso de ANEP 77* que nos permite trazar las funciones de seguridad del buque con las funciones esenciales definidas con ANEP77 (Nivel 2 y 3). De esta forma, aseguramos que todas las funcionalidades contempladas en el Código están trazadas y alineadas con las Funciones de Seguridad del Buque.

Argumento de Safety (GSN):

El argumento de safety, como parte del Estudio de Seguridad («Safety Case» SC), nos va a proporcionar un argumento estructurado por un cuerpo de evidencias que proporciona una justificación convincente, comprensible y válida de que el Buque es seguro para una aplicación dada en un entorno operativo dado.

El Objetivo Principal: es **tener un Buque Seguro**, es decir:

Todos los Riesgos Safety identificados y evaluados se consideren aceptables, eliminados o minimizados hasta un nivel lo más bajo posible, ALARP («As Low As Reasonable Practicable») y que se cumplan todos los requisitos Safety para una aplicación dada y en un entorno operativo dado.

Para conseguir esto, se tiene que considerar lo siguiente, como parte de los objetivos principales de seguridad del buque en relación a la ANEP 77:

Objetivo: Adecuación de los sistemas para la seguridad del buque. Riesgos eliminados o minimizados (ALARP) y alineados con la normativa ANEP 77

EJEMPLO DESGLOSE DE OBJETIVOS DE SEGURIDAD RELACIONADOS CON ANEP 77 Y ANÁLISIS SAFETY:

- Incluidos en ANEP 77:

OBJETIVO	ESTRATEGIA	CONTEXTO
Los sistemas del buque son adecuados para garantizar la seguridad del buque.	Desarrollo de un análisis acerca de la idoneidad del diseño de los sistemas de ingeniería del buque.	ANEP77, Chapter IV Engineering Systems. Análisis Funcional de Safety (FFA / FHA)
Los operadores deben recibir información e instrucciones adecuadas para la operación y el mantenimiento seguros de todas las máquinas y sistemas.		ANEP 77 Chapter IV, R3 Concept of Operations Statement FFA Función de Seguridad definida en el análisis safety
La maquinaria propulsora permitirá al buque maniobrar cuando lo requiera el mando, pero seguirá estando dentro de las limitaciones diseñadas o impuestas.		ANEP 77 Chapter IV, R4 Propulsion FFA Función de Seguridad definida en el análisis safety...

- No contemplados en la ANEP 77 y que se podrían incluir:

OBJETIVO	ESTRATEGIA	CONTEXTO
Los sistemas relacionados con Sistema de Combate del buque son adecuados para garantizar la seguridad del buque.	Desarrollo de un análisis acerca de la idoneidad del diseño de los sistemas de combate.	Análisis Funcional de Safety (FFA / FHA) Proporcionar soporte al Sistema de Combate.
<i>Los medios y disposiciones para el control de las firmas del buque son adecuados y seguros para el buque...</i>		FFA <i>Función de Seguridad definida en el análisis safety...</i>
<i>Los medios y disposiciones para el empleo de armas son adecuados y seguros para el buque...</i>		FFA <i>Función de Seguridad definida en el análisis safety...</i>

Y en cuanto a temas innovadores...

OBJETIVO	ESTRATEGIA	CONTEXTO
Nueva tecnología de Gemelo Digital contribuye a la seguridad del buque.		Nuevas Tecnologías (FFA)

VENTAJAS DE INCLUIR «SYSTEM SAFETY» EN LAS ACTUALIZACIONES DEL CÓDIGO:

Las principales ventajas de incluir los temas de safety en las actualizaciones del código, lo podemos resumir como:

- Ayudar a formar parte de una cultura proactiva en la gestión de la seguridad, al tener en cuenta la identificación y evaluación de riesgos safety dentro del Código, Si tenemos en cuenta, el analizar los peligros desde el principio del ciclo de vida del proyecto y mantener esta identificación hasta su desguace, ayudamos y aseguramos el poder tener productos más seguros y con menor coste.
- El Código, permite incluir diseños innovadores, a través de nuevas tecnologías, y con safety, conseguimos garantizar que son seguros durante todo su ciclo de vida.
- Safety ayuda a identificar las funcionalidades no consideradas previamente en el Código y que permitirían explorar la posibilidad de tenerlas en cuenta.
- Los análisis de Safety junto con el establecimiento de la Certificación de Seguridad Internacional para Buques de Superficie permitirían garantizar desde el «Enfoque de Riesgo Safety», una aproximación completa de la seguridad.

CONCLUSIONES:

La seguridad es una prioridad principal para los gobiernos con buques de guerra. A través del Código se determina un nivel mínimo de seguridad para esos buques de guerra. Este nivel mínimo de seguridad debería

de ser complementado con análisis adicionales de safety, proporcionando así una **aproximación completa de la seguridad**.

Usar los análisis de riesgos safety, nos permite tener una herramienta para facilitar un proceso de toma de decisiones transparente y donde la seguridad tanto de las funcionalidades de los equipos, de las personas y del medioambiente estén identificadas. Además, se proporciona un medio para ser proactivo, lo que permite considerar peligros potenciales antes de que ocurra un accidente.

Por ello, utilizando el cumplimiento de la ANEP 77 junto con los análisis propios de safety para cada buque de superficie, se tendrá un **Marco Completo de la Seguridad**.

Referencias bibliográficas

- [1] NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION. ALLIED NAVAL ENGINEERING PUBLICATION Published by the NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA). *NATO STANDARD ANEP-77 NAVAL SHIP CODE*. Edition F Version 1. Enero 2014.
- [2] Richard D. Delpizzo CAPT, Sharat Valluri «An Introduction to NATO Standard ANEP (Allied Naval Engineering Publication) 77 and Its Application to Naval Ships». *Ship Science & Technology* - Vol. 11 - n° 21 - (75-88). Julio 2017 - Cartagena (Colombia).
- [3] International Maritime Organization. *GOAL-BASED NEW SHIP CONSTRUCTION STANDARDS. The Naval Ship Code*. MSC 84/INF.5. Febrero 2008.
- [4] David R. Lloyd. «Naval Ship Code Matters». *Lloyd's Register Webinar*. Julio 2020.
- [5] «Naval Ship Safety Assurance». *Guidance for navies and shipbuilders*. Lloyd's Register Marine. 2014.
- [6] International Maritime Organization. *GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS*. MSC/Circ.1023 MEPC/Circ.392 5. Londres. Abril 2002.
- [7] Department of Defence Standard Practice. *MIL-STD-882 System Safety*. Versión E. 11 mayo 2012.
- [8] Dr Kelly Tim. «A Systematic Approach to Safety Case Management». University of York. UK. 2003 SAE International.
- [9] Commander Doug O'Reilly. «Naval Ship Safety Management».
- [10] Leveson Nancy. «The Use of Safety Cases in Certification and Regulation». *Aeronautics and Astronautics/Engineering Systems*, MIT.
- [11] Penedo Baeza, María. «Implantación del concepto de Seguridad («Safety») en el diseño de proyectos de un Astillero». UDC 2019/20.



BIOGRAFÍA¹

Joaquín Bustamante y

Quevedo

(1847-1898)

Joaquín Bustamante y Quevedo fue un militar e inventor español, nacido en Santa Cruz de Iguña (Cantabria) en 1847 y fallecido en acto de servicio en Santiago de Cuba durante la Guerra Hispano-Estadounidense.

Ingresó en el Colegio Naval en 1859 a la edad de 12 años. Participó en la Guerra Hispano-Sudamericana contra las Repúblicas de Chile, Perú y Bolivia, tomando parte con la Fragata de hélice *Resolución* en la ocupación de las islas Chincha. Mientras estaba embarcado en la Goleta *Covadonga*, fue herido y hecho prisionero en el Combate naval de Papudo que sostuvo con la corbeta chilena *Esmeralda*. Participó en la campaña de las Filipinas en 1872 al mando del cañonero Mindoro, en las operaciones de Joló y Tawi-Tawi, en los desembarcos de Zamboanga y Paticolo en 1876 y ataques a los pueblos de Parang y Mabun, siendo recompensado con el empleo de comandante de Infantería de Marina.

Realizó el curso de torpedos en Cartagena, en 1888, inventó un tipo propio de torpedo eléctrico y otro fijo (mina Bustamante), que por Real Orden del 9 de mayo de 1885 fue declarada de uso uniforme en la Armada Española. Perteneció a la Junta de Examen del *submarino Peral* y reglamentó el servicio de torpedos.

En 1898 fue nombrado Jefe de Estado Mayor de la Escuadra del Almirante Cervera. Propuso al almirante una salida nocturna escalonada para evitar la pérdida total de la escuadra, pero ésta fue desestimada. Desembarcó al mando de las columnas de desembarco, resultando herido el 1 de julio en la batalla de las Colinas de San Juan, cerca de Santiago de Cuba. Falleció pocos días después en el Hospital Militar de dicha plaza, recibiendo a título póstumo la Cruz Laureada de San Fernando.

A solicitud de su viuda, se trasladaron sus restos a España en el Crucero *Conde de Venadito* junto con los del Almirante Cristóbal Colón.

¹ FUENTE: [Joaquín Bustamante y Quevedo ▷ Información, Historia, Biografía y más. \(wikidat.com\)](#)

