



# BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Junio 2023  
Número 24



**ESCUA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE ARMAS NAVALES  
(ETSIA-JEPER-DIENA)**



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](https://publicaciones.defensa.gob.es)

[cpage.mpr.gob.es](https://cpage.mpr.gob.es)

Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autor y editor, 2023

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

Depósito legal M 19552-2023

Fecha de edición: junio 2023

Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

NIPO 083-17-202-1 (edición en línea)  
ISSN 2559-6458 (edición en línea)

Las opiniones emitidas en esta publicación son de 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 ©.

**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<sup>a</sup> José Pizarro García

**Índice**

<b>EDITORIAL</b>	Pág. 2
<b>ESTUDIOS DE ESPADA EUROPEA CON INFLUENCIA CAROLINGIA-VIKINGA. SIGLOS X/XI</b>	Pág. 4
CN (CIA) DR. D. Jesús Ibarz Fernández	
<b>UNA ALTERNATIVA RIGUROSA Y FLEXIBLE PARA LA CERTIFICACIÓN SAFETY DE SUBMARINOS</b>	Pág. 19
CN (CIA) DR. D. Pedro Antonio Casas Alcaide	
<b>FUNDAMENTOS CFD DE APLICACIÓN EN INGENIERÍA III: DISCRETIZACIÓN</b>	Pág. 70
CC (CIA) DR. D. Julio Manuel Pernas Urrutia	
<b>ANÁLISIS DE RIESGOS PARA LA SEGURIDAD DE LOS SISTEMAS EN OPERACIÓN Y SOPORTE (OSHA) EN BUQUES DE GUERRA</b>	Pág. 84
CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro	
D <sup>a</sup> María Penedo Baeza	
D <sup>a</sup> Sonia Bellón Pose	
<b>ESTRATEGIAS/INVERSIONES PARA GANAR VENTAJAS COMPETITIVAS EN LA INDUSTRIA DEL SECTOR NAVAL (CONSTRUCCIONES Y REPARACIONES) ESPAÑOL EN LA ERA DE LA ECONOMÍA DEL CONOCIMIENTO</b>	Pág. 95
TN (CIA) D. Jesús Moreno Rodríguez	
<b>BIOGRAFÍA: JORGE PRÓSPERO DE VERBOOM</b>	Pág. 108

Foto portada: "Amanecer en Ferrol"

Autor: AN (CGA) D. Carlos Ameyugo Fernández del Campo



**EDITORIAL**

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

Estimados amigos y compañeros:

Una vez más estamos en el ecuador del año. El curso académico ha terminado con la Ingeniería de Sistemas incorporada plenamente en los currículos de esta Escuela, tanto de Formación como de Perfeccionamiento. Hasta la fecha, un total de 43 alumnos han cursado materias de Ingeniería de Sistemas.

Hemos arrancado también el laboratorio 4.0 con algunos ensayos de los UUV (Underwater Unmanned Vehicle). Un mundo del que hay mucho por estudiar y del que se pueden obtener muchas conclusiones, incluyendo el uso de la inteligencia artificial para el control u operación de estos vehículos submarinos.

En este número, en el artículo «*Estudio de espada europea siglos X/XI*», del que soy autor, documento la historia de los procesos de soldadura y forja de las espadas medievales, en los que se aunaban las propiedades del hierro y acero en un mismo elemento: la hoja de la espada.

El hierro es tenaz y maleable, el acero es duro y frágil. Estas propiedades contrapuestas, bien armonizadas, dan lugar a lo que se desea de una hoja que sea dura, tenaz y flexible.

El acero con ciertos tratamientos térmicos puede hacerse duro y flexible a la vez. El hierro, como hemos comentado, es maleable y tenaz. Si combinamos capas de hierro con acero podemos conseguir un material con todas las propiedades deseadas, un material duro, tenaz y flexible.

También realizo un pequeño estudio sobre una espada que según los indicios, corresponde a los siglos X/XI d.C. Deseo que lo encontréis interesante.

La palabra griega «*téchne*» significa arte, técnica, oficio, procedimientos, esto es, la descripción de las pautas para llegar a un fin.

La palabra tecnología tiene las raíces de «*téchne*», definida antes, y «*logos*» que en griego significa estudio o tratado. La tecnología es un proceso combinado de pensamiento y acción para la búsqueda de soluciones prácticas y útiles. En el artículo «*Estudio de espada europea siglos X/XI*», se pone de relieve que el proceso de forjado y templado no se comprendía del todo por los romanos, y celtas, pero se seguía y al final se tenían resultados eficaces y válidos. Esa es la esencia de la ingeniería, encontrar resultados prácticos y útiles. El método científico aparecería en el siglo XVII, con el «*Discurso del Método*». Descartes definiría las reglas a seguir para llegar a un conocimiento que puede ser considerado válido desde el punto de vista de la ciencia. La ciencia estudia los fenómenos naturales y procura dar respuesta y ver cómo funciona el universo estableciendo procesos, reglas y sistemas. La tecnología es un conjunto de conocimientos y técnicas que si se aplican con un orden y lógica permite modificar nuestro entorno para satisfacer nuestras necesidades. La

tecnología utiliza el conocimiento generado por la ciencia para mejorar la técnica y generar soluciones. Y la ciencia utiliza la tecnología para sus avances. Antes del método científico, sí se puede hablar de ciencia con Arquímedes, Hipócrates, Pitágoras y Euclides. En relación a la forja de las espadas celtas romanas y posteriormente medievales, si no se seguía el método no había resultados. Es indudable que sí existía tecnología con los romanos y celtas y desde luego de posiblemente algo de ciencia incipiente, control de los cambios del material por los cambios de temperatura, procesos de carburación y forjado etc.

Volviendo a las cuestiones docentes, se ha aprobado el nuevo currículo para la Enseñanza de Formación de nuestros ingenieros que comprende un año en la ENM, incluyendo un embarque de 12 semanas como formación específica naval, y un segundo año de formación en la ETSIAN, que incluye otro embarque de 10 semanas y 4 semanas de prácticas en Arsenales.

Ya falta menos para arrancar el Doctorado en Ingeniería de Armas Navales, os animo para que sondeéis posibles temas de interés, vayáis despertando inquietudes al respecto y busquéis posibles líneas de investigación.

Hemos despedido a la segunda promoción de ingenieros del Máster en Ingeniería de Armas Navales. En septiembre recibiremos otros 3 nuevos alumnos de este Máster.

Os quiero agradecer a todos vuestra colaboración, sin la cual sería imposible la publicación de estos Boletines.

El fin de curso está cercano, aprovecho para deseáros un muy feliz verano.

## ESTUDIO DE ESPADA EUROPEA SIGLOS X/XI

CN (CIA) D. JESUS IBARZ FERNANDEZ

Doctor Ingeniero Industrial

Ingeniero Aeronáutico



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

### 1. Introducción.

Las espadas, desde su aparición, han formado parte de la cultura de cada uno de los diversos pueblos que las han empuñado. Podría afirmarse que cada tribu o civilización tenía sus propias armas con sus características.

En este artículo vamos a centrarnos en el estudio de las diferentes formas de forja de las espadas medievales europeas, y también cómo todas evolucionaron al mismo modelo y forma de forja, para dar la espada medieval. No sólo en forma sino en factura. Esto es lo que darwinianamente se conoce como evolución convergente.

Se trata de un arma del pasado. Sin embargo, existen algunos puntos bastante interesantes desde el punto de vista didáctico, en común con el presente, en cuanto a la evolución de los sistemas de armas.

De distintos puntos geográficos y culturas, los diversos grupos humanos acaban influenciándose unos a otros, en su concepto de empleo y necesidades, longitud, filo, centro de gravedad, contrapeso, etc. Llegando a una misma solución de arma. Lo mismo cabe decir para la tecnología empleada, la forma de forja.

Es importante recalcar que los patrones geométricos seguidos en los distintos métodos de forja, así como, las estructuras conseguidas y el apilamiento de hierro y aceros, eran básicamente un método de ensayo y error, nada científico, sin entender el proceso enteramente ni por los romanos ni por los celtas, vikingos, merovingios o visigodos. Podemos decir que en estos casos se aplica tecnología, conjunto de conocimientos y técnica que aplicados en orden lógico, permiten conseguir la solución útil y práctica. Muy lejos del método científico cartesiano del siglo XVII y en las antípodas de los pensadores griegos, creadores de la lógica deductiva y del métodos axiomático que consideraban innecesaria y a veces vejatoria la comprobación experimental de las conclusiones.

Las propiedades deseadas se consiguen por tanto, mediante la unión empírica de hierros con diferentes propiedades y métodos, de diferentes orígenes y concentraciones de oligoelementos. Tales estructuras permitieron al herrero localizar propiedades deseadas a lo largo de la hoja, mediante estas uniones experimentales.

Los distintos modelos de forja pueden decirse que son una adaptación a la tecnología existente en su momento, a la adaptación de las necesidades bélicas y a la confrontación de las amenazas y peligros por un lado y por otro, a los retos y oportunidades.

La combinación de resistencia, tenacidad, filo y flexibilidad exigidos a la espada y casi imposibles de encontrar en un solo material se conseguirán según los distintos métodos de forja que vamos a citar en el artículo.

El acero es duro pero frágil, el hierro es maleable y blando. Con ciertos tratamientos térmicos, el acero se puede convertir en flexible y duro. La combinación de hierro y acero dará como resultado espadas con buenas propiedades mecánicas en su conjunto: tenacidad, flexibilidad y dureza.

En esta carrera por conseguir el mejor armamento los celtas iban a la cabeza por delante de los romanos en cuanto a calidad, no obstante estos últimos sobrepasaban a los anteriores en producción, dando el resultado militar que ya conocemos.

La mayoría de los estudios sobre esta materia están dispersos a lo largo de la literatura internacional, en ocasiones inaccesibles.

Con frecuencia se ha expresado la necesidad, en encuentros nacionales e internacionales, para recoger información sobre ciertos tipos de espadas sobre todo de este periodo.

Finalmente analizamos una espada que según lo razonado anteriormente, factura y forma pudiera pertenecer a los siglos X/XI.

## **2. Sobre la forja de espadas medievales.**

Se pueden considerar básicamente 2 tipos de forja en las espadas medievales (periodo 476 d.C.-1495 d.C.), la forja por soldadura patrón y la forja por laminación, también conocida como forja por apilamiento.

Anteriormente a estos métodos existía lo que se conoce por forja por apilamiento irregular o al azar. Ésta consistía en ir amontonando distintos elementos de hierro y acero uno encima de otro. Se calentaban 2 piezas de hierro/acero hasta 1300-1400 °C (hierro blanco) para formar una pieza mediante la forja de ambas. En este proceso, el objeto, en nuestro caso la hoja de la espada, se conforma por deformación plástica producida de la aplicación de fuerzas de compresión. Se solía poner una capa de acero en el filo de un hierro dulce para hacer el conjunto más resistente. Este apilamiento de elementos no conseguía llegar a una homogeneidad en la distribución de las piezas apiladas puesto que el horno no permitía hacer piezas de grandes dimensiones, y las temperaturas citadas sólo se conseguían localmente. Aparecían entonces núcleos y zonas no uniformes con distintas concentraciones de carbono y, por tanto, con distintas propiedades mecánicas. Se logran así aceros en partes locales de la hoja. Con la mejora de la temperatura de los hornos y de las formas de apilamiento de los distintos elementos de hierro y acero, surgiría el soldado patrón y más adelante la soldadura por laminación o apilamiento.

Tras la aparición de la soldadura patrón, siguieron fabricándose espadas con la soldadura por apilamiento irregular. Por tanto coexistieron espadas de soldadura patrón y soldadura por apilamiento irregular, debido sobre todo a que el forjado por apilamiento irregular era la forma más rápida y barata de añadir acero a una pieza de hierro.

Algo parecido puede decirse que la soldadura por laminación, desbancaría los anteriores modelos de producción pero hubo una etapa de transición en la que coexistieron el nuevo método y los anteriores.

La primera forja nueva que apareció en la Edad Media, el patrón soldado, surgió por primera vez en el siglo III y desapareció en el X. La segunda forma de forja, el procedimiento de laminación o forja por laminación, fue empleado básicamente a partir del siglo X.

### **Patrón soldado o soldadura patrón (en el mundo anglosajón pattern welding)**

La fundición temprana de hornos de reducción hierro también conocidos como hornos bajos, de floración o bloomeries<sup>1</sup>, (floraciones) consistía en un tratamiento del mineral por etapas. Al final producen unos aglomerados heterogéneos de hierro metálico más o menos carburado, de ganga y de carbón vegetal.

Esta reducción de mineral de hierro sin fundición se considera el proceso más antiguo para la obtención de acero.

La etapa inicial se conoce como calcinación del mineral, el hierro no se encuentra en estado puro, sino formando parte de numerosos minerales, habitualmente en forma de óxido generalmente en forma de hematita, limonita, magnetita o siderita a la que se le quita la humedad y se hace más deleznable. Se metía el mineral calcinado y desmenuzado para tratarlo mejor. Posteriormente se reducía químicamente y se obtenía el hierro. Se realizaban conversiones sucesivas de hematita (del mineral de hierro) en magnetita, la magnetita en óxido ferroso y el óxido ferroso en hierro por reducción química con monóxido de carbono o hidrógeno, por poner un ejemplo, pues eran numerosos los distintos caminos de obtención del hierro, empezando por los minerales de partida. El resultado de todo ello es un hierro poroso conocido como hierro de esponja que no es útil por sí solo, pero puede procesarse para crear hierro forjado o acero. La esponja se saca del horno, se golpea y se dobla repetidamente con martillos pesados para separar la escoria, oxidar el carbono o el carburo y soldar el hierro.

Como puede suponerse, la forma de forja anterior al patrón soldado (apilamiento irregular) era errática y muy compleja. Este tipo de forja surgió de la dificultad lógica de generar altas temperaturas en los hornos para tratar el hierro. El hierro tienen el punto de fusión a los 1536°C y el bloomery no genera temperaturas lo suficientemente altas como para fundir el hierro y el acero. En la ferrería o bloomery la transformación de reducción empieza a los 600-700°C y alcanza los 1200-1250°C.

Este proceso generalmente crea hierro forjado con aproximadamente un 3% de escoria y una parte de un 1% de otras impurezas. El tratamiento posterior puede agregar cantidades controladas de carbono, lo que permite varios tipos de tratamiento térmico. Las escorias empiezan a fundirse a unos 1100°C cuando empieza a separarse el hierro de la escoria. Se reduce el mineral de óxido de hierro en partículas de hierro puro, que luego se sueldan en una masa de hierro esponjoso, antes comentado, que consiste en grumos de impurezas en una matriz de hierro relativamente puro, con un contenido de carbono en torno al 0,06%. La flor debe calentarse y martillarse para eliminar las impurezas, lo que da como resultado el hierro forjado relativamente blando. El hierro es demasiado blando para hacer un buen filo; un buen filo requiere la adición de carbono para fabricar acero. Al calentar varillas de hierro delgadas en una forja rica en carbono, se podría agregar

---

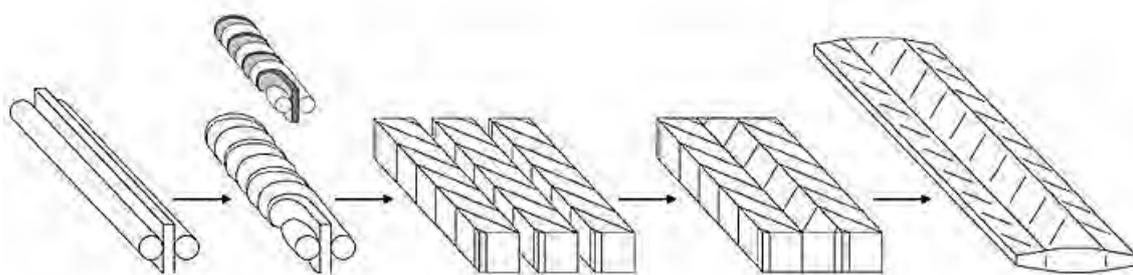
<sup>1</sup> Los primeros procesos efectuados en Eurasia y África realizaban la fundición en pequeños hornos troncocónicos, donde la temperatura no era lo suficientemente alta para que el hierro se fundiera completamente. Este tipo de hornos se conocía como de floración o bloomery. El bloomery fue la primera forma de fundición, si lo podemos llamar así, capaz de producir hierro, hierro a partir de sus óxidos. Los bloomeries producen una masa porosa de hierro y escoria llamada floración, o Bloom en el mundo anglosajón. La mezcla de escoria y hierro en flor, denominada esponja de hierro, generalmente se consolida y luego se forja en hierro forjado. El horno de floración produce el hierro en estado sólido, pues el proceso se realiza a una temperatura más alta que la requerida para la reducción del  $Fe_2O_3$  a metal puro, pero más baja que el punto de fusión del Fe. El proceso de forja usado en él, es el mencionado patrón soldado.

carbono a la superficie, formando una capa delgada de acero en la superficie a través de un proceso llamado carburación o formación de carburos en la estructura. Desde el comienzo de la Edad del Hierro, alrededor del 1200 a.C., este método era la única forma de obtener un buen acero, como hemos expuesto. Obtener el nivel adecuado de carbono era un arte y era muy importante para el producto final. Demasiado carbono, o demasiados oligoelementos incorrectos, y el acero resultante se vuelve demasiado duro y quebradizo, lo que puede resultar en una falla catastrófica de una espada; muy poco carbono y la espada no sostendrá un filo. La espada ideal es aquella con un filo duro y afilado, y lo suficientemente resistente como para doblarse, pero no para romperse.

Para evitar los inconvenientes mencionados se seguía el método de la **soldadura patrón** cuyas ventajas eran dobles. Primero, dado que no se podía producir una barra homogénea de contenido de carbono controlado (quizás como consecuencia de fraguas muy pequeñas que no podían extender de manera uniforme la temperatura a lo largo de la hoja), 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. Segundo, eso produjo un efecto decorativo muy buscado. De este modo se juntan dos propiedades que pueden ser contradictorias en un material, la dureza y elasticidad por un lado (hierro carburado o acero) y la tenacidad y ductilidad por otro (hierro), combinadas por capas o barras. Las capas delgadas de acero estampado se superponían a un núcleo de hierro blando, haciendo que las espadas fueran mucho mejores ya que el hierro les dio un núcleo tenaz y dúctil que absorbería el impacto de los golpes de espada para evitar que la hoja se doble o se rompa.

En definitiva las espadas se fabricaban a partir de barras de acero, tiras delgadas de hierro, retorcidas según distintos patrones, patrón de espiga o espiral y se soldaban, plegaban y forjaban de varias maneras, hasta formar una hoja que tenía un cromatismo característico en forma de pelo de macho cabrío, ondas o espigas y que componía el núcleo central de la hoja. A ésta se le agregaban dos filos de alto contenido en carbono que se forjaban, afilaban y pulían. La parte central de la hoja también se trabajaba en ambas caras, para crear una acanaladura longitudinal poco profunda, el vaceo, que hacía más ligera la hoja sin reducir su efectividad. Se conseguía así un patrón de espiga o espiral y un material muy parecido al acero con unas propiedades más uniformes y controlables.

El resultado era una hoja elástica de doble filo, fina y flexible, pero dura y resistente.



**Figura 2.** Diagrama del proceso etapa por etapa para la construcción de soldadura patrón (Fuente: el autor)

El diagrama de la figura 2 muestra el proceso etapa por etapa para la construcción de soldadura patrón o soldadura por patrón (en el mundo anglosajón PW, pattern welding).

Se destaca en gris en la imagen la franja dorsal que se retuerce con dos varillas (usadas para hacer un haz) más pequeña que acompaña a la segunda etapa. Los tres paquetes finalmente se sueldan y se forjan juntos.

El método de soldadura patrón fue descubierto y acuñado por Herbert Maryon, conservador del Museo Británico y arqueólogo. En su artículo de 1948, *A Sword of the Nydam Type, from Ely Fields Farm, near Ely*<sup>2</sup>, comenta: *la soldadura de estas espadas representa una operación excesivamente difícil. No conozco el trabajo de un herrero más fino... he llamado a la técnica "soldadura de patrón"*.



**Figura 3.** Imagen de rayos X de una hoja merovingia de Finlandia ca. 650–700 d.C.  
(Fuente: Archeometallurgy related to swords <sup>3</sup>)

Imagen de rayos X de una hoja merovingia de Finlandia circa. 650–700 d.C. La estructura estampada surge de dos aceros de bajo carbono retorcidos juntos en el centro de la hoja y encerrados por aceros plegados<sup>4</sup>. Por este método la hoja se solía forjar a partir de una serie de tiras delgadas de hierro. Estas pueden ser en un número de hasta media docena. Se plegaban y forjaban de varias maneras. Así se conseguía un patrón de espiga o espiral y un material muy parecido al acero con unas propiedades más uniformes y controlables.

---

<sup>2</sup> *A Sword of the Nydam Type, from Ely Fields Farm, near Ely*. Proceedings of the Cambridge Antiquarian Society 41. Vol 41, pp. 73-76 Maryon, Herbert. <<https://doi.org/10.5284/1072860>>.

<sup>3</sup> Archeometallurgy related to swords Jeffrey Wadsworth, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH 43201,

<sup>4</sup> *Ibidem* 3



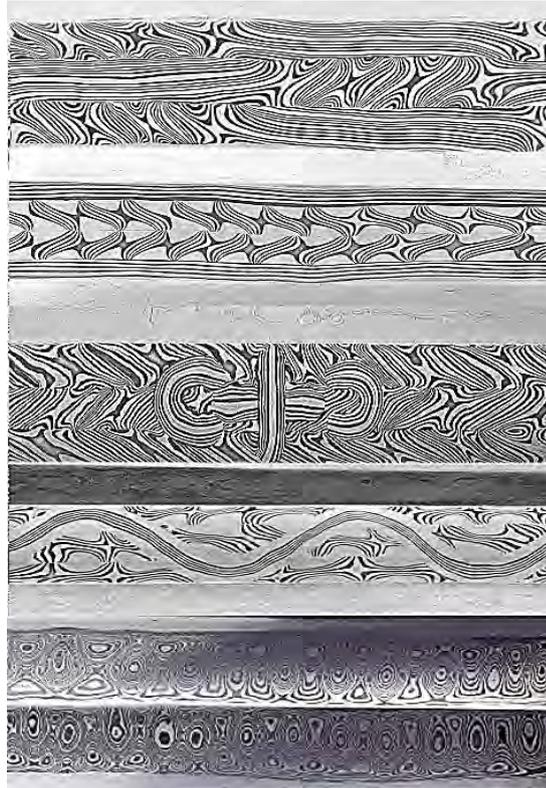
**Figura 4.** Espada del periodo de las migraciones germanas.

(Fuente: La espada de doble filo del Período de la Migración Germánica <sup>5</sup> Statens Historiska Museum, Estocolmo, 10658:26, tabla LIV, pág 278).

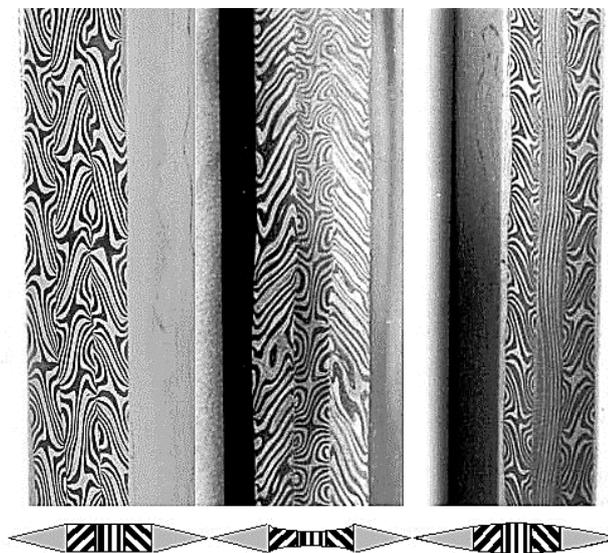
En la figura anterior se aprecia la parte central de la hoja con los bellos resultados de la construcción del modelo soldadura patrón.

---

<sup>5</sup> Das zweischneidige Schwert der germanischen Völkerwanderungszeit, La espada de doble filo del Período de la Migración Germánica, Behmer, Elis Stockholm College. Tryckeriaktiebolaget Svea , 1939. [history.org.ua/LiberUA/Behmer\\_1939/Behmer\\_1939.pdf](http://history.org.ua/LiberUA/Behmer_1939/Behmer_1939.pdf)



**Figura 5.** Patrones en espadas soldadas con modelo patrón. Se aprecia la parte central de diferentes hojas con distintos y bellos resultados geométricos. (Fuente: Patterns in pattern-welded swords. Patrick Barta <sup>6</sup>)

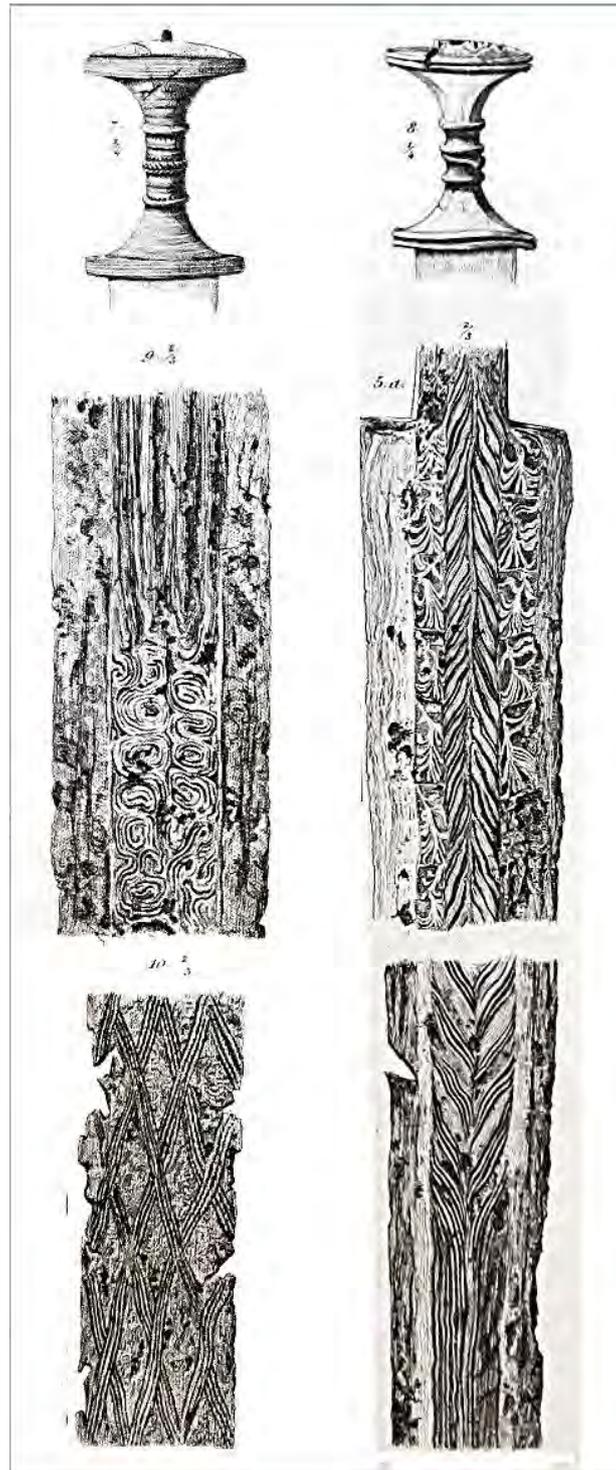


**Figura 6.** Patrones en espadas soldadas con modelo patrón. Vista de la hoja desde un plano paralelo a esta y su sección transversal. (Fuente: Patterns in pattern-welded swords. Patrick Barta <sup>7</sup>)

Se observa la zona central con el modelo patrón y los laterales plegados y soldados.

<sup>6</sup> Patterns in pattern-welded swords. Patrick Barta  
<<http://www.templ.net>>

<sup>7</sup> Ibídem 6



**Figura 7.** Patrones en espadas soldadas con modelo patrón.  
 Dibujos en el libro de Engelhardt<sup>8</sup> que muestran rayas, patrones de torsión  
 (chevron and palmette patterns, modelos de macho cabrío y hoja de palma)

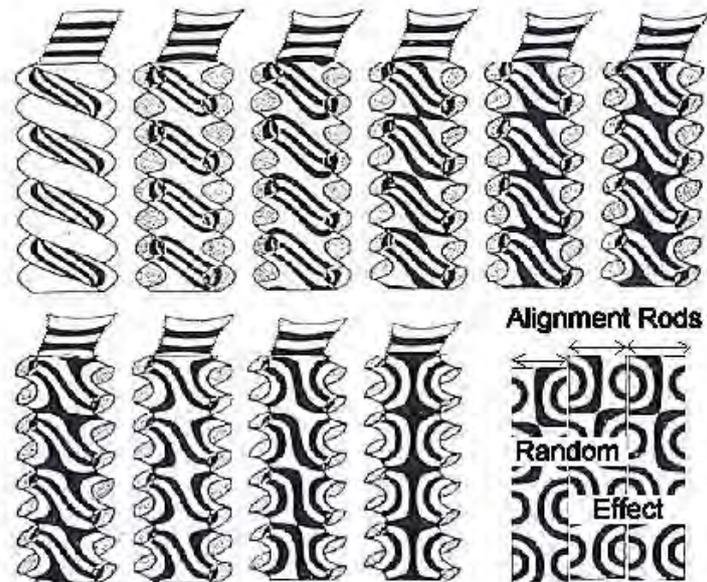
<sup>8</sup> Engelhardt; photographed in the library of the «Schleswig-Holstein Landesmuseum»  
[https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap\\_b/advanced/tb\\_3\\_3a.html](https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_b/advanced/tb_3_3a.html)



**Figura 8.** Patrones en espadas.

(Fuente: Spatha of Ingersheim: Landesmuseum Württemberg / H. Zwietasch/ P. Frankenstein<sup>9 10</sup>).

Arriba se muestran las hojas actualmente y debajo cómo serían en su estado original.



**Figura 9.** Patrones en función de en espadas.

(Fuente: Europäische Waffen mit Damaszierung<sup>11</sup>. The metallurgy, development, and purpose of pattern welding<sup>12</sup>)

Lo que vemos en esta figura son los dibujos calculados de una estructura ideal con capas perfectamente paralelas. En la parte superior se muestra la sección transversal de las varillas rayadas. Esta imagen, parte inferior, muestra también cómo se puede obtener una línea ondulada ininterrumpida mediante la alineación adecuada de líneas perfectamente combinadas.

<sup>9</sup> Spatha of Ingersheim: Landesmuseum Württemberg / H. Zwietasch/ P. Frankenstein

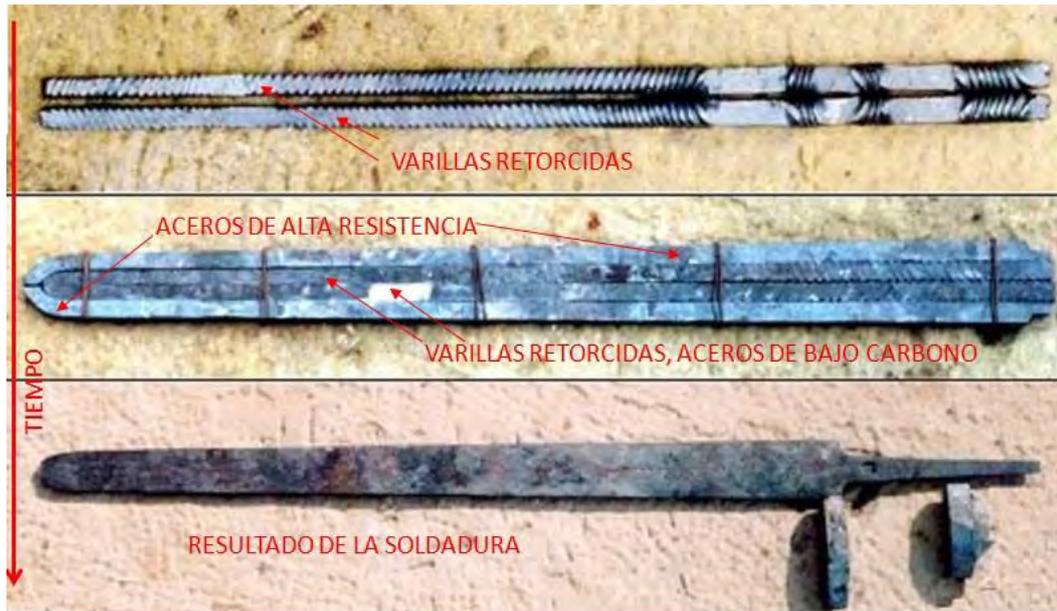
<https://bawue.museum-digital.de/object/19463?navlang=de>

<sup>10</sup> Merowinger Damascene Sword

[http://dtrinkle.matse.illinois.edu/MatSE584/kap\\_5/illustr/i5\\_1\\_6.html](http://dtrinkle.matse.illinois.edu/MatSE584/kap_5/illustr/i5_1_6.html)

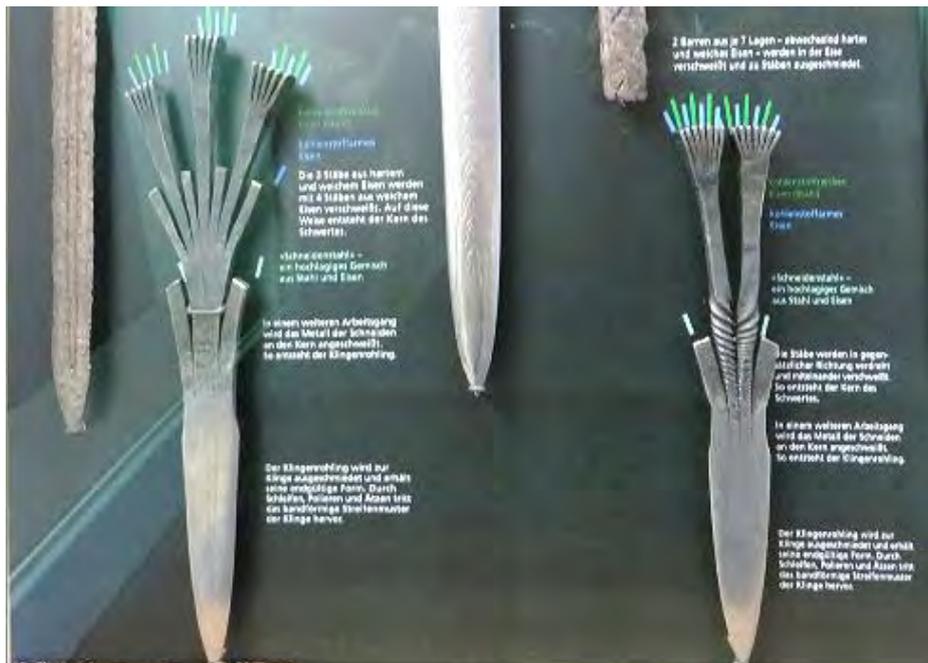
<sup>11</sup> Europäische Waffen mit Damaszierung. Archäologisches Korrespondenzblatt 12 (1982) pp 381 – 388

<sup>12</sup> The metallurgy, development, and purpose of pattern welding Brian. Gilmour Historical Metallurgy 51(2) for 2017 (published 2019) 57–70



**Figura 10.** Patrones en función. Disposición de las varillas a soldar y soldadura.  
(Fuente: Patterns in pattern-welded swords. Patrick Barta <sup>13</sup>)

La siguiente figura ilustra bastante bien el proceso. Uno de tantos, ligeramente distinto al anterior.



**Figura 11.** Ejemplo de soldadura patrón con "varillas rayadas" rectas y retorcidas.  
(Fuente: Landesmuseum Schleswig-Holstein in Schleswig, Alemania<sup>14</sup>).

<sup>13</sup> *Ibidem* 6

<sup>14</sup> Landesmuseum Schleswig-Holstein in Schleswig, Alemania  
[Critical Museum Guide: Landesmuseum Schleswig-Holstein in Schleswig, Germany \(uni-kiel.de\)](http://www.uni-kiel.de)



**Figura 12.** Espada Alta Edad Media. (Fuente: National Military Museum, Soesterberg, Países Bajos)



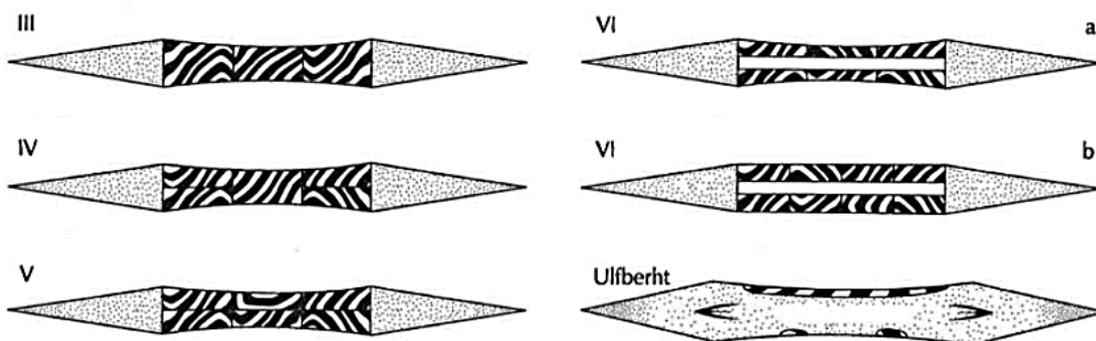
**Figura 13.** Espada Alta Edad Media. (Fuente: National Military Museum, Soesterberg, Países Bajos)



**Figura 14.** Espada Alta Edad Media. (Fuente: National Military Museum, Soesterberg, Países Bajos).

La hoja realmente consiste en un núcleo central construido con patrón soldado y con chapa soldada a los dos lados, mostrando esta estructura en ambos lados, en las dos caras de la hoja. Parece que el patrón de soldadura es solo la parte superior de una barra de torsión, probablemente menos del 25% del grosor original, y bastante consistente en toda la hoja. En la siguiente figura se muestran posibles secciones de la hoja.

#### Cross-Sections Showing Variations in Construction of Viking Age Double-Edged Sword Blades

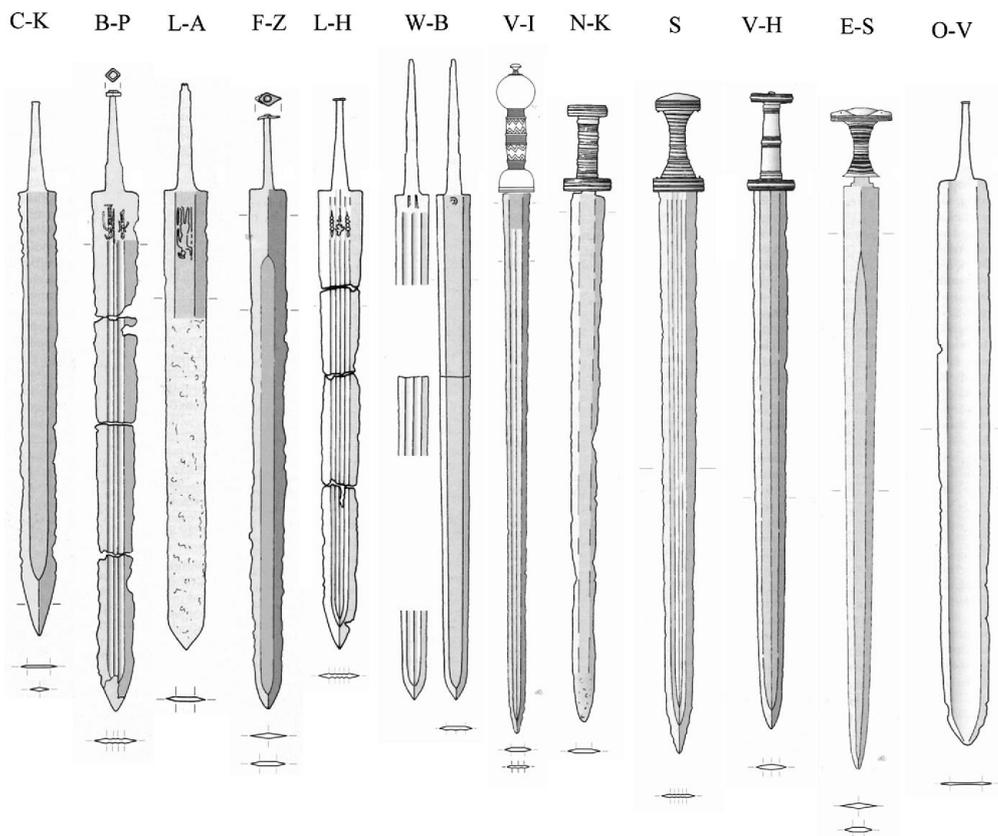


**Figura 15.** Secciones de espadas construidas con el modelo de soldadura patrón en la parte central. Espada Alta Edad Media. (Fuente: The Use and 'Life-Cycle' of Viking Age Swords<sup>15</sup>, DOI:10.13140/RG.2.2.34186.77767).

Mostrando las capas de acero soldado con patrón y diferentes configuraciones. Muchas espadas vikingas

<sup>15</sup> The Use and 'Life-Cycle' of Viking Age Swords, Paisnel Callum, University of Winchester March 2016, DOI:10.13140/RG.2.2.34186.77767

tenían esta configuración, en particular las famosas espadas Ulfberht. De hecho este nombre era una marca, una especie de logo, de la que incluso hubo imitaciones en la época.



**Figura 16.** 12 Tipos de espadas del primer milenio encontradas en el norte del Imperio Romano. (Fuente: Die Schwerter und Die Schwertscheiden. Katalog, Tafeln und Fundlisten<sup>16</sup>)

El libro *Die Schwerter und Die Schwertscheiden. Katalog, Tafeln und Fundlisten* clasifica las espadas encontradas en el norte de Imperio Romano, de la primera mitad del primer milenio, al igual que hicieron Jan Petersen<sup>17</sup> y Oakeshott<sup>18</sup> con las espadas medievales.

Por lo general, cada clase tiene varias subclases, e incluso las espadas de una subclase pueden verse bastante diferentes.

Para cada tipo de estas espadas se elaboró un mapa que muestra dónde se encontraron las espadas. Para cada una de ellas se levantó un mapa de su distribución.

La clasificación se basa en muchas características que no siempre son evidentes a primera vista.

<sup>16</sup> Illerup Ådal (Marcin Biborkis and Jørgen Ilkjær) Volume 11-12: *Die Schwerter und Die Schwertscheiden. Katalog, Tafeln und Fundlisten*", Jutland Archaeological Society Publications, 2006

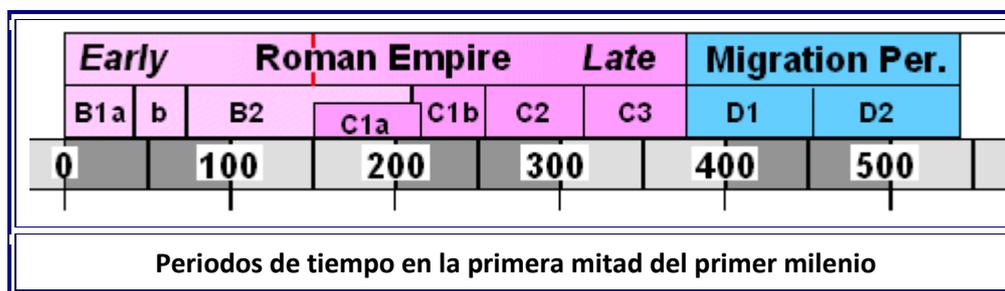
<sup>17</sup> Jan Greve Thaulow Petersen, (1887-1967)), Investigador e historiador noruego entre sus trabajos más famosos se pueden citar la clasificación de las hojas de espadas medievales. Dr. Jan Greve Thaulow Petersen , the norwegian viking swords translated by Kristin Noer

<http://www.vikingsword.com/petersen/ptsn054.html#anchor294927>

<http://www.vikingsword.com/petersen/>

<sup>18</sup> 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)

Se muestra a continuación el sistema general que se emplea para asociar a los distintos grupos de espadas, los periodos temporales definidos como B1a, b , B2, C1a, etc. desde aproximadamente el 0 d. C. hasta 500 d. C.



**Figura 17.** Periodos de tiempo en la primera mitad del primer milenio.

(Fuente: Die Schwerter und Die Schwertscheiden. Katalog, Tafeln und Fundlisten<sup>19</sup>)

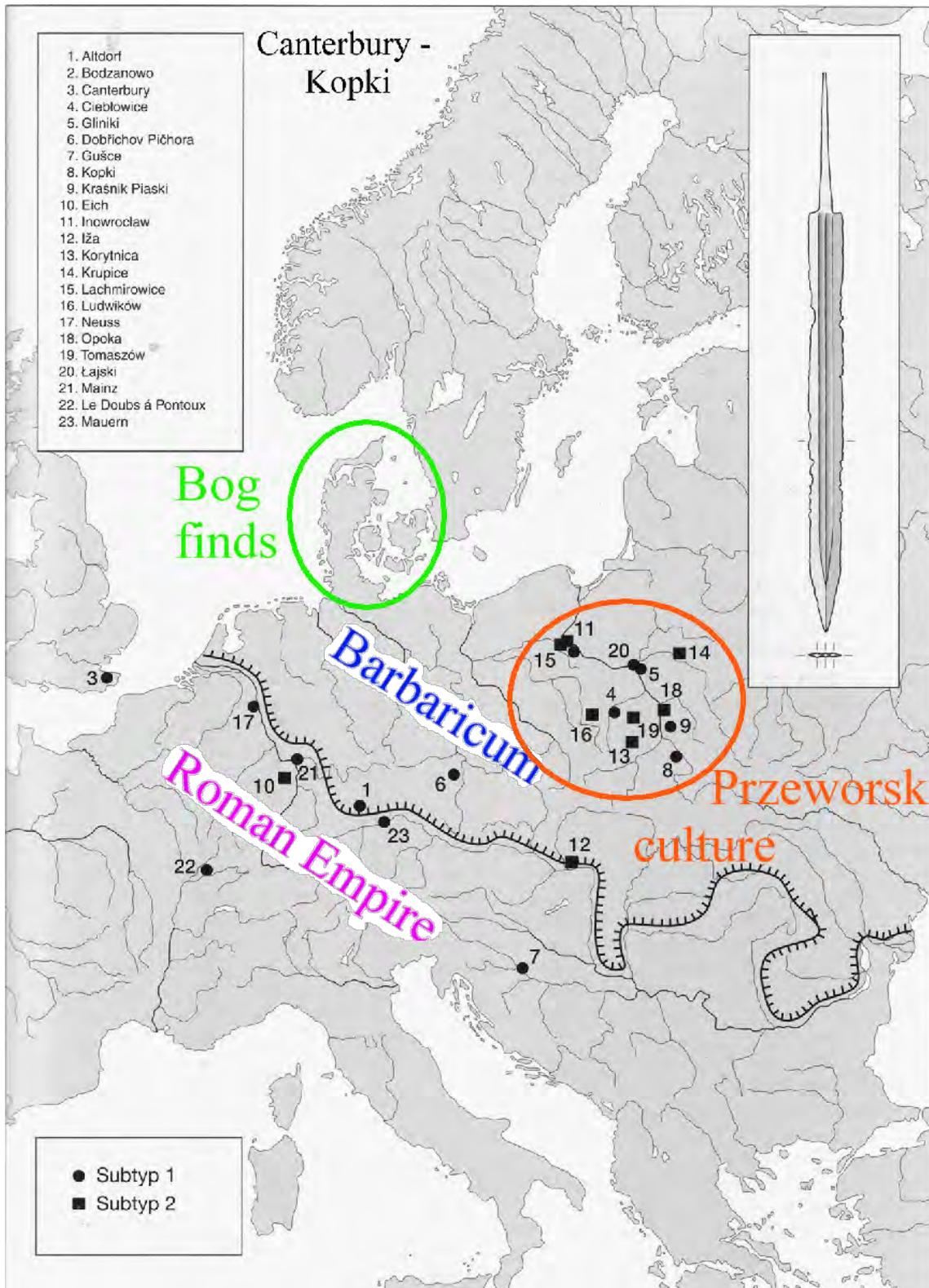
Se emplean 12 grupos con un total de 60 subgrupos y variantes de subgrupos para clasificar un total de 418 espadas. Por ejemplo la Canterbury-Kopki incluye los periodos B2 y C1a, del primer y segundo siglo d.C., Imperio Romano.

Si bien existen algunos puntos comunes para los grupos de espadas, cualquier espada dada es bastante única. Dos espadas que se parecen lo suficiente como para ponerlas en el mismo grupo/subgrupo pueden ser totalmente diferentes con respecto a sus composiciones. Una de las espadas puede ser una pieza con estructura formada por hierro/acero no homogéneos apilados al azar, mientras que otra espada puede ser una obra maestra de soldadura de patrón extremadamente compleja.

La mayoría de estas espadas muy probablemente se fabricaron durante y dentro del Imperio romano y se exportaron al Barbaricum (las tierras de los bárbaros), esta exportación tiene muchos matices. Al menos ahí, en el Barbaricum es donde han aparecido. Pudieran ser diseños fabricados por los romanos y empleado por el Imperio romano que pasarían a manos celtas. O bien fabricadas por los celtas copiando la simbología romana o bien hechas por celtas romanizados dentro del imperio. Lo que es seguro es que el diseño es romano. Las copias del Marte son un poco toscas pero la factura de la soldadura patrón es excelente, en este caso parecen hechas por celtas empleando simbología romana. Tal vez luego se exportaría fuera del imperio, como son los lugares donde aparecieron.

Se han efectuado exámenes metalográficos en espadas encontradas principalmente en países del antiguo Pacto de Varsovia, por ejemplo Polonia. Estos resultados dieron espadas de fabricación simple y la mala calidad que indican que los herreros de allí hicieron copias baratas de espadas romanas más complejas. Se parecen al original (el aspecto no es lo único que define a los grupos) pero no tienen mucho en común con la estructura del original.

<sup>19</sup> Ibídem 16



**Figura 18.** Mapa de (Norte) de Europa, definiendo algunos términos y mostrando dónde se habían encontrado espadas del tipo «Canterbury-Kopki».

(Fuente: Die Schwerter und Die Schwertscheiden. Katalog, Tafeln und Fundlisten<sup>20</sup>)

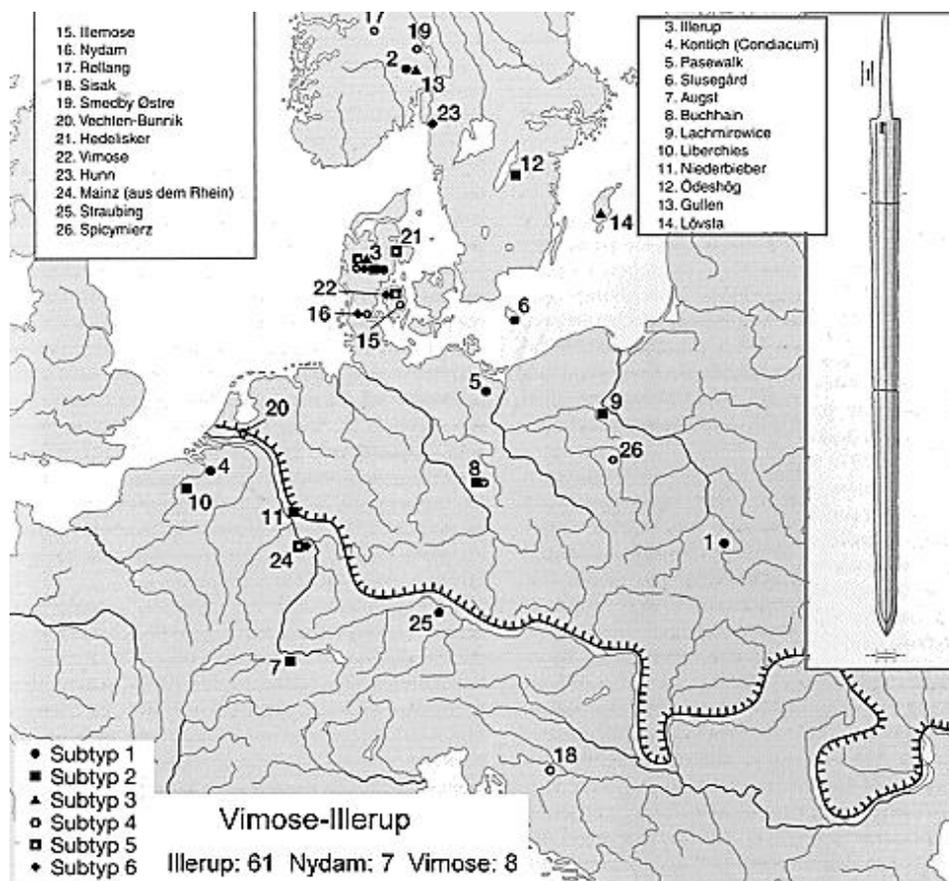
<sup>20</sup> Ibidem 16

Como hemos comentado, para cada tipo de espada se puede levantar un mapa que muestra geográficamente dónde se encontraron las espadas de este tipo. Estas espadas que mostramos aquí, a modo de ejemplo, son las del tipo Canterbury-Kopki.

Según se indica en la publicación citada<sup>21</sup>, este tipo de espada es una Spatha romana de exportación, de ligera a medio ligera destinada a la venta en al «Barbaricum». La mayoría de estas espadas, las del tipo Canterbury-Kopki, con alta probabilidad.

Se fabricaron en los límites físicos del Imperio Romano y se exportaron al Barbaricum, al ser halladas fuera de los límites del Imperio Romano. Como comentamos en general sobre las espadas halladas al norte del Imperio Romano lo que no cabe duda es el diseño romano.

Son espadas para uso a caballo; de 72 cm – 88 cm., que comprenden 2 subtipos o 2 variantes. Encontrados principalmente: 15 en el área de la cultura Przeworsk (Polonia); y 10 alrededor de la zona fronteriza del Imperio Romano. De 14 espadas analizadas, 8 son patrones soldados, 2 primitivos, probablemente apilamiento de hierros aleatorios. Alrededor de 2/3 de estas espadas se fabricaron con un patrón de soldadura complejo, incluidos los patrones de Chevron (pelaje de macho cabrío). Algunos tienen incrustaciones y sellos. Posiblemente la mayoría tienen origen romano.



**Figura 19.** Mapa de (Norte) de Europa, definiendo algunos términos y mostrando dónde se habían encontrado espadas del tipo «Illerup». (Fuente: Die Schwerter und Die Schwertscheiden. Katalog, Tafeln und Fundlisten<sup>22</sup>)

<sup>21</sup> Ibídem 16

<sup>22</sup> Ibídem 16

Otro tipo de espada, la de tipo Illerup, ocupa casi todo el C1b, siglo III, siguiente figura, ya existía el patrón de soldadura, y seguía existiendo el Imperio Romano. Estas espadas presentan hojas estrechas y alargadas (como un estoque), de peso medio, existen 6 subtipos y 4 variantes. Fueron encontradas en su mayoría en pantanos daneses, también en Escandinavia y Barbaricum. Se analizaron 8.

En la soldadura se realizaron buenos patrones de soldadura y buenos apilamientos. De ellas, más del 50 % tenían un patrón de soldadura complejo reconocible. En algunos casos se consiguió un endurecimiento por enfriamiento rápido (templado).

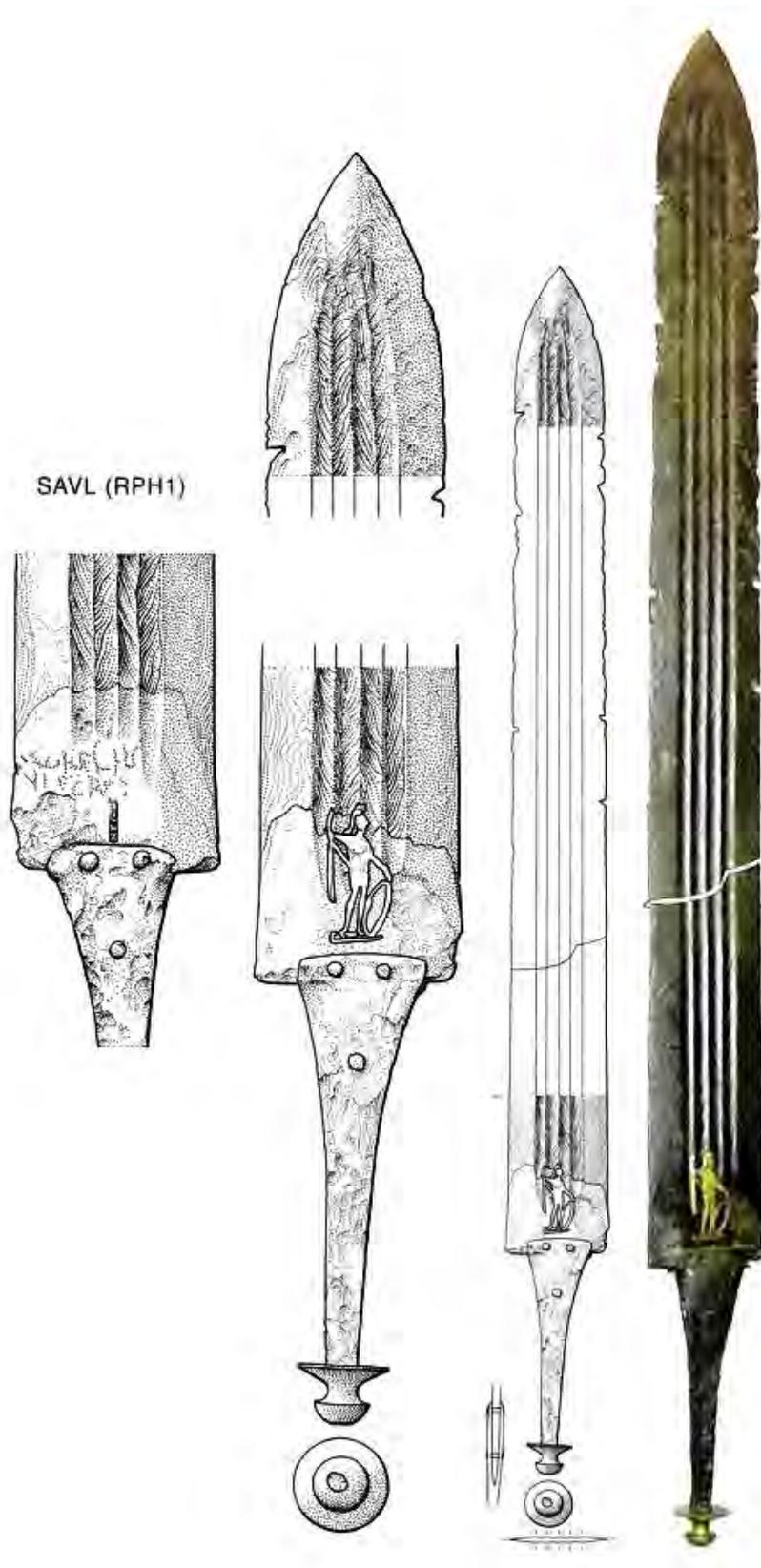


**Figura 20.** Vistas de la espada «Illerup» con incrustación del dios Marte.  
(Fuente: Museo Moesgaard en Aarhus; Dinamarca)



**Figura 21.** Vistas de la espada Illerup con incrustación del dios Marte.  
(Fuente: museo Moesgaard en Aarhus; Dinamarca)

Esta es una espada del tipo Illerup con el grabado del dios Marte, conocida como la espada Illerup Ådal, encontrada en el sitio del mismo nombre. Illerup Ådal es un valle fluvial y un sitio arqueológico ubicado cerca de Skanderborg en el este de Jutlandia, Dinamarca.



**Figura 22.** Croquis y fotografía de la espada Illerup Ådal  
(Fuente Die Schwerter und Die Schwertscheiden. Katalog, Tafeln und Fundlisten<sup>23</sup>)

<sup>23</sup> Ibidem 16

Dentro de las espadas de la calificación Illerup se encuentra la famosa espada Illerup Ådal, casi perfectamente conservada con una incrustación del dios Marte y con la hoja, como puede verse en la figura, forjada según el método de la soldadura patrón.

La figura de Marte es un poco tosca pero la factura de la soldadura patrón se muestra soberbia, en este caso parecen hechas por celtas empleando simbología romana, dentro del Imperio Romano. Es posible que se exportara fuera del imperio, dado el lugar en que apareció. Los dibujos son del libro Illerup Adal Illerup Ådal (Marcin Biborkis y Jørgen Illkjær) Volumen 11-12: Die Schwerter und Die Schwertscheiden. Katalog, Tafeln und Fundlisten<sup>24</sup>, estos volúmenes pertenecen a una serie académica que describe y discute los hallazgos de pantanos daneses. Se muestran dibujos de la mayoría de los artefactos además de muchas fotografías. Todo se discute con gran detalle.



**Figura 23.** Espada del periodo de las migraciones germánica. (Fuente: Colección Andrew Garcia)

<sup>24</sup> Ibídem 16



**Figura 24.** Espada del periodo de las migraciones germánicas. (Fuente: Colección Andrew Garcia)



**Figura 25.** Espada del periodo de las migraciones germánicas. (Fuente: Colección Andrew Garcia)

Las fotografías anteriores presentan con todo detalle la soldadura patrón en una pieza excepcional de doble filo del Período de la Migración Germánica. Se aprecia claramente los aceros de bajo carbono forjados y retorcidos juntos en el centro de la hoja por soldadura encerrados por aceros plegados donde se exige más

dureza<sup>25</sup>. Este tipo de espada se conoce como espada de migración de Behmer, de Elis Behmer<sup>26</sup>. Las espadas hechas durante este periodo (300 d.C.- 586 d.C.) se derivaron de la «spatha» romana, inicialmente importada por los bárbaros con los matices comentados en líneas anteriores y luego fabricada por ellos, que condujo al embrión de lo que será la espada medieval por excelencia, mal llamada espada vikinga.

Pero falta un paso intermedio. Recordemos que la caída del Imperio Romano se produce el año 476 d.C. Posteriormente al periodo de las migraciones, sigue el periodo Vendel<sup>27</sup> en la Europa del norte, mientras que los merovingios y visigodos dominaban el Sur, desde alrededor del 550 d.C. al 790 d.C. En la Europa del sur, en el siglo IV, los romanos tenían a los visigodos como tropas auxiliares, sin embargo, tras las 2 invasiones a Italia y la caída del Imperio Romano en 476, Ataúlfo inicia la dinastía visigoda. En 415 d. C. los visigodos llegan a la Península Ibérica y formarán un estado federado de Roma hasta el año 507 d.C. en que se instituyen como reino, estableciendo la capital regia en Toledo, e iniciándose un largo y complejo proceso de asentamiento y expansión que acabaría en el 711 con la Batalla del Guadalete. El período visigodo en España (415 d.C. – 711 d.C.) casi coincide temporalmente con el periodo Vendel (550 d.C. – 790 d.C.)

Las espadas durante estos periodos (el visigótico y el Vendel) son lisas o con solo ligeras acanaladuras. Muchas hojas contienen bandas soldadas con patrón en el centro. Las hojas se estrechan muy poco hacia la punta. La mayoría de las puntas son redondeadas. Muchas de las empuñaduras estaban hechas con materiales orgánicos que se desintegraron con el tiempo.

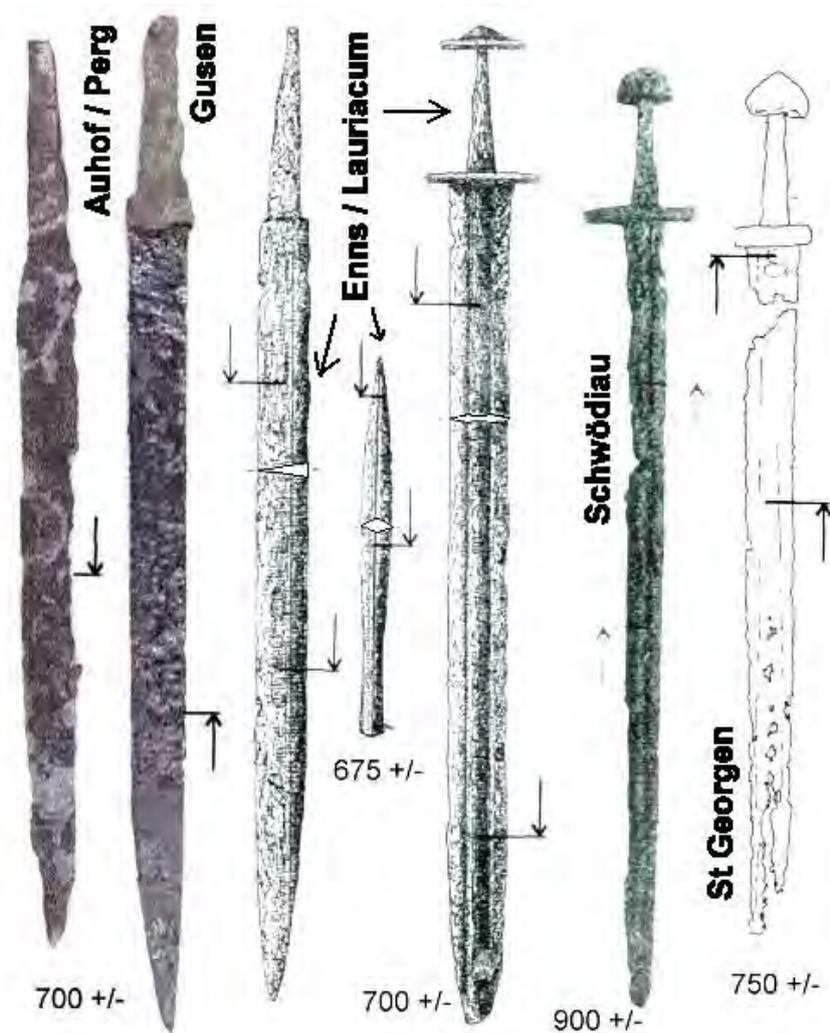
Las espadas de la siguiente figura son un estándar de las espadas del período Vendel (550 d.C.-790 d. C.), la quinta espada por la izquierda (la cuarta es una punta de flecha) se parece bastante a la que vamos a estudiar con detalle en este artículo.

---

<sup>25</sup> Patterns in pattern-welded swords. Patrick Barta <<http://www.templ.net>>

<sup>26</sup> *Ibidem* 3

<sup>27</sup> El nombre proviene de la ciudad de Vendel, ahora en Suecia. Era más una sociedad basada en clanes, manteniendo las tradiciones germánicas y que disfrutaba cierta prosperidad, posiblemente relacionados con una «industria» del hierro bien desarrollada. Las tumbas de los guerreros contienen restos que incluyen espadas forjadas con la soldadura patrón. No queda muy claro si los descendientes de los hombres del periodo Vendel se convirtieron en vikingos o los vikingos los exterminaron y ocuparon su lugar.

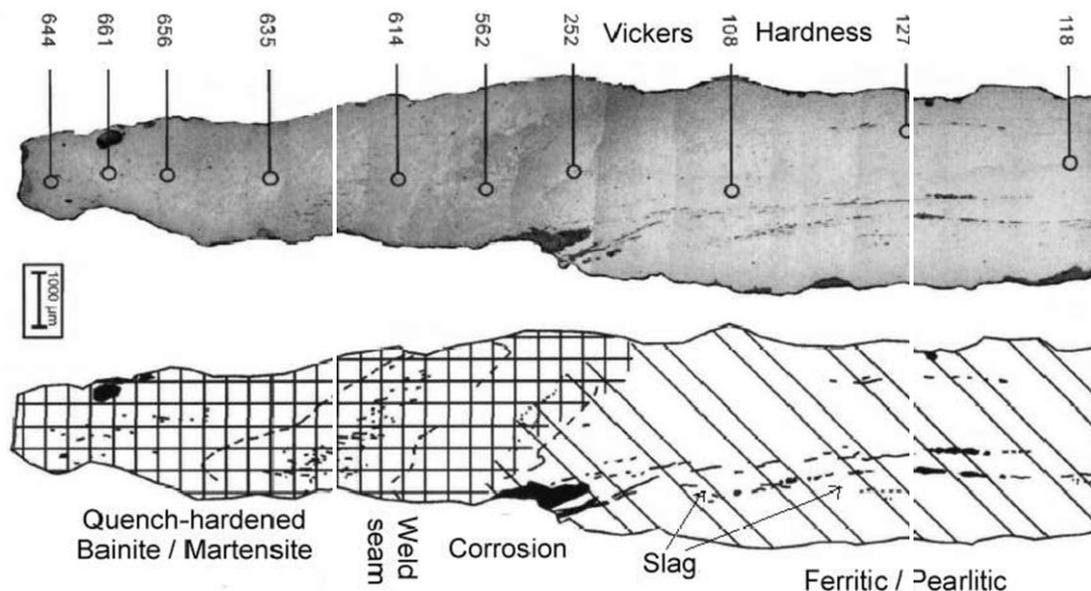


**Figura 26.** Espadas del periodo Vendel

(Fuente: Technological Investigations of Early Medieval Weapons from Upper Austria<sup>28</sup>).

La cifra inferior de cada espada es el año estimado de su fabricación.

<sup>28</sup> Erik Szameit und Mathias Mehofer: «technologische untersuchungen an waffen des frühmittelalters aus oberösterreich», Jb. Oö. Mus.-Ver. (Oberösterreichischer Musealverein), Bd. 147/1, Linz 2002 <[https://www.zobodat.at/pdf/JOM\\_147a\\_0127-0168.pdf](https://www.zobodat.at/pdf/JOM_147a_0127-0168.pdf)>



**Figura 27.** Sección transversal de espadas del periodo de las migraciones germánicas.  
(Fuente: Technological Investigations of Early Medieval Weapons from Upper Austria<sup>29</sup> Sección transversal)

Puede apreciarse mayor dureza en los bordes de la hoja, como es natural, en esta figura al ser la mitad de la sección transversal, la zona izquierda. Esta zona, el filo, es la que tiene que trabajar recibir impactos y cortar, y en la parte central menor dureza para absorber los impactos y distribuirlos en el resto de la estructura. También vemos en la parte ferrítica/perlítica (zona central) la microestructura formada por capas alternas de ferrita y cementita producidas por enfriamiento lento.



**Figura 28.** Tesoro visigótico procedente de Pouan, cerca de los campos cataláunicos, donde tuvo lugar la batalla decisiva contra los hunos en el año 451 d. C. En ocasiones se ha identificado la espada como perteneciente a Teodorico I, que murió en el campo de batalla. El anillo de sello, sin embargo, está inscrito con el nombre gótico, «Heva». (Fuente Musee Saint-Loup y Carole Bel)

Se puede apreciar en la espada inferior la soldadura patrón típica de la época, en este caso de los pueblos germánicos.

<sup>29</sup> Ibídem 28

## Procedimiento de laminación/laminado o apilamiento

Hasta entonces el proceso de hacer hojas que fueran duras y resistentes era necesariamente complejo. Con el paso del tiempo, los tratamientos de carburación previos a la soldadura patrón eran mejores y empezaron a desaparecer las espadas de soldadura patrón alrededor del siglo X cuando se comprendió que podían obtenerse los mismos resultados mediante procedimientos más simples. Efectivamente, los herreros descubrieron cómo refinar el acero hasta el punto de poder hacer una hoja con una sola barra, en lugar seguir el proceso de soldadura patrón que consumía mucho tiempo y era más trabajoso o el proceso de hacer apilamientos locales.

La idea de laminar metales similares o diferentes o aleaciones para formar un material compuesto se ha conocido de siempre. Ya hemos citado el apilamiento irregular de láminas de hierro y acero. Las motivaciones para laminar metales son variadas. Por ejemplo, al cementar o carburizar las primeras formas de hierro forjado, sólo se pueden cementar capas delgadas, por lo que la laminación era una forma de crear este material en cantidades aceptables. Otro motivo es que el material duro, el acero, era escaso y era conveniente intercalarlo entre materiales más asequibles. Desde un punto de vista mecánico, con la laminación se puede optimizar la combinación de resistencia, tenacidad y filo, intercalando materiales con unas u otras propiedades.

El término de carburizado o carburación es más correcto que el de cementado en este tratamiento. La carburación es un tipo de cementación que añade carbono a la superficie de diversas aleaciones, lo que confiere al material una capa exterior dura y resistente al desgaste, al tiempo que conserva un núcleo más blando y dúctil que puede responder mejor a las tensiones sin agrietarse.

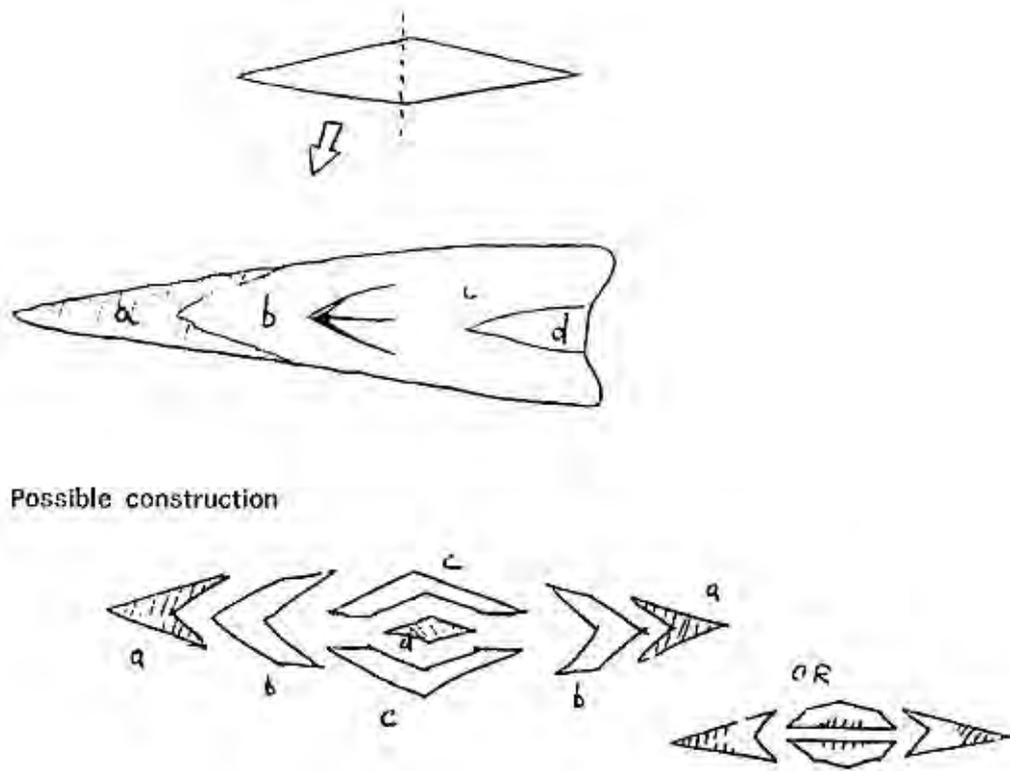
Las hojas de espada de los siglos IX-XI se fabricaban frecuentemente por este nuevo procedimiento de soldadura por laminación, esto es, amontonar, varias piezas de hierro y acero en una barra y forjarlas juntas, sin torcerlas u otra elaboración. Se trata de efectuar un apilamiento de acero/hierro pero con piezas enteras, con barras enteras que ocupan toda la longitud de la hoja, o gran parte de esta. No es el apilamiento irregular anterior, formado por piezas pequeñas (que son las únicas que podía hacerse en los hornos de esos tiempos anteriores a los siglos IX-XI). Estas piezas enteras podían convertirse en varias capas mediante el apilamiento directo de una capa sobre otra o el plegado y forjado. En este último caso se parte de distintas capas, pero el número de éstas no aumenta con el añadido de más capas, sino mediante plegados sucesivos, el número de capas aumenta exponencialmente a la razón de  $2^n$ , siendo «n» el número de plegados.

Con este nuevo proceso se podría obtener mejoras en la dureza mediante un tratamiento térmico adecuado, aunque la conexión entre el contenido de carbono y la capacidad de endurecimiento no se entendía bien. Los filos heterogéneos desaparecieron, pero sin embargo se obtenía dureza en lugares inútiles<sup>30</sup>.

En el caso de las hojas laminadas de espadas, la denominación de su factura también se conoce como apilamiento o acero apilado. También se llama soldadura de forja. Algunos autores diferencian entre soldadura de forja y apilamiento por el número de capas de hierro y o acero. No existe un número estándar que los distinga.

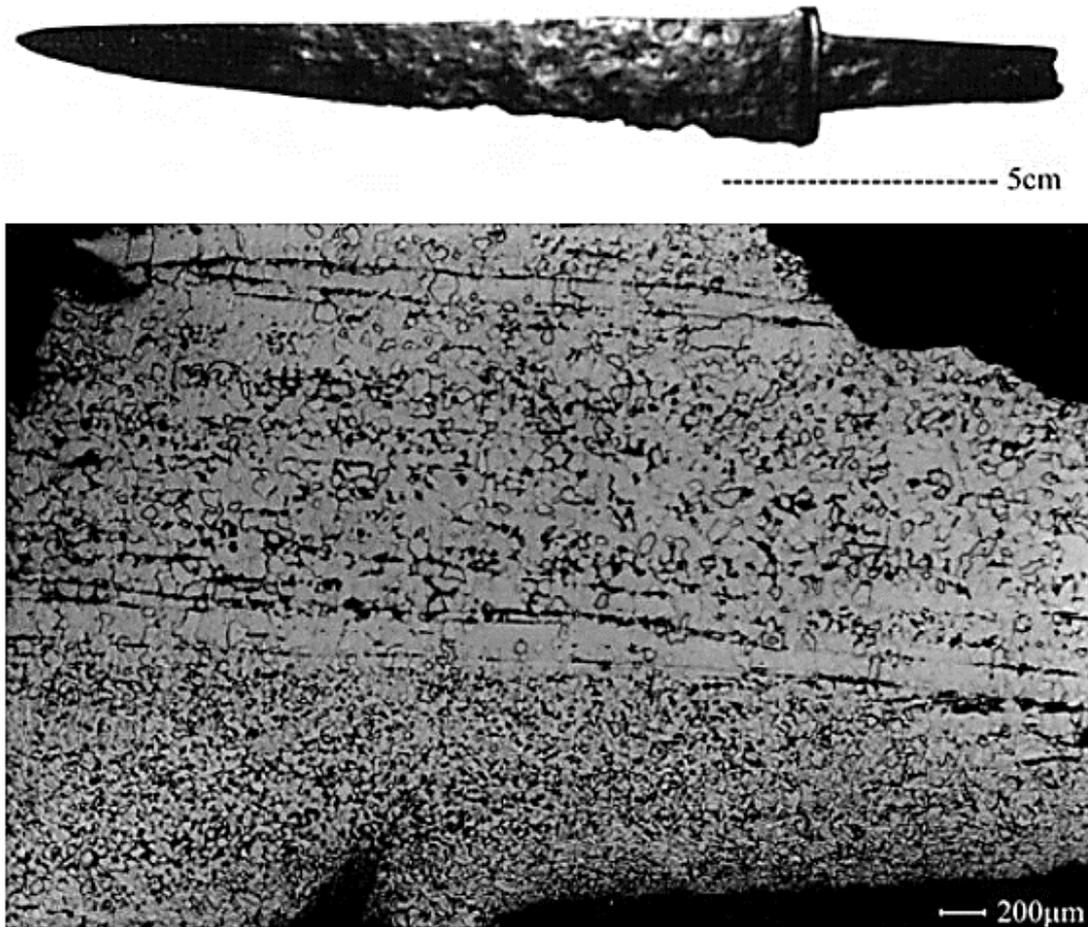
---

<sup>30</sup> Methods of manufacture of swords in medieval Europe: illustrated by the metallography of some examples by Alan R. Williams, Ph. D. *Gladius XIII* (1977), pp. 75-101 ISSN 0435-029X  
<https://gladius.revistas.csic.es/index.php/gladius/article/view/146>



**Figura 29.** Ejemplo de laminación/acero apilado con distintos metales a, b, c y d.  
 (Fuente: methods of manufacture of swords in medieval Europe: illustrated by the metallography of some examples<sup>31</sup>). Ejemplo de laminación con distintos metales a, b, c y d.

<sup>31</sup> Methods of manufacture of swords in medieval Europe: illustrated by the metallography of some examples by Alan R. Williams, Ph. D. Gladius XIII (1977), pp. 75-101 ISSN 0435-029X  
<https://gladius.revistas.csic.es/index.php/gladius/article/view/146>

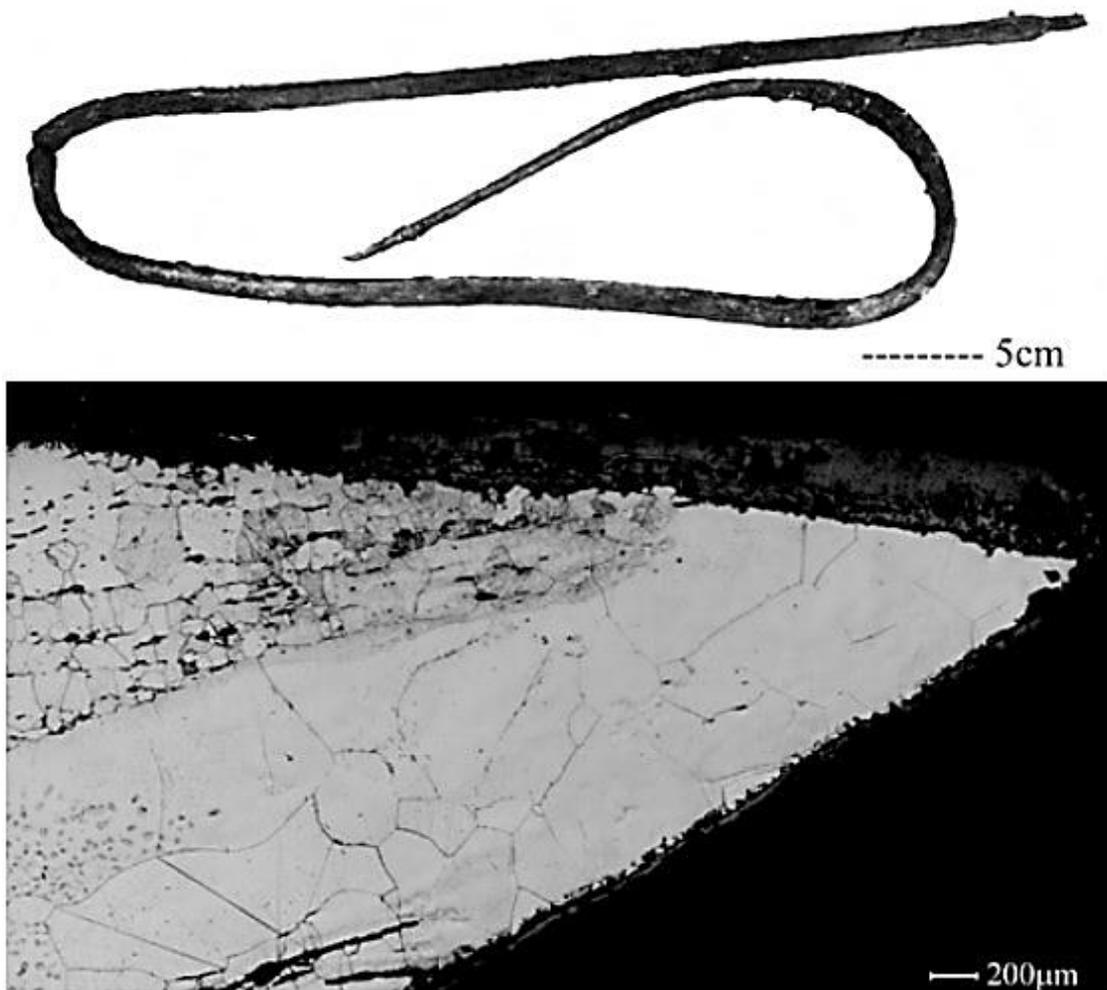


**Figura 30.** Ejemplo de laminación/acero apilado. El cuchillo está compuesto por capas de hierro bajo en carbono. (Fuente: An investigation of the varied technology found in swords, sabres and blades from the Russian Northern Caucasus<sup>32</sup>)

La soldadura de forja es el proceso consistente en calentar dos piezas de hierro/acero juntas para formar una sola pieza. Típicamente las piezas se calientan hasta que alcanzan el color blanco, alrededor de 1300-1400°C y luego se forjan juntas. Esta temperatura tan alta afectaría negativamente a la cementita esférica, por lo que se calienta el hierro o el acero a por lo menos 1300°C y luego se martillea, esto es se forja, para que las piezas separadas formen una sola pieza. Se puede soldar una capa de acero al filo de corte, o muchas. Las capas se pueden acumular unas sobre otras y soldarse juntas, produciendo así lo que ya hemos definido como acero apilado.

---

<sup>32</sup> An investigation of the varied technology found in swords, sabres and blades from the Russian Northern Caucasus Ann Feuerbach iams 25 for 2005, 27-43  
[iams\\_25\\_2005\\_feuerbach.pdf \(ucl.ac.uk\)](#)



**Figura 31.** Ejemplo de sable doblado ritualmente antes de ser enterrado. Una sección del mismo.

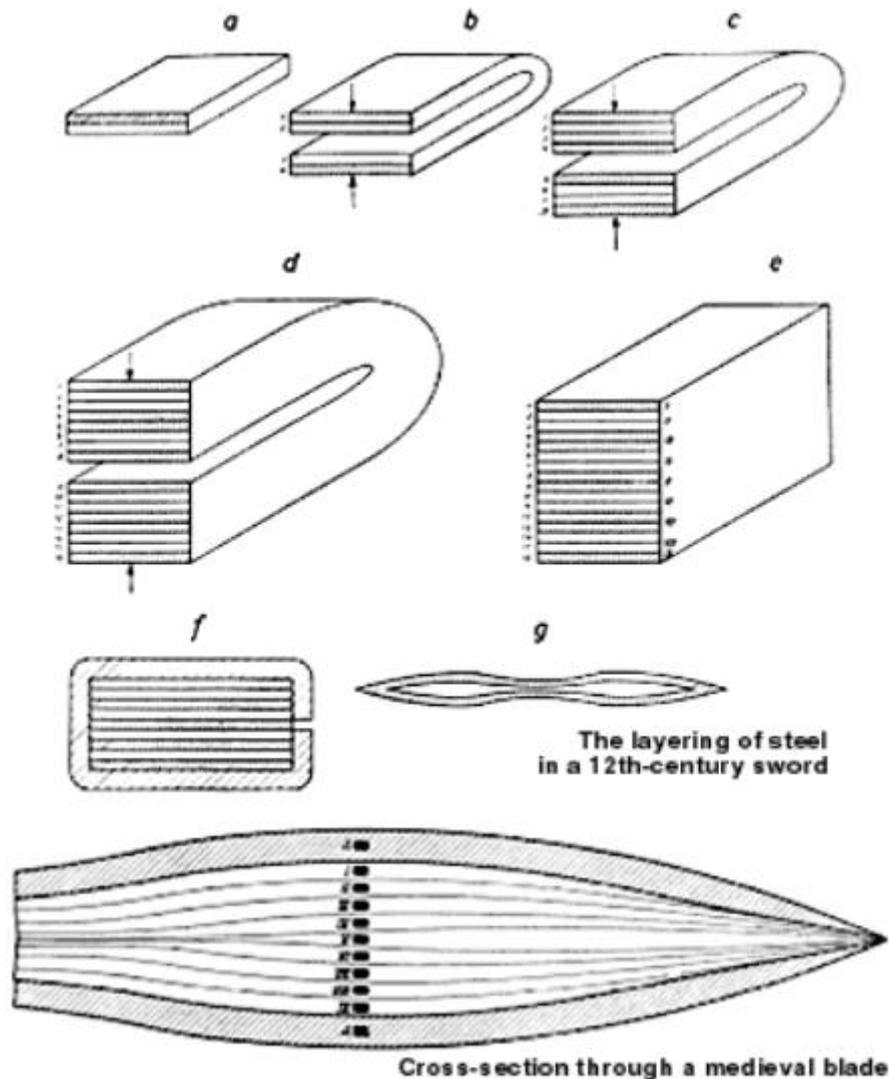
El borde parece estar hecho de acero apilado que luego fue forjado y soldado sobre una capa de hierro dulce (Fuente: An investigation of the varied technology found in swords, sabres and blades from the Russian Northern Caucasus<sup>33</sup>)

Esta estructura se encuentra en espadas kirguís de los siglos X-XII d.C. y sables de las estepas occidentales datados en 1150-1250 d.C. Como se ha comentado, el borde parece estar hecho de acero apilado que luego fue forjado y soldado sobre una capa de hierro dulce. Esta espada probablemente fue recocida para ser doblada en un ritual funerario (para que no pudiera volver a ser utilizada).

En este caso, el patrón surge de dos aceros de diferentes contenidos de carbono que se pliegan y forjan con martillo<sup>34</sup>.

<sup>33</sup> Ibídem 32

<sup>34</sup> Ibídem 32



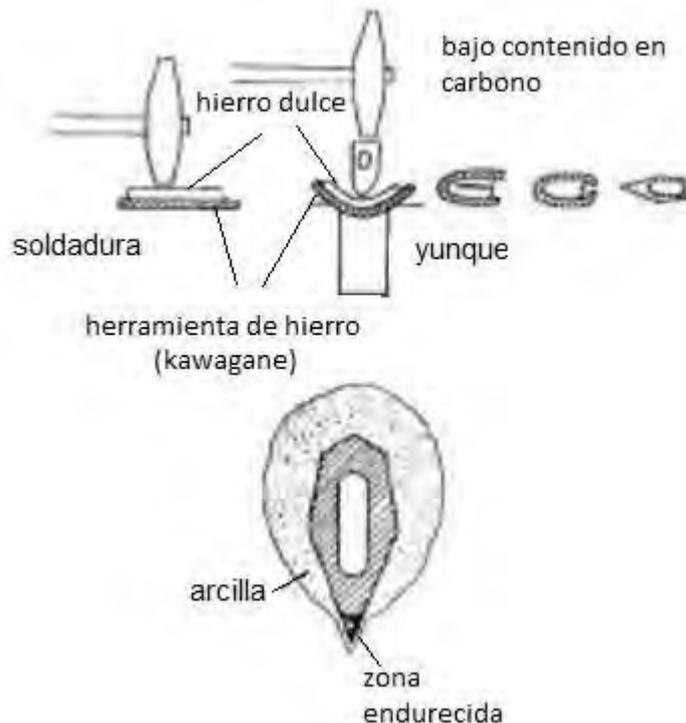
**Figura 32.** Proceso de laminación (plegado y forjado) y sección transversal de una espada medieval del siglo XII. (Fuente: metallografiche sopra una spada da guerra del XII secolo, Milano: Associazione Italiana di Metallurgia <sup>35</sup>)

Los metalúrgicos italianos analizaron la estructura de la hoja de una espada de batalla del siglo XII y descubrieron que también estaba intrincadamente construida a partir de capas de acero de dureza variable elaboradas por expertos para alcanzar los objetivos de dureza, flexibilidad y filo requeridos. Hasta entonces se pensaba que era más típico de espadas japonesas el plegado y forjado en distintas capas que en espadas europeas, donde pudiera abundar más el apilado de capas.

En definitiva, la alternancia de capas se puede lograr bien por laminación clásica, soldando una capa encima de otra, con calor y presión o plegando distintas capas y soldándolas también con la forja, consiguiendo el mismo efecto de alternancia de capas, aunque los dos procesos no son iguales, evidentemente, una cosa es el plegado y otra el apilamiento de capas. Como hemos comentado antes con el plegado y el apilamiento las impurezas del metal desaparecen. Si se realizan mal estos procesos se obtienen malas soldaduras, bolsas de aire, tamaños de grano demasiado grandes o pequeños y zonas con diferentes concentraciones de carbono.

<sup>35</sup> Panseri, C. Ricerche metallografiche sopra una spada da guerra del XII secolo, Milano: Associazione Italiana di Metallurgia, 1954

Aunque estamos tratando espadas europeas, desde un punto de vista metalúrgico, la espada japonesa es de interés en varios niveles diferentes. Su fabricación implicó la unión en estado sólido de los aceros entre sí y con aceros con contenidos de carbono radicalmente diferentes. Es decir, en su forma más simple, con la excepción de las hojas más antiguas, la hoja de la espada es un producto compuesto, que aquí hemos llamado hoja procedente de laminado o apilado (formada por láminas o apilamiento de capas), proceso similar al de laminación de espadas europeo. Un ejemplo de uno de los diseños compuestos es el de una cubierta externa con alto contenido de carbono que rodea un núcleo con bajo contenido de carbono. A continuación se muestra el procedimiento utilizado para hacer una hoja de este tipo.



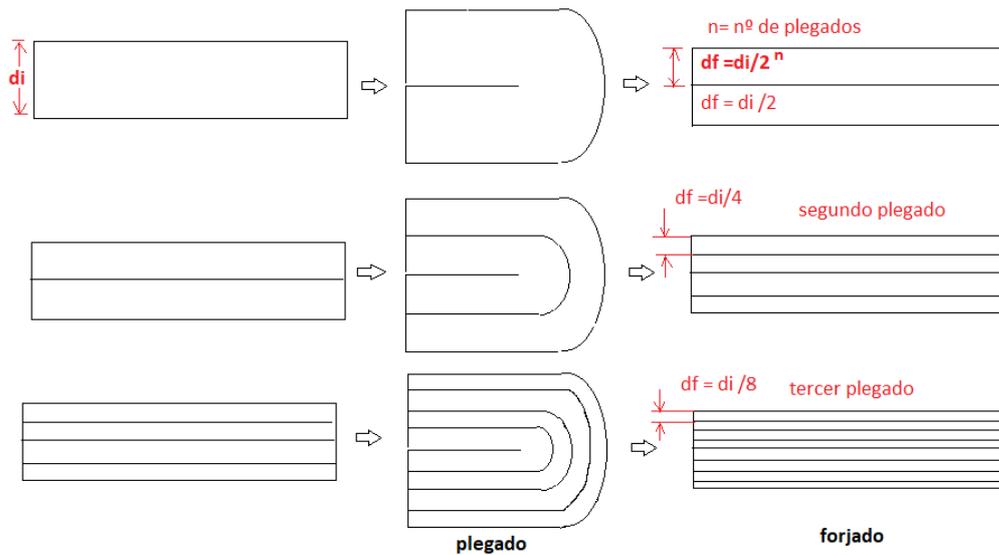
**Figura 33.** Procedimiento utilizado por los herreros japoneses para fabricar herramientas laminadas.  
(Fuente: Ancient and Modern Laminated Composites — From the Great Pyramid of Gizeh to Y2K<sup>36</sup>)

Este procedimiento lo seguían los herreros japoneses para fabricar herramientas laminadas mediante la unión en estado sólido de acero con muy alto contenido de carbono, conocido como kawagane, con hierro dulce; incluyendo una sección transversal de una hoja recubierta con varias capas de arcilla para controlar la temperatura, con una capa mínima de arcilla en el borde para permitir un endurecimiento adecuado. La arcilla guarda y absorbe el calor de una forma que permite regular y controlar distintos tipos de temple.

<sup>36</sup> Ancient and Modern Laminated Composites — From the Great Pyramid of Gizeh to Y2K UCRL-JC-135031 Jeffrey Wadsworth and Donald R. Lesuer University of California Lawrence Livermore National Laboratory Livermore, CA 94551 October 31 – November 3, 199  
[791451 \(osti.gov\)](http://791451.osti.gov)

Este enfoque compuesto, como el caso de las espadas europeas, permitió al fabricante de espadas lograr las propiedades deseables de dureza y ductilidad en una sola arma. A menudo, una de estas propiedades solo se desarrolla a expensas del otro.

Para producir la parte de la hoja con alto contenido de carbono, el acero se sometía a múltiples operaciones de plegado; siguiendo la ley  $df = di/2^n$ , con  $n$ : número de plegados,  $df$ : Tamaño final del grano,  $di$ : tamaño inicial del grano. Esto ha dado lugar al concepto erróneo de que las espadas de los Samuráis podían contener millones de capas discretas. Para las katanas, el número máximo de plegados solía ser 5 ó 6. En el caso de 6, el tamaño de grano llegará a ser 64 veces menor, y se formarían 64 capas. Cifra nada desdeñable. Si se plegara 30 veces, resultaría un disparate, el tamaño de grano pasaba de  $di$  inicial a  $di/2^{30}=di/64\ 1.073.741.824$  con 1073 millones de capas.



**Figura 34.** Imagen ilustrativa de la disminución del tamaño de grano del acero por plegado (Fuente: el autor)



**Figura 35.** Imagen de forjado sobre plegado (Fuente: The folding process of the Japanese sword <sup>37</sup>)

<sup>37</sup> The folding process of the Japanese sword  
<<https://www.hanbonforge.com>>

El desarrollo de las complejas y hermosas marcas superficiales fue consecuencia de un proceso de tratamiento térmico superficial selectivo (conocido como yaki-ire), logrado en parte cubriendo la hoja con diferentes espesores de arcilla; esto dio lugar a una intrigante combinación de productos de transformación y patrones de superficie. Este no solo era un ejemplo visible y estético de la habilidad del fabricante de espadas, sino que también era evidencia de que el borde de la hoja había sido endurecido.

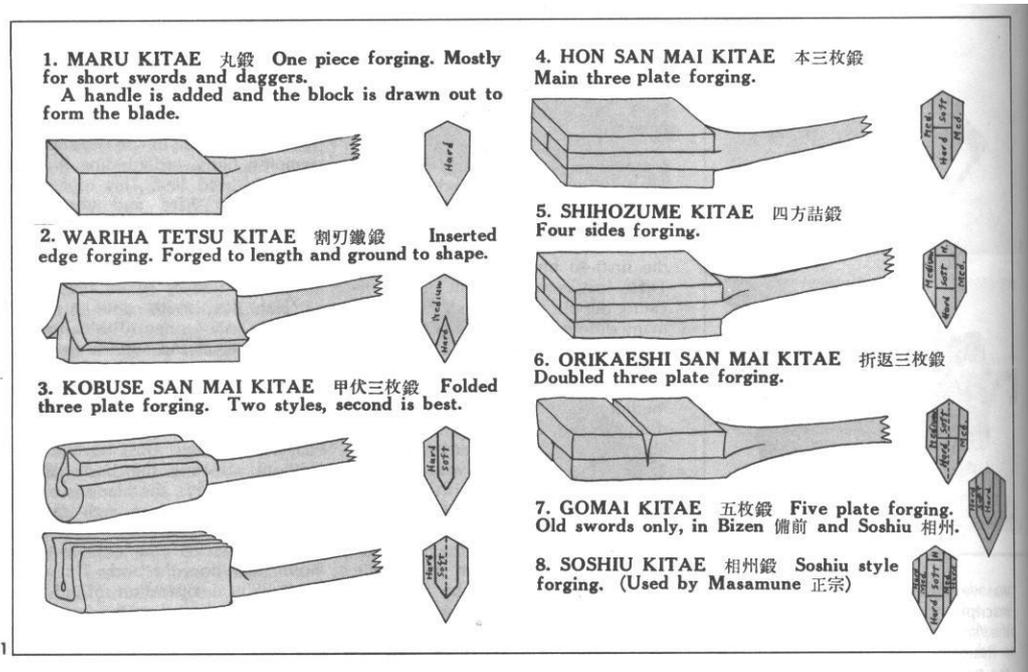


Figura 36. Proceso de laminación en diferentes hojas japonesas.

(Fuente: Iron and Steel Technology in Japanese Arms & Armors - Part 3: Bladesmithin<sup>38</sup>)

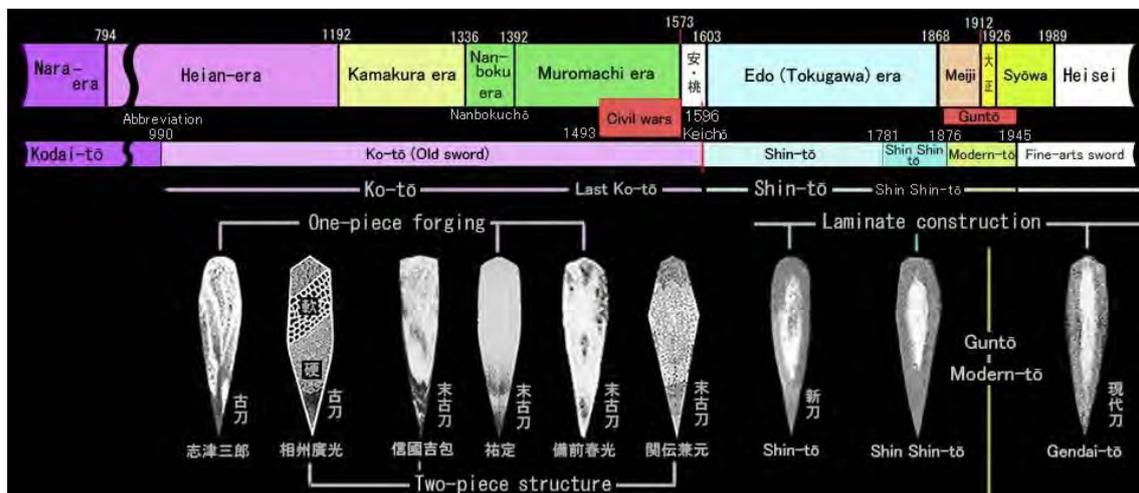


Figura 37. Ejemplo de laminación de las hojas a lo largo del tiempo. Secciones transversales de las hojas.

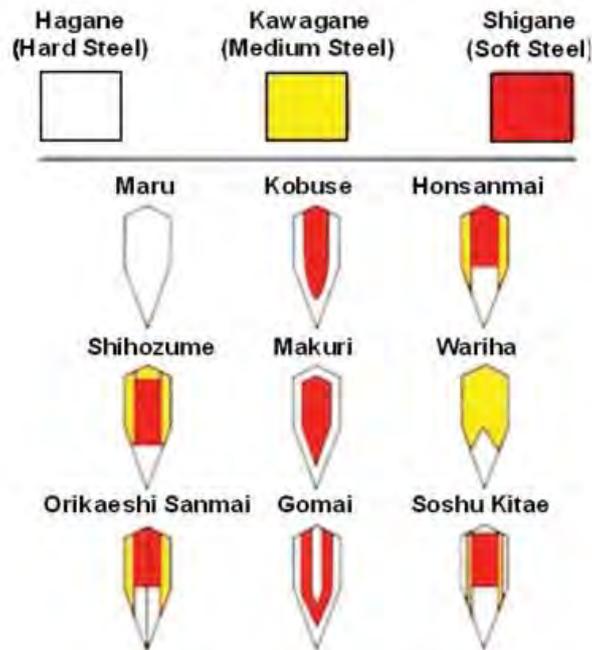
(Fuente: Iron and Steel Technology in Japanese Arms & Armors - Part 3: Bladesmithing<sup>39</sup>)

<sup>38</sup> Iron and Steel Technology in Japanese Arms & Armors - Part 3: Bladesmithing January 27, 2019 Gunbai: Ancient Japanese Warfare

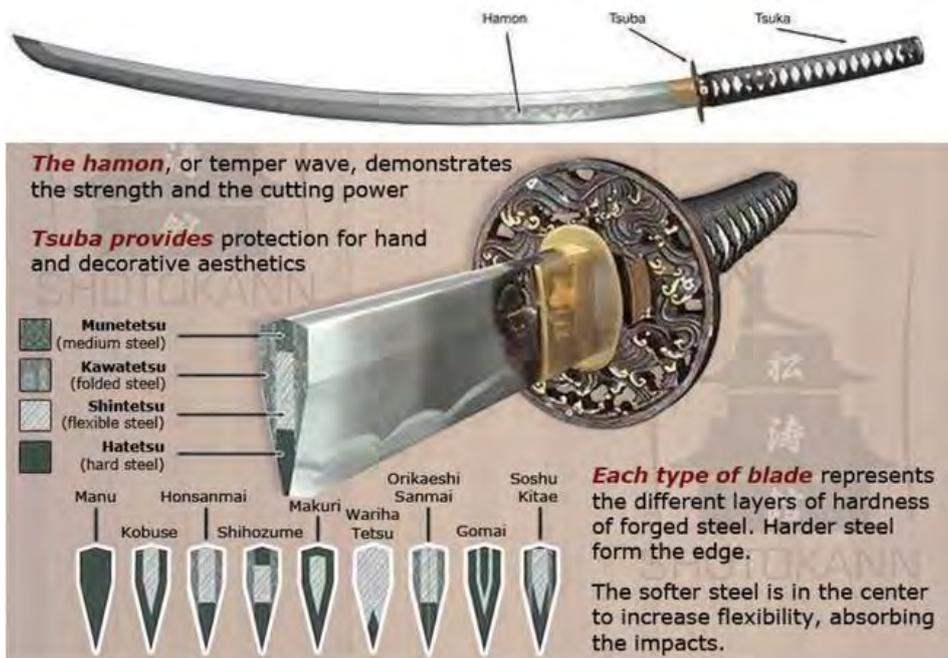
[Iron and Steel Technology in Japanese Arms & Armors - Part 3: Bladesmithing \(gunbai- militaryhistory.blogspot.com\)](http://gunbai-militaryhistory.blogspot.com)

<sup>39</sup> Ibidem 39

En 1142 d.C. aproximadamente, a mediados del siglo XII, los japoneses empleaban también el procedimiento de la soldadura por laminación o apilamiento. En Europa es un poco anterior, a partir del siglo X.



**Figura 38.** Secciones transversales de hojas donde se muestran las laminaciones más comunes en las espadas japonesas (Fuente: Structural Characterization of Ancient Japanese Swords from MAAS Using Neutron Strain Scanning Measurements <sup>40</sup>)



**Figura 39.** Ejemplo de laminación con distintos tipos de secciones. (Fuente: Shotokann<sup>41</sup>)

<sup>40</sup> Structural Characterization of Ancient Japanese Swords from MAAS Using Neutron Strain Scanning Measurements Filomena Salvemini, Vladimir Luzin, Francesco Grazi, Sue Gatenby, Min-Jung Kim. Pag 2.

<http://dx.doi.org/10.21741/9781945291173-75>

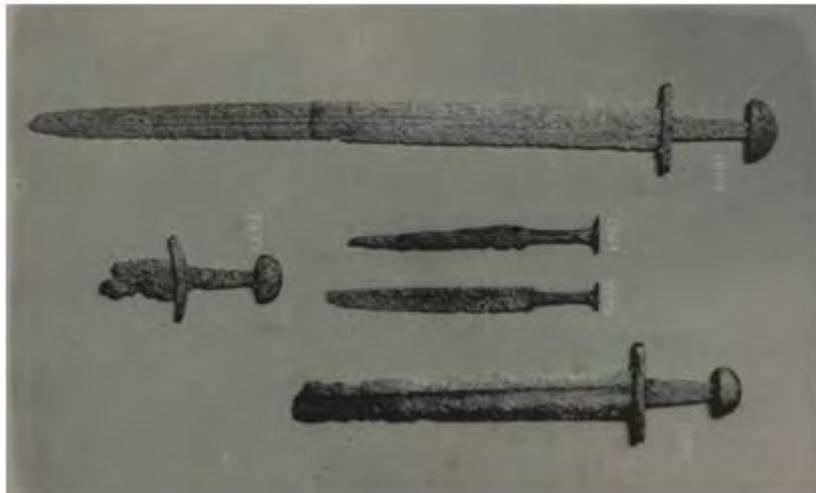
<sup>41</sup> Shotokann web created for the purpose of serving and informing those who contemplate sword art and Oriental Culture, promoting a work of excellence.

<https://shotokann.com>

### 3. Vistas de la espada objeto del estudio



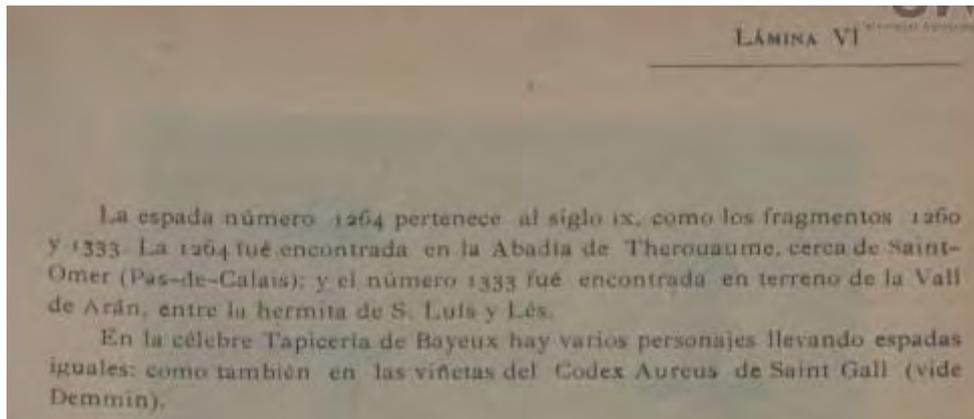
**Figura 40.** Espada sin la empuñadura. Se aprecia la espiga, en una única pieza con la hoja y el pomo.  
(Fuente: el autor)



**Figura 41.** Espada medieval del siglo IX (Fuente: Museo Armería Don Jose Estruch y Cumella<sup>42</sup>)

Presenta una forma muy parecida, tanto la empuñadura, los gavilanes, el pomo y la espiga, que la espada numerada 1264. La hoja tiene la misma forma pero la numerada 1264 presenta 2 acalanaduras en lugar de 1.

<sup>42</sup> Museo Armería Don Jose Estruch y Cumella, reproducción fototípica, ejemplares más notables que en él se conservan, Barcelona , 1896. pág. 27/39



**Figura 42.** Explicaciones sobre Espada medieval del siglo IX.

(Fuente: Museo Armería Don Jose Estruch y Cumella<sup>43</sup>)

La tipología hecho Oakeshott<sup>44</sup> también es orientativa. Se hace en base a la acanaladura, longitud, tipos de guarda, sección de la hoja, punta y tipos de pomo.

En nuestro caso 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.

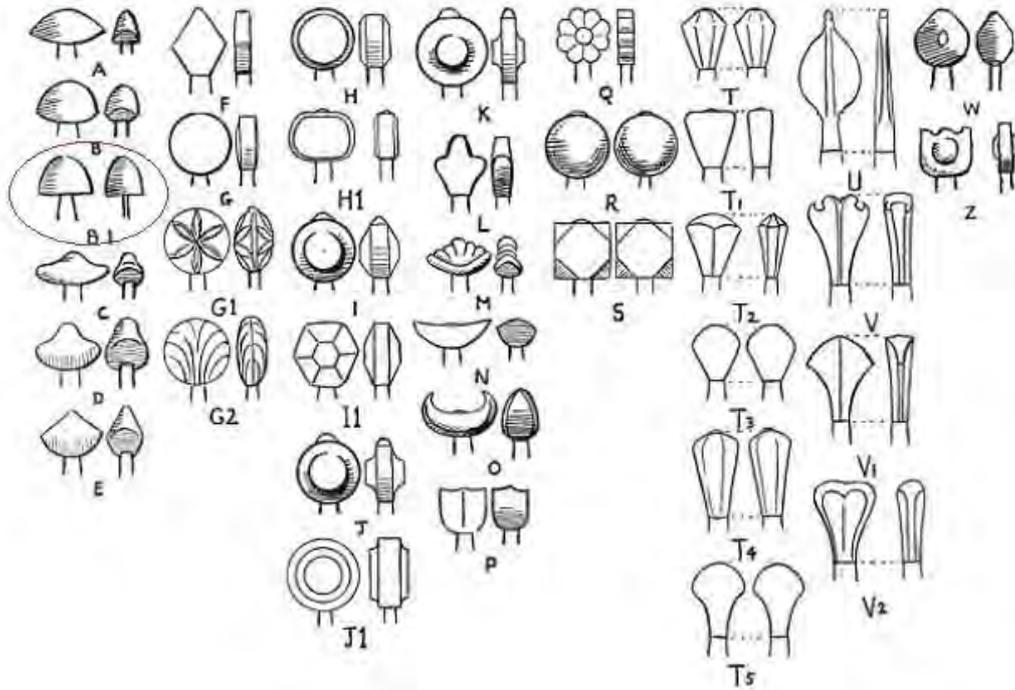
**Figura 43.** Tipo X de la tipología de Oakeshott.

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

<sup>43</sup> Museo Armería Don Jose Estruch y Cumella, reproducción fototípica, ejemplares más notables que en él se conservan, Barcelona, 1896. pág. 26/39.

<sup>44</sup> 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).

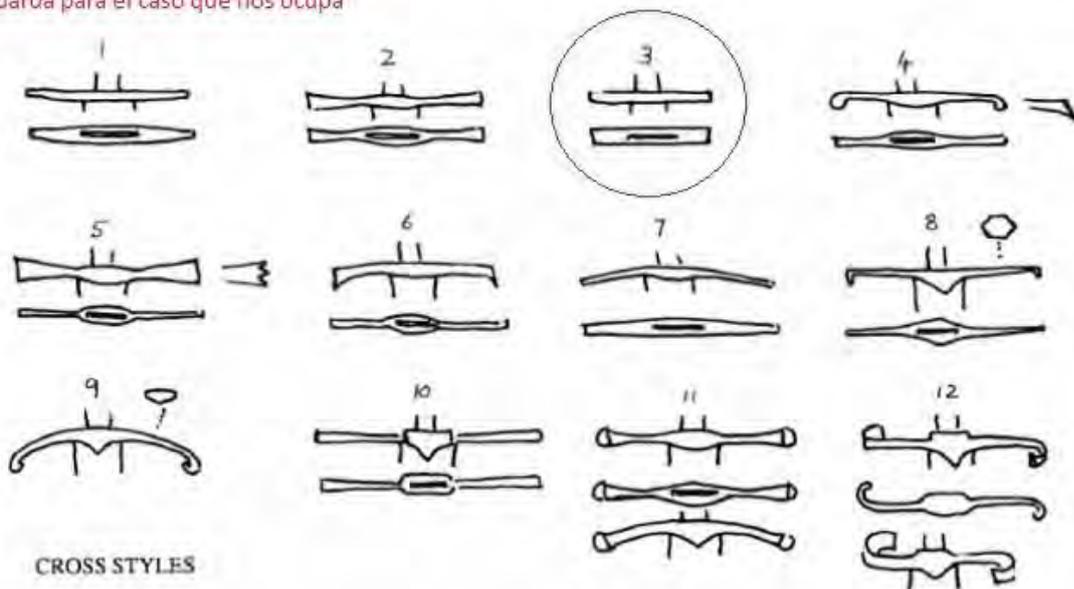
pomo en el caso que nos ocupa



**Figura 44.** Tipo X de la tipología de Oakeshott.

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

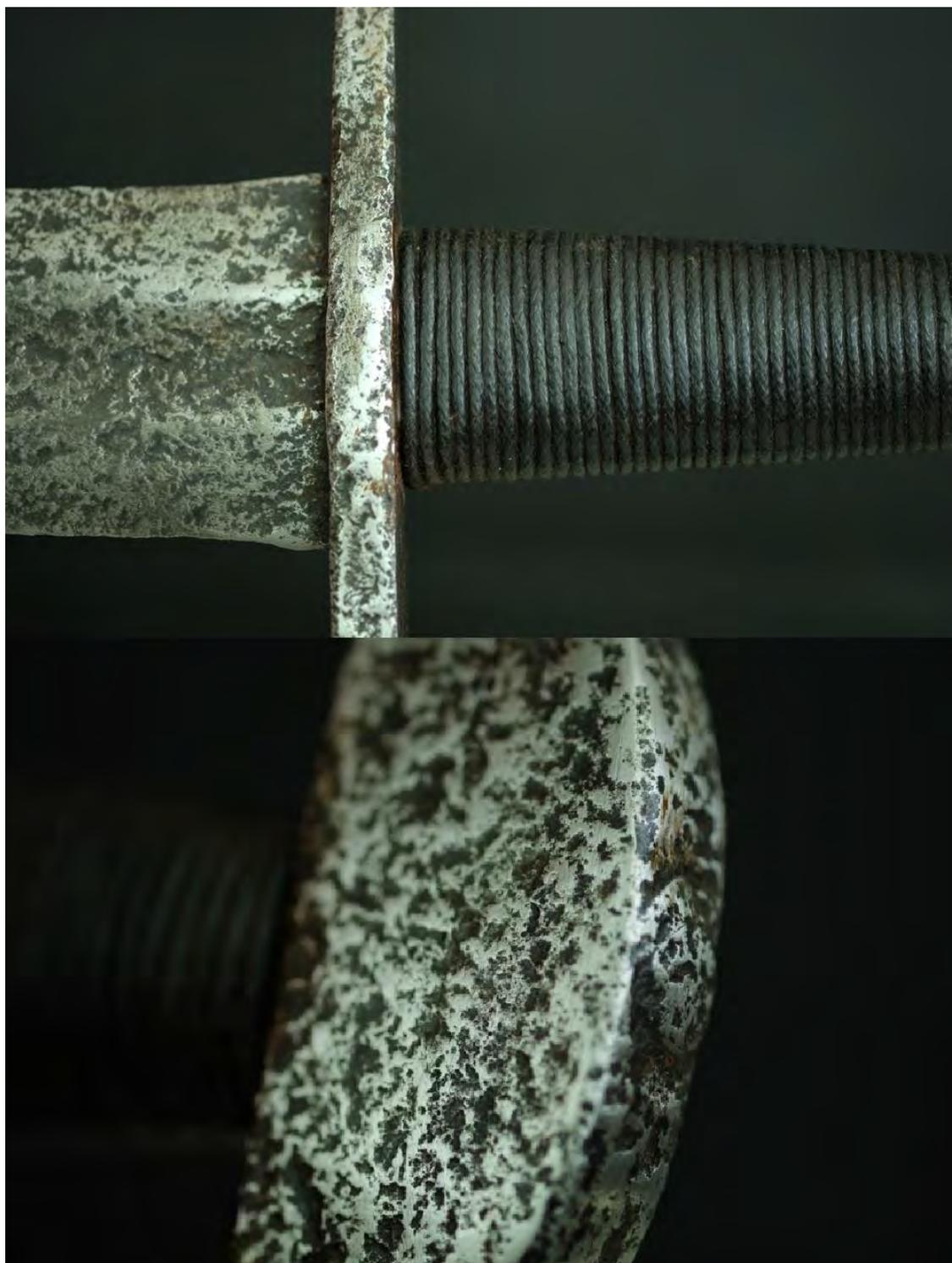
guarda para el caso que nos ocupa



**Figura 45.** Tipo X de la tipología de Oakeshott.

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

Podríamos concluir con que es del siglo X/XI.



**Figura 46.** Vistas de la espada. (Fuente: el autor)



**Figura 47.** Vistas de la espada. (Fuente: el autor)



**Figura 48.** Vistas de la espada. (Fuente: el autor)



**Figura 49.** Vistas de la espada. (Fuente: el autor)



**Figura 50.** Vistas de la espada. (Fuente: el autor)



Figura 51. Vistas de la espada. (Fuente: el autor)

#### 4. Dimensiones

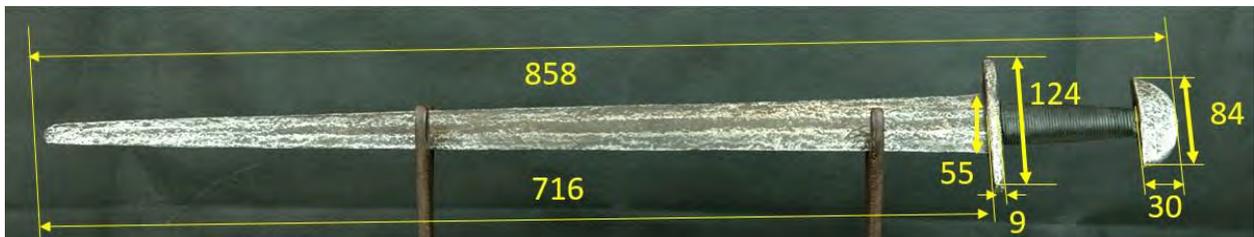


Figura 52. Dimensiones. (Fuente: el autor)

Las dimensiones son coherentes con espadas de esta época.

#### 5. Peso



Figura 53. Pesada. (Fuente: el autor)

En el laboratorio de metalotecnia de la ETSIAN se pesó, dando un resultado de 1241.1 kg. Peso muy estándar para las espadas de la época.

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

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

Nos contentaremos con mirar la macroestructura. El estudio de la microestructura implicaría sacar una probeta con parte de material arrancado de la espada, someterlo a pulido y luego tratarlo y someterlo a un ataque químico con un compuesto como Nital que reaccionase con algunas partes de la aleación y así poder ver mejor las propiedades.

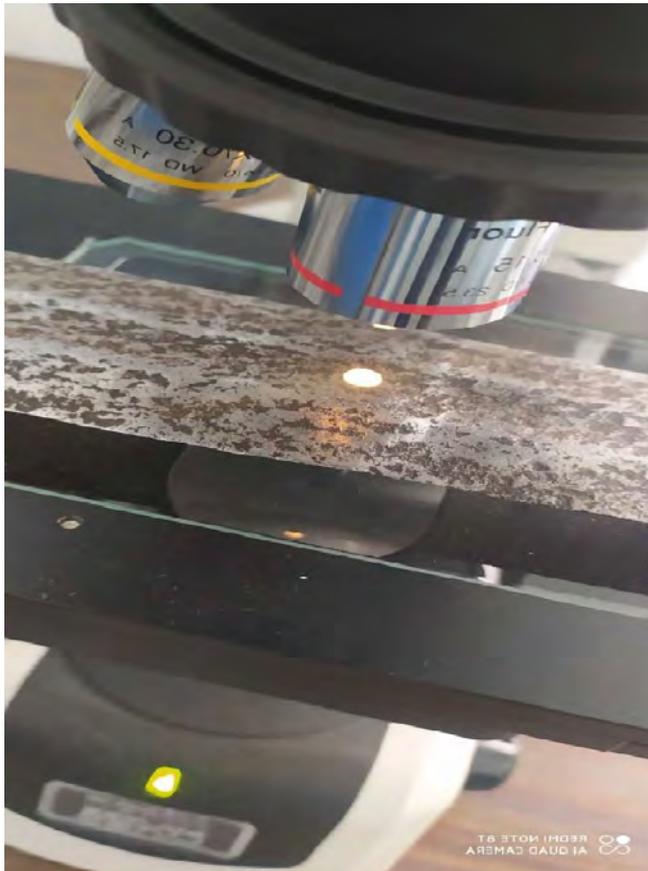
De esa observación se sacarían características del diseño del metal (aleación) y las fases del proceso, los granos y sus límites del grano, la fases intermetálicas y precipitados, las inclusiones no metálicas y fases, todo ello en función del tipo y forma, tamaño y número y distribución y orientación de los granos. Eso implicaría hacer daño a la espada, por lo que lo hemos descartado de momento.



**Figura 54.** Lupa de aumento a la derecha y microscopio de metales a la izquierda. (Fuente: el autor)



**Figura 55.** Microscopio de metales. (Fuente: el autor)



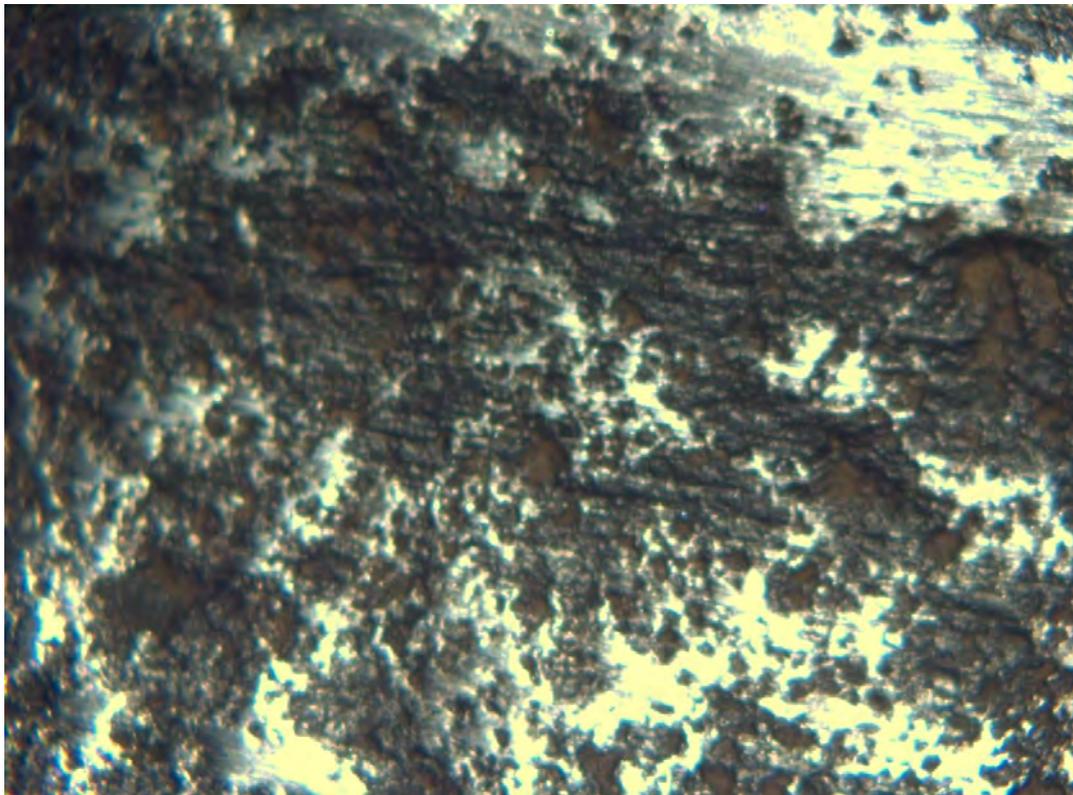
**Figura 56.** Microscopio de metales. (Fuente: el autor)

## 6. Resultados inspección óptica.

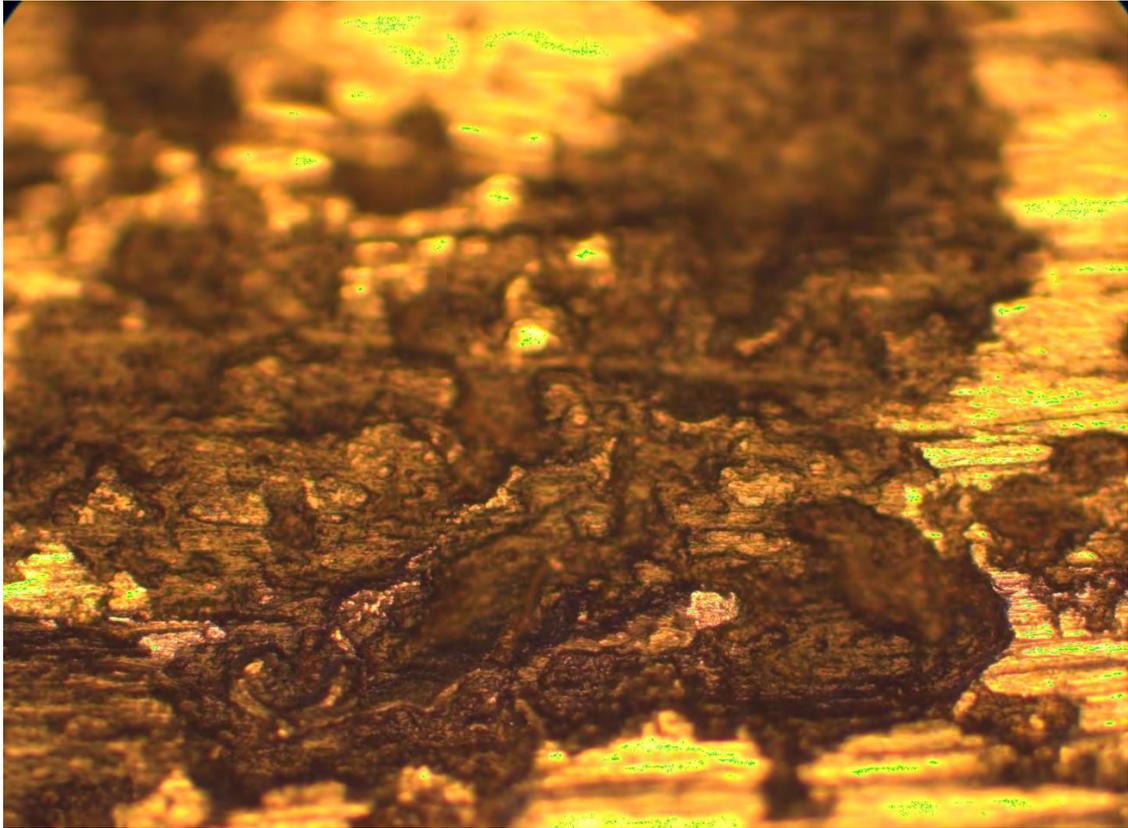
Se aprecian las líneas de la forja en la parte pulida en la parte sin pulir. Con ferrita  $FeO_3$  en la parte más oscura.



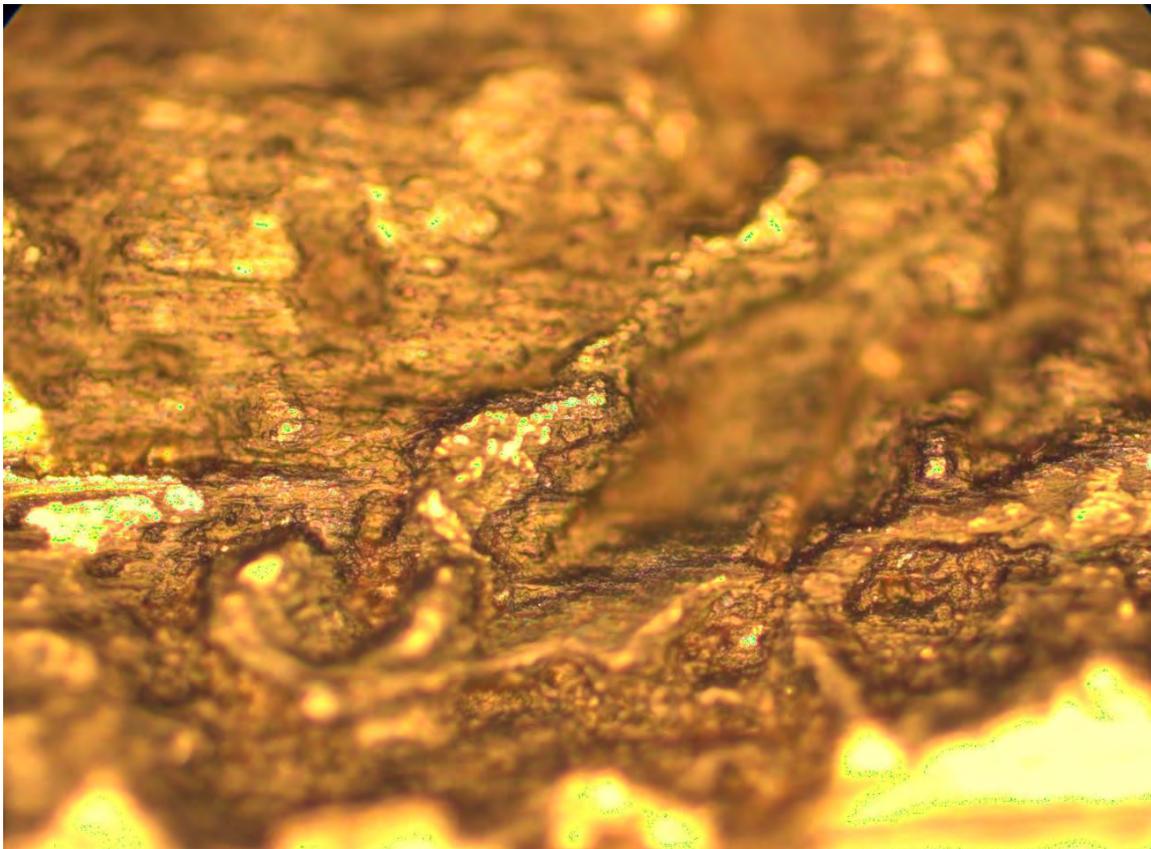
**Figura 57.** Acanaladura, 50x aumentos Lupa de aumento. (Fuente: el autor)



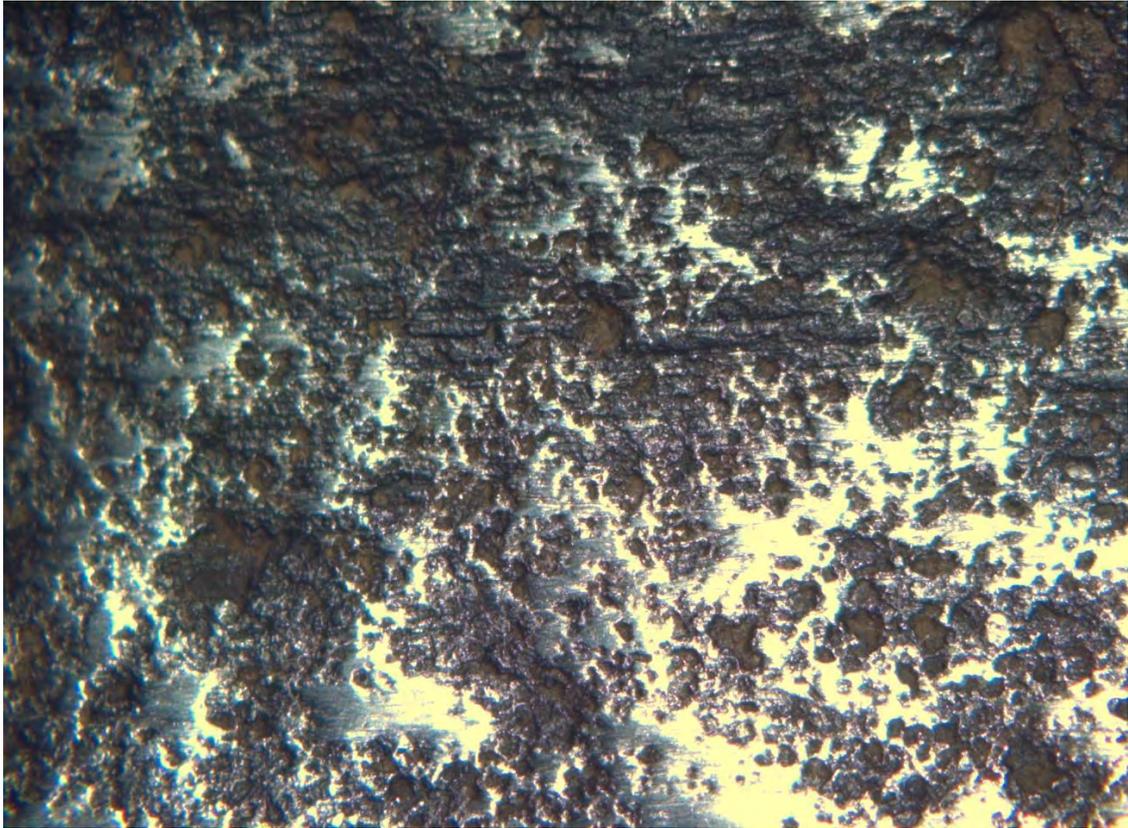
**Figura 58.** Hoja 50x aumentos Lupa de aumento. (Fuente: el autor)



**Figura 59.** Detalle de la acanaladura a 100x aumentos. Microscopio de metales. (Fuente: el autor)

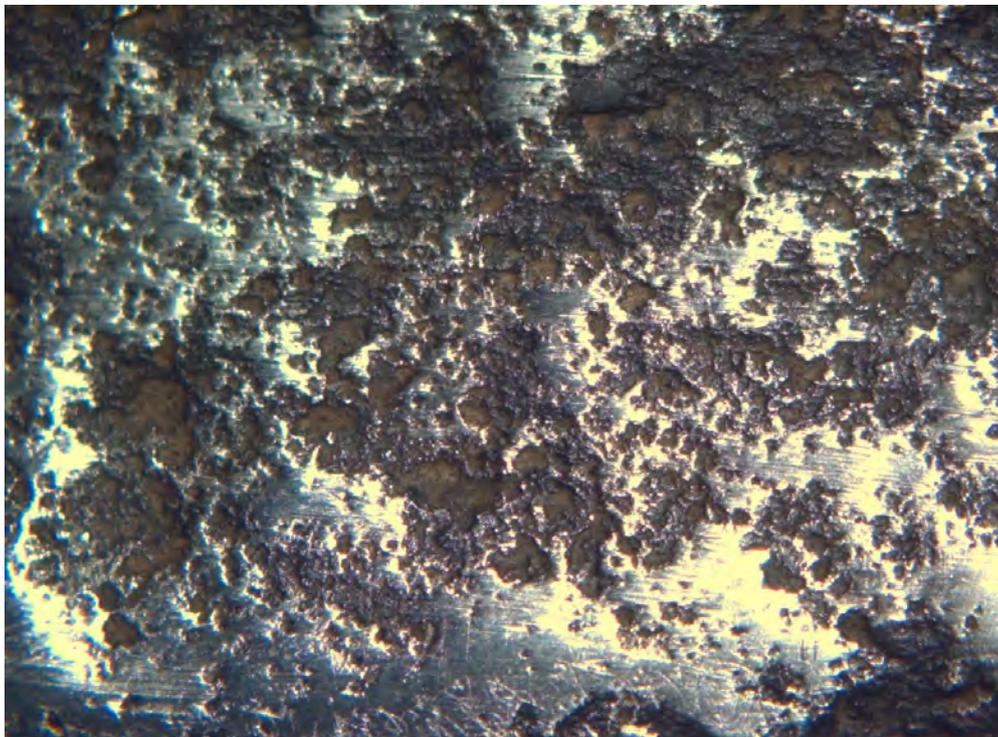


**Figura 60.** Detalle de la acanaladura a 100x aumentos. Microscopio de metales

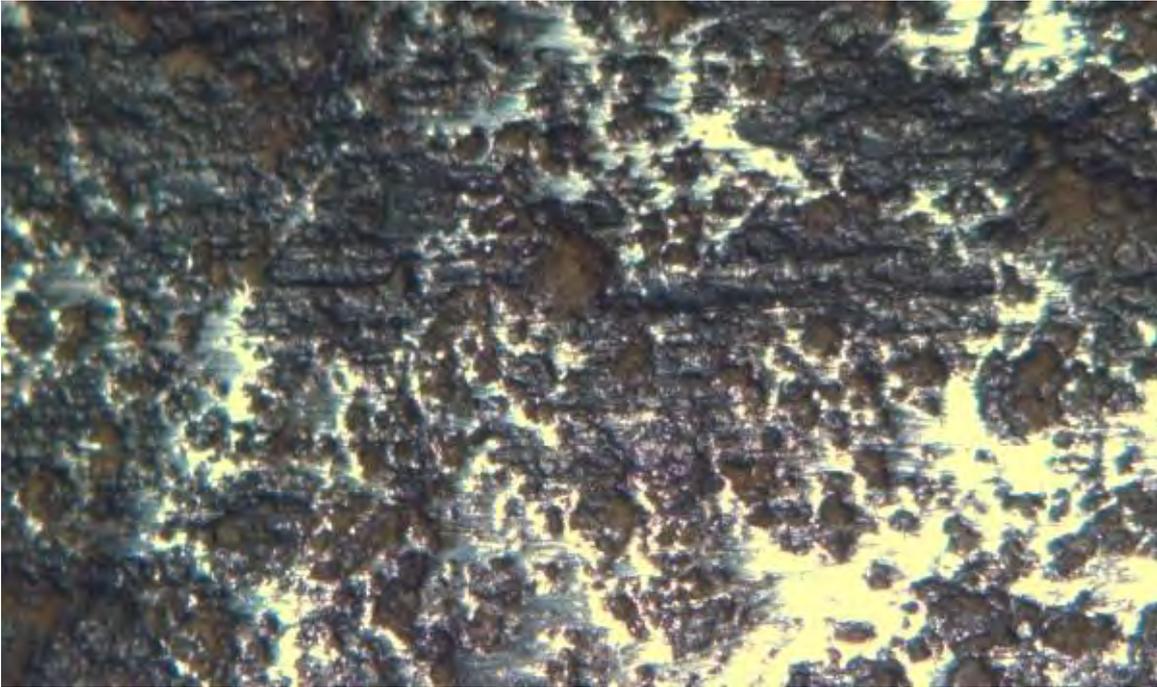


**Figura 61** Detalle Hoja 50x aumentos Lupa de aumento. (Fuente: el autor)

Se aprecian inequívocamente las líneas de forja, longitudinales, el grano se ha machacado en esa dirección que es en la que mejor trabaja y mejores propiedades mecánicas tiene.



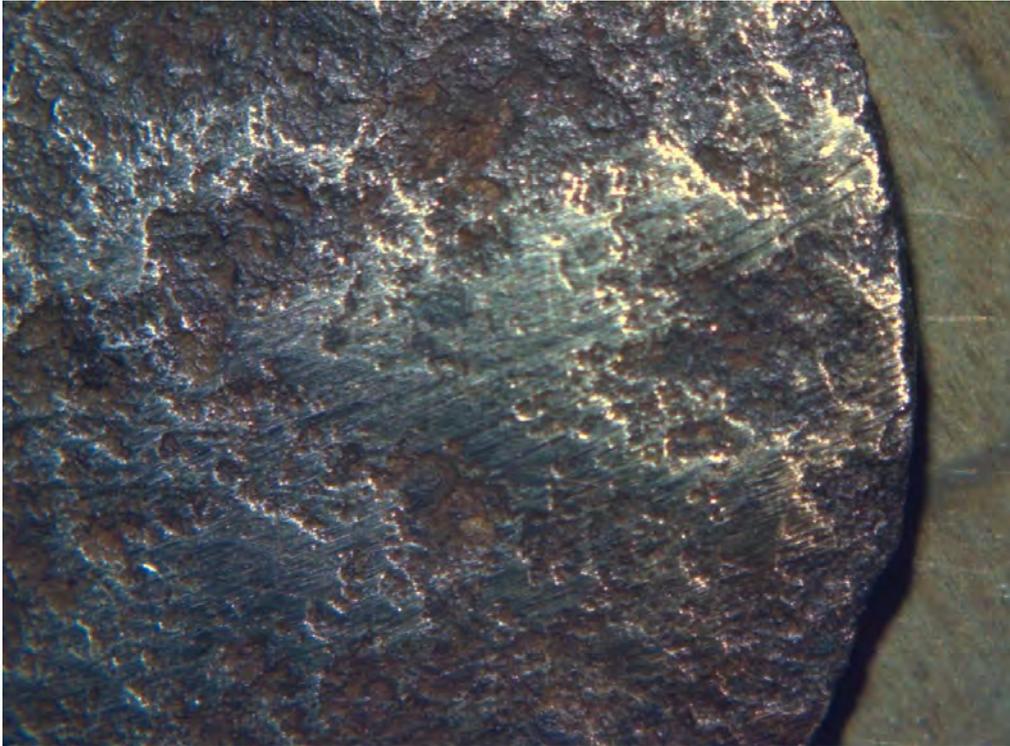
**Figura 62.** Detalle Hoja 50x aumentos Lupa de aumento. (Fuente: el autor)



**Figura 63.** Detalle Hoja 50x aumentos Lupa de aumento. (Fuente: el autor)

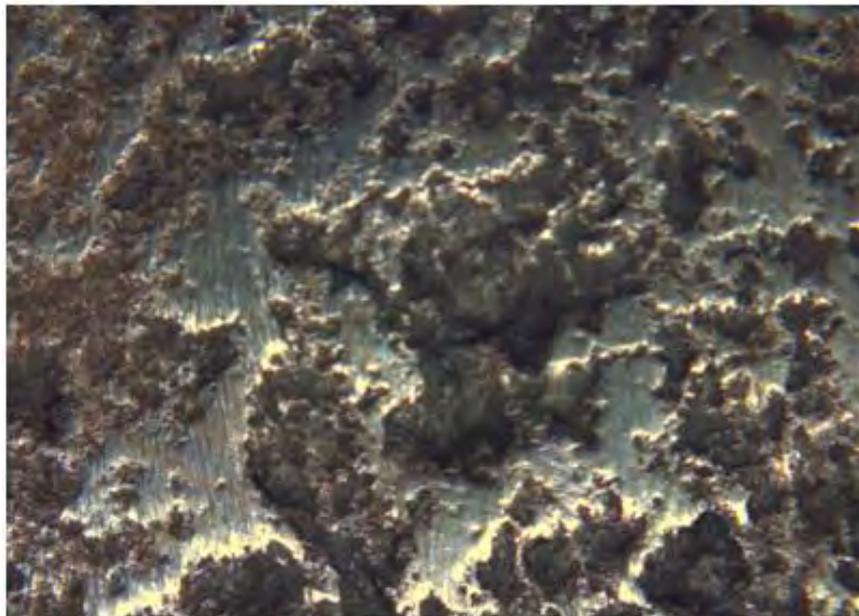


**Figura 64.** Más detalles de la hoja. Hoja 50x aumentos Lupa de aumento. (Fuente: el autor)



**Figura 65.** Detalle de la punta, 50x aumentos también se ven las fibras Hoja 50x aumentos Lupa de aumento.  
(Fuente: el autor)

La punta, la parte de la espada más exigida, debe tener propiedades mecánicas muy demandantes de dureza, flexibilidad, tenacidad y filo, propiedades contrarias entre sí en la mayor parte de los materiales. Si un material es muy duro suele ser frágil, si es flexible es poco tenaz.



**Figura 66.** Detalle Pomo 60X aumentos. Lupa de aumento. (Fuente: el autor)

## 7. Comentarios a las imágenes obtenidas.

### Originalidad y clasificación

Se trata de una pieza antigua de forja tradicional que estaba en una casona vasca. Procede de una herencia familiar en la provincia de Álava.

Esta espada está bastante limpia, con una pátina de acero antiguo, que deja el metal al descubierto. Aparte tiene los típicos cráteres de los años, oscurecidos, con óxido negro y endurecido, óxido con estructura laminar, posiblemente magnetita ( $Fe_3O_4$ ).

Los antiguos poseedores la heredaron sin saber más sobre ella aparte de que en la familia les habían dicho que era medieval, lo que parece.

Esta espada ha estado mucho tiempo en una antigua cochera, no enterrada, por lo que no tiene incrustaciones de sílice ni elementos que indiquen su enterramiento. No parece una espada ceremonial sino de combate y se encuentra en un estado excepcional, en comparación con las que suelen aparecer de esa época.

La ha tenido en mano un especialista de esgrima antigua y dijo que tenía el aspecto, equilibrio y peso que le corresponde a piezas del siglo XI o X.

Lógicamente por los muchos años la empuñadura se había perdido completamente dejando la espiga de hierro solamente, esa parte se ha restaurado siguiendo las técnicas de la época, madera debajo y sobre ella cordaje de fibra natural engrasado.

Existe la posibilidad que sea una de las forjas que, siguiendo métodos tradicionales se hicieron en siglos posteriores al X/XI d.C. con diversos fines, como reemplazar piezas perdidas o deterioradas. Incluso en algunos casos, cuando en reparto de herencia no «tocaba» alguna pieza querida por la familia se hacía una igual. También se usaron como regalo, sobre todo en el XIX d.C. (también en el XVIII d.C.). Pero las que he podido ver no tienen esos picados y desgastes «naturales» imposibles de imitar ni era forja similar en calidad. Casi con toda probabilidad se trata de una forja antigua del X/XI d.C.

Efectivamente, lo que se ha escrito en bastantes fuentes y artículos sobre el mal llamado «grano» (grain) son esos cráteres que se forman tras caer las «bolas de óxido» recién formadas cuando el acero se oxida superficialmente, al dilatarse en la oxidación.

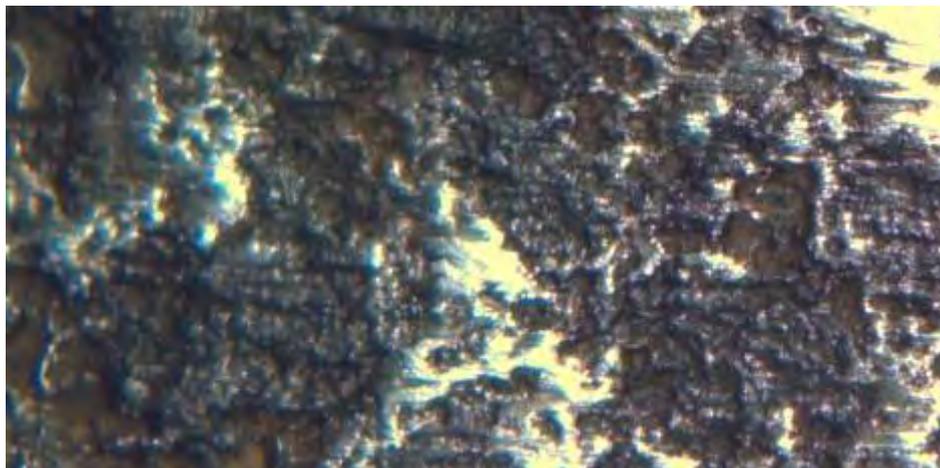


**Figura 67.** Detalle de cráteres que se observan en toda la hoja 50X aumentos. Lupa de aumento.  
(Fuente: el autor)

Este fenómeno o picadura tiende a resaltar un efecto parecido al de la «veta de madera» en hierro y acero forjados a mano que es tan difícil de reproducir que nadie se molestaría en hacer una falsificación.

En la forja se produce lo que se conoce como segregación dendrítica, donde se rompen las imperfecciones y se pasa de la estructura dendrítica (dendros: árbol en latín) a la estructura de fibra. Las fibras quedan alineadas. Al forjar y unir las fibras se van las impurezas y los gases. Dejando esta forma tan característica. Las líneas de forja son las más puras, y en la acción de forja se han ido las impurezas que pudiera tener el metal, con lo que la corrosión no ataca esas zonas y adquieren la forma de «madera antigua».

Esta estructura es imposible de imitar en el siglo XXI, la formación de esos óxidos y desaparición de material, ni con ácidos ni otros medios.



**Figura 68.** Detalle efecto parecido al de la «veta de madera» se observa en toda la hoja 50X aumentos. Lupa de aumento. (Fuente: el autor)

Como consecuencia de lo anterior, si el grano está allí, eso es una fuerte evidencia de originalidad, pero la falta de grano no indica necesariamente lo contrario.

Si dispusiéramos de un espectrógrafo de masas, podríamos ver los elementos presentes en la espada.

Por ejemplo si apareciera mucho cobre sería extraño, lo mismo pasa con el manganeso, un hierro moderno tienen bastante manganeso, los medievales no. Un acero del siglo XIX puede tener Cu (0.25-0.29%), Cr (0.02-0.04%) y Mn (0.43-0.54%).

Existen muchos estudios sobre técnicas de fabricación y propiedades de espadas medievales. Se puede decir que la microestructura y la composición química así como la pureza de los antiguos aceros difieren de los aceros modernos. De esta forma, se han intentado fabricar en la actualidad espadas por ingenieros con altos conocimientos en materiales, siguiendo procesos similares a los antiguos, para ver las características mecánicas.

Uno de estos estudios que puede citarse corresponde al departamento de ciencia de materiales e ingeniería de la Universidad Politécnica de Budapest. Para ser históricamente precisos, extrajeron hierro con técnicas antiguas, fundiendo el hierro (los minerales de hierro de pantano) en hornos de floración idénticos a los medievales tipo Fajsz (Hungría) excavados en el siglo X<sup>45</sup>.

<sup>45</sup> Mechanical Properties of Medieval Bloomery Iron Materials - Comparative Tensile and Charpy-tests on Bloomery Iron Samples and S235JRG2. Adam Thiele, Jiří Hošek  
[Mechanical Properties of Medieval Bloomery Iron Materials - Comparative Tensile and Charpy-tests on Bloomery Iron Samples and S235JRG2 \(bucavasgyuro.net\)](http://bucavasgyuro.net)

De las reconstrucciones modernas, siguiendo técnicas antiguas, se llega a la conclusión de que el efecto de concentración de estrés y muescas de la escoria y las inclusiones en los aceros antiguos disminuyen fuertemente todos los valores característicos de ductilidad y tenacidad en comparación con los aceros modernos.

Por otro lado, el acero típico medieval de los hornos de floración tenía un promedio de un 15% de fósforo y era un material frágil con valores característicos de ductilidad y tenacidad casi nulas o muy bajas, pero con valores característicos altos de resistencia.

En cuanto a azufre y fósforo un hierro moderno no tendría niveles altos de azufre y fósforo, los antiguos sí. El alto contenido de fósforo de las hojas de espada fabricadas siguiendo la soldadura patrón tenía el efecto de prevenir la difusión de carbono a través de las soldaduras durante la fabricación, asegurando así que los patrones eran claramente visibles como contraste pálido y áreas oscuras con bordes nítidos<sup>46</sup>.

La presencia de alto contenido de cobre no encaja con las espadas medievales y se asociaría a un producto moderno. Salvo que el hierro procediera de depósitos limoníticos. Como anecdótico existen espadas forjadas con aceros del pantano. Básicamente, se había encontrado un depósito de limonita ( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) de un pantano del que se sacaría el hierro. Este se purificaría con un bloomer. El resultado es un acero que contenía una cantidad significativa de cobre. El cobre y las limonitas aparecen juntos con frecuencia en las menas como rellenos de cavidades y fracturas. Los afloramientos producidos por la oxidación y lixiviación<sup>47</sup> de los depósitos con sulfuros son compuestos mayormente por limonitas y jaspes limoníticos.

#### **Factura.**

No tenemos medios para ver la estructura interna de la espada (rayos X, ultrasonidos) pero por la tipología y por las marcas exteriores de forja y posible fecha, es de factura laminar, es decir, siguiendo el procedimiento de la laminación con distintos metales cuando ya se podían hacer hojas de una sola barra y añadir láminas más extensa de distintos metales, proceso de laminación del siglo X.

#### **Ubicación temporal.**

La clasificación ubica a la espada temporalmente en el siglo X, según la tipología de Oakeshott que tampoco es infalible, incluso podría ser del IX, como se indica en el documento de Don José Estruch y Cumella<sup>48</sup>.

Se puede clasificar como una espada medieval de los siglos X/XI, comúnmente conocida en el mundo anglosajón como espada vikinga, cuando realmente se trata de una espada medieval al uso. Como hemos comentado, los romanos desarrollaron la spatha de los bárbaros (la forma y longitud) y a adoptaron como espada de caballería, más larga que su gladius hispaniensis.

Las formas de las espadas y su modo de uso son muy similares en las dos fronteras del antiguo Imperio Romano, al norte y sur. Efectivamente, 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, los Sarmatas<sup>49</sup> descendientes/sucesores de los partos. En estas dos fronteras, norte y sur se perfiló, por

<sup>46</sup> Brian Gilmour, The metallurgy, development, and purpose of pattern welding Historical Metallurgy 51(2) for 2017 (published 2019) 57–70.

<sup>47</sup> Proceso de lavado de un estrato de terreno o capa geológica por el agua.

<sup>48</sup> Ibídem 39.

<sup>49</sup> 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

necesidades funcionales, el mismo tipo de espada, la espada de hoja relativamente ancha y acanalada, con dos filos y la punta roma y más o menos centrada. La llamada espada vikinga por los europeos del norte.

### **8. Reseña histórica sobre la soldadura patrón**

¿De dónde sacaron la soldadura patrón los romanos? ¿Quién hizo los primeros patrones soldados, cuándo y dónde? ¿Cómo se desarrolló y difundió la tecnología? ¿Cuántos han sido excavados, cuándo y dónde?

El hierro puro, incluso el hierro forjado con muy bajo contenido de carbono, no se puede endurecer. Éste se consigue únicamente mediante un proceso bien documentado, controlado y sistemático de afianzamiento de carbono en el hierro dando como resultado el acero. El proceso de templado tendría algún efecto sobre la dureza de la herramienta, pero era preciso que hubiera carbono. La ignorancia de los detalles del templado continuó en la época medieval. Aunque no se comprendía el proceso exacto, se sabía hace mucho que la aplicación de hierro forjado con el carbón aumentaba la dureza del hierro forjado. Precisamente la palabra acero proviene del latín *aciarius*, «herrero» o *faber aciarius*. Hispania producía en época imperial acero de gran calidad.

Plinio, en su *Historia Natural*, siglo I d.C., Libro XXXIV, describe el proceso de templado utilizado por los herreros romanos. Aunque sus explicaciones son incorrectas, se afirma que se conocía y utilizaba un proceso de endurecimiento en herramientas a base de hierro (ya hemos dicho que sin el carbono es imposible endurecer el hierro). Por tanto, en el siglo I d.C. ya se conocía el acero en Roma.

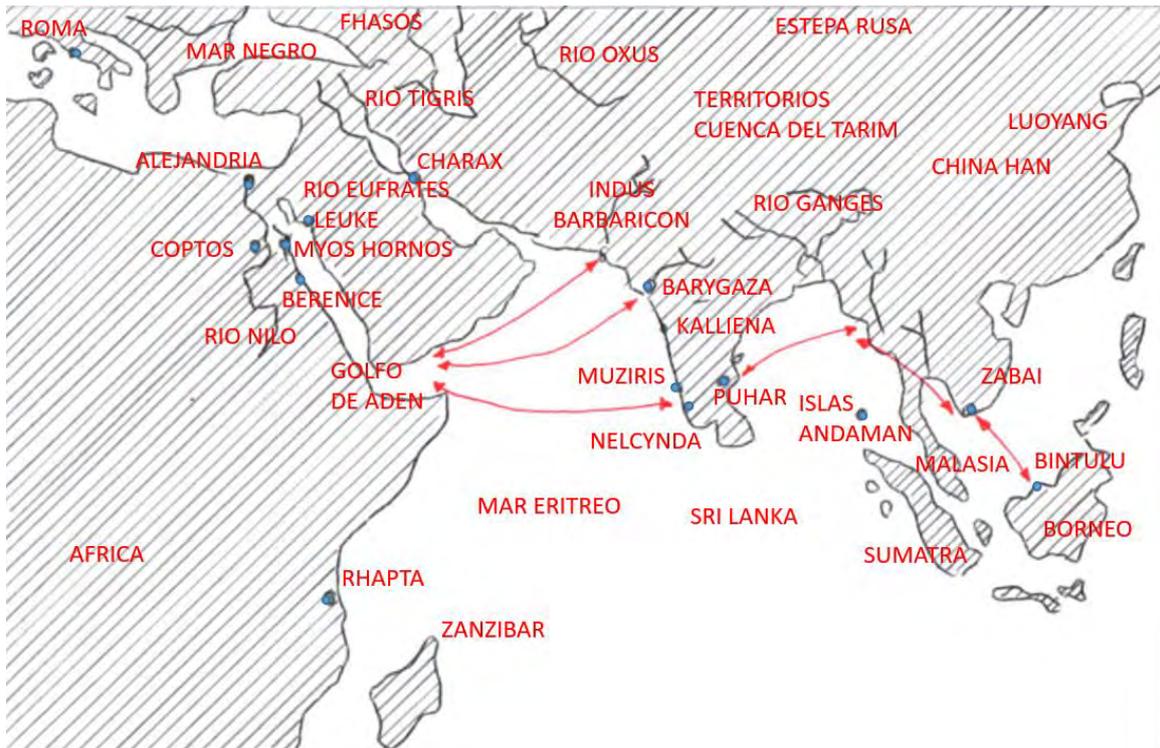
Para el siglo II d. C., el Imperio Romano había comenzado a importar barras de acero a través de sus puertos mediterráneos, como Alejandría de la India.<sup>50</sup>

La India empezó a producir acero de muy alta calidad en el 500 a.C. un acero con mucho carbono conocido como wootz.

---

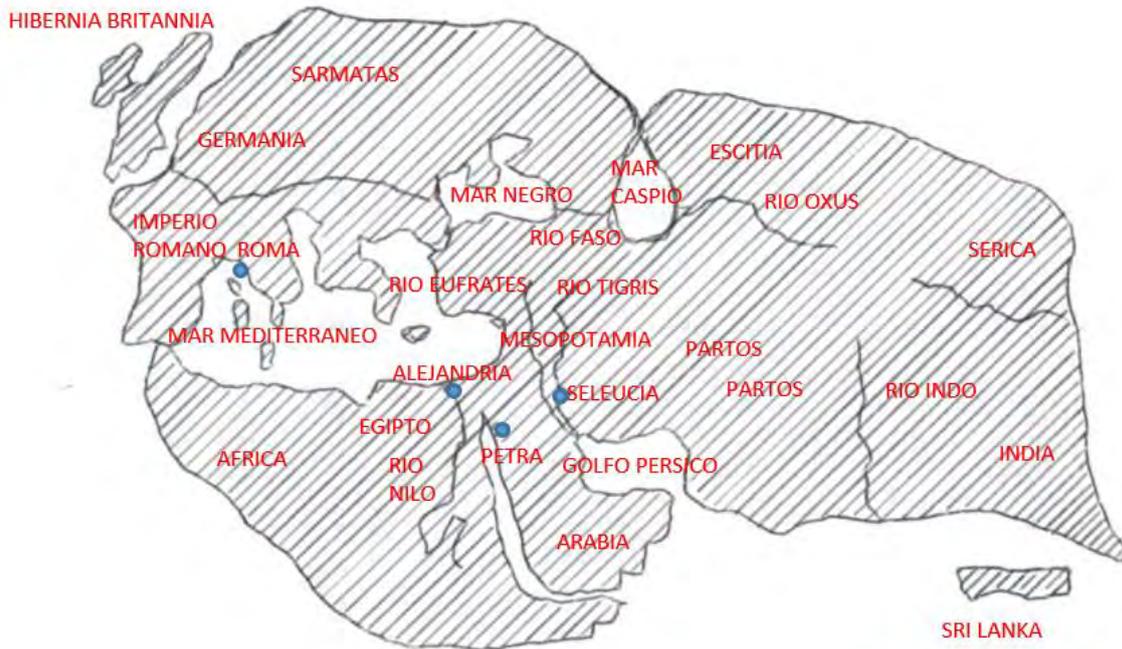
hasta Crimea y luego deben afrontar el ataque de los vándalos y los hunos. Los Sármatas son en cierto modo sucesores de los partos 247 a.C.-224 d. C. que posiblemente influirían a su vez a los celtas.

<sup>50</sup> Raul McLaughlin, *Rome and the Distant East: trade routes to the ancient lands of Arabia, India and China*, (Continuum: London, 2010), pp. 142-3.



**Figura 69.** Rutas comerciales romanas, Océano Índico siglo I d.C.

(Autoría: El autor. Fuente: Rome and the Distant East: trade routes to the ancient lands of Arabia, India and China<sup>51</sup>)



**Figura 70.** Visión de Estrabón a primeros del siglo I d.C.

(Autoría: El autor. Fuente: Rome and the Distant East: trade routes to the ancient lands of Arabia, India and China<sup>52</sup>)

Si bien los herreros romanos usaban este hierro para hacer espadas, usaban métodos alternativos a la

<sup>51</sup> Ibidem 50

<sup>52</sup> Ibidem 50

soldadura por patrones. Usaron piezas apiladas de metal fusionadas y afiladas conocidas como laminado o forja apilada, pero irregulares y con piezas unidas de pequeño tamaño. Este tipo de forja lo hemos llamado forja apilada irregular. Para crear espadas rápidamente y en mayor número. Esto significaría que las hojas tendrían núcleos no uniformes, con diferentes niveles de carbono presentes aleatoriamente en diferentes áreas de la misma hoja. La metalurgia romana se centró en la velocidad y la facilidad de fabricación, debido a la naturaleza semiindustrializada del Imperio Romano Tardío. También el coste de importar estas barras de acero de la India y otros lugares, en comparación con el uso de fuentes de hierro dentro del imperio, significaba que este acero podría utilizarse para las armas ceremoniales o decorativas más caras.

Por lo tanto, para una minoría se fabricaban hojas con el modelo de soldado patrón, con barras de acero de muy alta calidad, procedentes de la India, para otra minoría otras hojas con hierro y acero romano obedeciendo a patrones de soldadura patrón, para uso romano y dentro del imperio, y finalmente la mayor parte con métodos alternativos al soldado patrón apilando distintos elementos de hierro y acero sin llegar a la calidad de la laminación del siglo X que ya hemos comentado. Evidentemente, la calidad de las hojas de este último tipo de espadas producidas en masa era pobre en comparación con la artesanía de los herreros de armas celtas.

La calidad del hierro utilizado en la fabricación romana era a menudo mala pero útil, pero no era tan sofisticada ni tan fuerte como la técnica de la época podría haber producido en ese período. Una hoja laminada como las que usaban los legionarios romanos en comparación con una hoja soldada con patrón, estaría en clara desventaja. Si bien la hoja de la espada sería mecánicamente más resistente que una hoja soldada con patrón, el núcleo no uniforme de la hoja significaría que la hoja sería mucho más probable que se fracturara o rompiera después de impactos repetidos.

Alrededor del año 300 d. C., la soldadura por patrón era rutinaria y se fabricaban habitualmente hojas «romanas» con estructuras increíblemente complejas.

En cuanto a las espadas encontradas en Dinamarca, Canterbury-Kopki, Illerup, etc... Casi todas ellas provenían de talleres romanos que supuestamente estaban ubicados en algún lugar del sur de Alemania/Francia o a lo largo del río Rin. Los romanos del sur de Alemania solían ser miembros de tribus celtas antes de ser obligados a convertirse en romanos.

Más tarde (después del año 200 d. C.) se transformaron gradualmente en alamanes (con más o menos fuerza) antes de convertirse (con mucha fuerza) en merovingios y luego en miembros del Imperio carolingio.

Varias espadas de pantano de alrededor del año 300 d. C. encontradas en el siglo XX, se fabricaron con unos estándares muy altos de patrón de soldadura. Puede considerarse que el año 300 d. C. como el momento en que la tecnología de soldadura por patrones alcanzó su apogeo.

Existen muchas más espadas soldadas con patrón romano en los museos del norte de Europa que en Italia o el sur de Europa porque los bárbaros abandonaron muchas espadas en pantanos donde se conservaba el hierro y las pusieron en las tumbas de los guerreros. Sin embargo, los romanos no. Se dispone de muy poca información al respecto.

Podría plantearse una transición continua partiendo de la soldadura de refuerzos estructurales aleatorios a patrones de soldadura de patrones complejos.

Dado que todas las culturas (celtas y romanos) que trabajaban con hierro forjado tenían que crear algunas estructuras, teniendo hierro y acero a su alcance, para fabricar productos, (ya hemos dicho que era imposible alcanzar altas temperaturas en los hornos de floración y sólo se podían conseguir aceros localmente y en piezas de tamaño discreto) era inevitable que se desarrollaran estructuras compuestas, usando acero duro en el exterior de una hoja para los bordes.

En el caso romano ese acero bien vendría de la India o bien se produciría localmente.

Esos patrones mostraban también potencial estético de las barras retorcidas y forjada. Finalmente, las varillas rayadas se convirtieron en estándar, produciendo no solo un patrón agradable visualmente (que mostraba

estatus y poder) sino también evitando la fractura repentina y completa, especialmente en climas fríos, para todas las espadas que emplean acero de fósforo para las partes más duras.

Nos podemos imaginar muchas situaciones intermedias y eso significa que probablemente no existe un comienzo único de la soldadura patrón.

Las espadas celtas (La Tène) dan testimonio de ello. Algunas espadas tenían sus partes de hierro/acero apiladas de tal manera que podría haber resultado un patrón, posiblemente sin que el herrero se diera cuenta.

Por el contrario, otro herrero podría haber intentado producir un cierto patrón y fallado.

Sin embargo, no sabemos mucho sobre lo que pasó entre el 100 a.C. y el 300 d.C. Parece ser que en ese periodo pudieron ser los celtas los que emplearon por primera vez este tipo de forja.

Finalmente la migración de los pueblos de habla celta entre el 400 y el 250 a.C. sería posiblemente la que difundiría la técnica de la soldadura patrón. Desde sus tierras originales en Europa Central, los pueblos celtas viajaron tanto al este como al oeste, desde el norte de los Alpes hasta Asia Menor. Es probable que las tribus que viajaron a Asia Menor aprendieron el método de soldadura de patrones de los hábiles artesanos del Imperio Parto (247 a.C.-224 d.C.) y luego lo transmitieron cuando se encontraron con otras tribus celtas. A diferencia del ejército romano, no había necesidad de una producción particularmente rápida o barata entre las tribus del norte de Europa, ya que no eran estados industrializados. Las espadas que se fabricaban tenían que ser fuertes y resistentes, requerir poco mantenimiento y no necesitar ser reemplazadas con frecuencia.

Como se discutió anteriormente, las hojas soldadas con patrón eran mucho más resistentes a los impactos y roturas que sus contrapartes laminadas o apiladas (laminado y apilado aleatorio/irregular y no laminado posterior que hemos tratado a partir del siglo X). Las técnicas de herrería que usaban mezclas de hierro más débiles también fueron útiles para las tribus, ya que los hornos y fundiciones a los que habrían tenido acceso habrían sido demasiado pequeños para alcanzar la temperatura requerida para purificar adecuadamente el mineral de hierro. Debido a estos factores, la soldadura por patrones se convirtió en el principal método de herrería entre las tribus del norte de Europa para producir hojas de espada, como lo demuestra la distribución de ejemplos arqueológicos de hojas soldadas por patrones en toda Europa. La distribución también sugiere que las técnicas de forja de soldadura de patrones fueron adoptadas por las tribus de Angle, Saxon y Yute cuando ocuparon los territorios vecinos de las tribus celtas durante este período.

Al igual que los celtas, los romanos eran conocedores del soldado patrón, como otros pueblos (en Luristán, Irán, se encontró una hoja formada por una capa de acero rodeada por 2 piezas de hierro<sup>53</sup>).

Para resumir, los romanos empezaron a utilizar el acero ya en el siglo I d.C. Los celtas en el año 100 a.C. ya empleaban con regularidad la soldadura patrón y los habitantes de la India en el 500 a.C. ya conocían acero de muy alta calidad.

Los romanos empezaron a crear estructuras o patrones de soldadura, bien aprendiendo de los celtas o por necesidad de creación de estructuras y conocer y probar tanto el acero como el hierro.

Sin embargo, su sentido práctico hizo que emplearan en mayor medida la laminación (laminado apilado aleatorio) por ser más barato y rápido de producir que las espadas celtas a quienes la productividad no importaba tanto.

Finalmente esas espadas romanas con el patrón trenzado que hemos tratado en estas líneas, como la espada de Illerup (soldadura patrón) de muy buena factura pudieran haber sido hechas por celtas romanizados. Estos diseños son relevantes para el ejército romano, pero su apariencia tosca sugeriría que pudiera ser una copia por artesanos familiarizado con el simbolismo, pudiendo indicar un origen no romano (es decir, bárbaro) para las espadas y las incrustaciones o bien exportadas para el «barbaricum» como hemos indicado anteriormente

---

<sup>53</sup> Ibídem 45

y encontradas fuera de los límites norte del Imperio Romano.

## 9. Conclusiones

Con este artículo se muestra un ejemplo de datación y morfología de materiales metálicos antiguos.

Uno de los elementos de ayuda para ubicar temporalmente y clasificar una espada es conocer el proceso que se ha seguido para su factura, su forja. Se ha pretendido documentar los distintos métodos en las distintas épocas.

Se entrelazan elementos históricos, migraciones, imperios, contactos entre romanos, bárbaros, rutas comerciales, elementos bélicos, forma de hacer la guerra, tipo de espada, larga, de dos filos, típica de caballería... y finalmente elementos técnicos como el tipo de forja.

El método de forja patrón se empleará por los romanos a partir del siglo II d.C. cuando ya era utilizado por los celtas en el 100 a.C.

Posiblemente los celtas aprendieron este método de forja de los partos. El Imperio Parto duró del 247 a.C. hasta el 224 d.C. Los celtas ya empleaban este método en el 100 a.C.

En el 300 d.C. la forja patrón fue utilizada en toda Europa, tanto por los romanos como las tribus germánicas.

Los romanos pudieron haber aprendido de los celtas el método del patrón soldado o pudieron llegar a esa conclusión mediante el refinamiento y mejora del método de apilamiento irregular/aleatorio.

El método de laminación apareció en Europa en el siglo X y en Japón en el siglo XII.

La espada objeto del estudio se puede considerar como un arma empleada en el siglo X-XI d.C., de acero, fabricada con el procedimiento de laminación por forja. Se trata de la típica espada medieval de hoja ancha, acanaladura central y dos filos, con punta roma. Desde luego parece forjada por el procedimiento de laminación o apilamiento, no se observa la estructura de la soldadura patrón. Este tipo de arma fue empleada tanto en caballería, infantería como en otras armas incluyendo el germen de la Armada de Castilla.

## 10. Referencias bibliográficas

- Adam Thiele, Jiří Hošek, *Mechanical Properties of Medieval Bloomery Iron Materials - Comparative Tensile and Charpy-tests on Bloomery Iron Samples and S235JRG2*. [Mechanical Properties of Medieval Bloomery Iron Materials - Comparative Tensile and Charpy-tests on Bloomery Iron Samples and S235JRG2 \(bucavasgyuro.net\)](https://bucavasgyuro.net)
- ALAN R. Williams Ph. D., *Methods of manufacture of swords in medieval Europe: illustrated by the metallography of some examples*. Gladius XIII (1977), pp. 75-101 ISSN 0435-029X <<https://gladius.revistas.csic.es/index.php/gladius/article/view/146>>
- Barta, Patrick *Patterns in pattern-welded swords*. <<http://www.templ.net>>;
- Behmer. *Das zweischneidige Schwert der germanischen Völkerwanderungszeit, La espada de doble filo del Período de la Migración Germánica*, Elis Stockholm College. Tryckeriaktiebolaget Svea, 1939. [history.org.ua/LiberUA/Behmer\\_1939/Behmer\\_1939.pdf](http://history.org.ua/LiberUA/Behmer_1939/Behmer_1939.pdf)
- Biborkis, Marcin y Ilkjær, Jørgen. Die Schwerter und Die Schwertscheiden. Katalog, Tafeln und Fundlisten Volumen 11-12 Jutland Archaeological Society Publications, 2006
- Brian Gilmour, The metallurgy, development, and purpose of pattern welding Historical Metallurgy 51(2) for 2017 (published 2019) 57–70
- Engelhardt; photographed in the library of the «Schleswig-Holstein Landesmuseum» <[https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap\\_b/advanced/tb\\_3\\_3a.html](https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_b/advanced/tb_3_3a.html)>
- Estruch y Cumella, Don Jose. Museo Armería, reproducción fototípica, ejemplares más notables que en él se conservan, Barcelona, 1896. pág. 27/39

- Erik Szameit und Mathias Mehofer: «technologische untersuchungen an waffen des frühmittelalters aus oberösterreich», Jb. Oö. Mus.-Ver. (Oberösterreichischer Musealverein), Bd. 147/1, Linz 2002 <[https://www.zobodat.at/pdf/JOM\\_147a\\_0127-0168.pdf](https://www.zobodat.at/pdf/JOM_147a_0127-0168.pdf)>
- Feuerbach, Ann. An investigation of the varied technology found in swords, sabres and blades from the Russian Northern Caucasus iams 25 for 2005, 27-43  
[iams\\_25\\_2005\\_feuerbach.pdf \(ucl.ac.uk\)](#)
- Gunbai, Iron and Steel Technology in Japanese Arms & Armors - Part 3: Bladesmithing January 27, 2019 i: Ancient Japanese Warfare  
[Iron and Steel Technology in Japanese Arms & Armors - Part 3: Bladesmithing \(gunbai-militaryhistory.blogspot.com\)](#)
- Jeffrey. Archeometallurgy related to swords, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH 43201
- Lamadrid , Antonio Sala de Armas Fénix , introducción a la tipología de Oakeshot, Merowinger Damascene Sword  
[http://dtrinkle.matse.illinois.edu/MatSE584/kap\\_5/illustr/i5\\_1\\_6.html](http://dtrinkle.matse.illinois.edu/MatSE584/kap_5/illustr/i5_1_6.html)>
- Maryon, Herbert, A Sword of the Nydam Type, from Ely Fields Farm, near Ely..Proceedings of the Cambridge Antiquarian Society 41. Vol 41, pp. 73-76. <<https://doi.org/10.5284/1072860>>
- Paisnel Callum, University of Winchester. The Use and 'Life-Cycle' of Viking Age Swords, March 2016, DOI:10.13140/RG.2.2.34186.77767
- Panseri, C. Ricerche metallografiche sopra una spada da guerra del XII secolo, Milano: Associazione Italiana di Metallurgia, 1954
- Dr. Petersen, Jan Greve Thaulow , the norwegian viking swords translated by Kristin Noer  
<<http://www.vikingsword.com/petersen/ptsn054.html#anchor294927>>  
<<http://www.vikingsword.com/petersen/>>
- Raul McLaughlin, Rome and the Distant East: trade routes to the ancient lands of Arabia, India and China, (Continuum: London, 2010), pp. 142-3.
- Salvemini, Filomena; Luzin, Vladimir; Grazi, Francesco, Gatenby, Sue, Kim, Min-Jung. Structural Characterization of Ancient Japanese Swords from MAAS Using Neutron Strain Scanning Measurements. Pag 2.  
<<http://dx.doi.org/10.21741/9781945291173-75>>

## UNA ALTERNATIVA RIGUROSA Y FLEXIBLE PARA LA CERTIFICACIÓN SAFETY DE SUBMARINOS

CN (CIA) D. PEDRO ANTONIO CASAS ALCAIDE

Doctor Ingeniero Naval por la UPM

**Resumen.-** Este trabajo constituye una breve introducción a los servicios que ofrece una Sociedad de Clasificación en relación con los procesos de adquisición y apoyo al ciclo de vida de cualquier submarino, al marco de certificación SAFETY para submarinos existente en la OTAN actualmente y a la manera en que estos dos planteamientos podrían combinarse para alcanzar un equilibrio satisfactorio entre rigor y flexibilidad.

### 1. Introducción

Según la experiencia del autor, la necesidad de apoyo externo en todo aquello relacionado con los aspectos SAFETY de cualquier plataforma submarina (en el sentido de contar con una opinión experta que permita reducir el nivel de incertidumbre existente en las actividades técnicas del astillero) es una de las más críticas tanto en el proceso de adquisición como durante el resto del CV.

Por otro lado, las SC son organismos expertos en auditar a nivel SAFETY la actividad técnica de cualquier astillero tanto en la fase de adquisición como durante el resto del CV de toda clase de plataformas navales, existiendo actualmente tres (que conozca el autor) dentro del ámbito de los submarinos militares:

- El BV francés.
- El DNV noruego (fusionado con el antiguo GL alemán).
- El LR inglés.

A la vista de lo anterior, el objetivo de este trabajo será presentar una de las maneras en que podría establecerse un proceso de certificación SAFETY para submarinos capaz de alcanzar un equilibrio razonable entre rigor y flexibilidad, para lo cual se ha optado por dividir la exposición tal como sigue:

- Se empezará por presentar una descripción básica de las actividades de V&V y auditoría externa.
- A continuación, se describirán los servicios técnicos disponibles en cualquiera de las tres SC arriba citadas.
- Después se describirá el marco de certificación SAFETY existente actualmente en la OTAN en el ámbito de los submarinos.
- Lo siguiente será presentar algunas reflexiones básicas sobre la manera de combinar auditorías externas formales y no formales.
- Por último, se describirá una posible vía para integrar los servicios de una SC en el marco de certificación antes mencionado a fin de establecer un proceso de V&V a nivel SAFETY riguroso (a la par que flexible) durante la construcción y CV de este tipo de buques.

Tabla 1.- Abreviaturas

BV	BUREAU VERITAS
CV	Ciclo de Vida
DNV	DET NORSKE VERITAS
ECS	Elemento Crítico SAFETY
GL	GERMANISCHER LLOYD
ISSF	INTERNATIONAL SUBMARINE SAFETY FORUM
LR	LLOYD REGISTER
NSC	NAVAL SUBMARINE CODE (ANEP-102)
OMI	Organización Marítima Internacional
PENT	Plan de Estándares y Normas Técnicas
SC	Sociedad de Clasificación
UNDEX	UNDERWATER EXPLOSION
V&V	Validación y Verificación

El trabajo finalizará con un breve resumen de las conclusiones alcanzadas y algunos comentarios de interés.

## 2. Actividades de V&V y auditoría externa

Durante la fase de adquisición (así como durante el resto del CV) de cualquier submarino hay que llevar a cabo una serie de actividades técnicas amplia y variada, siendo necesario someter todas y cada una de ellas a un proceso de V&V que permita reducir las incertidumbres existentes a niveles aceptables.

En general, es recomendable que al ejecutar las actividades de V&V arriba citadas se cuente con el apoyo de una entidad independiente de capacidad acreditada, lo cual puede materializarse de dos formas (a menudo complementarias, por lo que en aras de la simplicidad, ambas se reconocerán como “auditorías externas” de aquí en adelante):

- La entidad independiente ejecuta directamente las actividades V&V.
- El astillero se encarga de las actividades V&V y la entidad independiente se limita a auditar su efectividad/pertinencia y correcta ejecución.

Conviene advertir que el apoyo de una entidad independiente constituirá una exigencia prácticamente ineludible cuando las actividades de V&V involucren algún ECS.

Tal y como ya se ha dicho, las actividades V&V constituyen procesos cruzados (que se superponen al resto de actividades de cualquier proyecto) sobre los que conviene hacer algunas reflexiones para facilitar al lector la comprensión del resto del documento.

En cuanto al proceso de validación (en el presente contexto, validación y calificación serán dos conceptos que se tomarán como sinónimos una vez más en aras de la simplicidad), es importante entender que podrá llevarse a cabo según alguna, o incluso varias, de las tres vías de actuación siguientes:

- Cálculo/simulación.
- Ensayos/pruebas con prototipos.
- Experiencia previa incluida en el PENT.

La necesidad de usar una u otra de estas tres vías de actuación vendrá indicada en el PENT que se haya definido al inicio del proyecto, siendo esto así porque en realidad todas ellas dan solución al mismo problema (comprobar que cada actividad cumple con la finalidad última que motivó su incorporación al proyecto).

En cuanto al proceso de verificación (comprobar que cada una de las actividades ha sido ejecutada y, además, de forma correcta), contemplará siempre la implementación de dos conceptos cuyos detalles deberán aparecer en el PENT y, a menudo, interpretarse bajo la supervisión de una entidad independiente:

- Aseguramiento de la calidad.
- Controles tecnológicos.

Estos dos conceptos dan solución a problemas distintos (motivo por el que ambos son de ejecución obligatoria), indicándose a continuación las exigencias más típicas (que no las únicas) relacionadas con cada uno de ellos:

#### Aseguramiento de la calidad

- Existencia de procedimientos de trabajo escritos.
- Evidencia de que dichos procedimientos se han aplicado correctamente (hojas de control con fecha y firma del operario, hojas de registro de parámetros monitorizados durante su ejecución, listados de personal cualificado, etc.).
- Gestión de no conformidades.

#### Controles tecnológicos

- Inspecciones y ensayos (destructivos y/o no destructivos) tras la finalización de cada procedimiento trabajo.
- Pruebas de aceptación (ya sean en fábrica, en puerto o en la mar).
- Cálculos AS BUILT tras finalizar procedimientos de trabajo identificados como especialmente críticos (son una comprobación “a posteriori” que se hace para aceptar o no elementos que han quedado fuera de las tolerancias establecidas).

### **3. Servicios técnicos disponibles en una SC**

Las SC tienen capacidad y experiencia para auditar cualquier actividad técnica que pueda llevar a cabo el astillero en relación con cualquiera de los aspectos SAFETY relevantes en un submarino (incluyendo los asociados a sistemas como el AIP), tanto en la fase de diseño y construcción como en el resto del CV.

En este sentido, conviene aclarar que las auditorías llevadas a cabo pueden adoptar un carácter estrictamente formal (en el sentido indicado en el punto 5) si así se desea, lo cual podría implementarse según dos vías de acción básicas:

- Clasificación: según esta vía, la SC certificaría el cumplimiento de todo lo exigido a un submarino militar en aquellos aspectos incluidos en la cota de clase solicitada.
- Certificación: según esta alternativa, la SC certificaría el cumplimiento de lo exigido en el PENT previamente acordado, ofreciendo una gran flexibilidad para gestionar situaciones complicadas (como por ejemplo la de un submarino que no haya sido diseñado/construido bajo la reglamentación de la SC).

Si por el contrario no fuese necesaria una auditoría formal, las SC también ofrecen la posibilidad de contratar una gama de servicios de consultoría muy variados, lo que permitiría disponer de:

- Una segunda opinión en temas críticos de índole SAFETY sobre los que pudiera haber dudas, dejando a criterio del consultor el alcance/contenido de sus aportaciones.

- Estudios de profundidad técnica elevada para resolver cualquier problema que pudiera presentarse: realización de cálculos estructurales justificativos, elaboración de planes de mantenimiento, etc. (en este caso, con un valor añadido ostensiblemente mayor que el esperable de una segunda opinión como la que se acaba de citar).

Se hace notar que estos servicios de consultoría pueden ser realizados de manera simultánea a la ejecución de auditorías formales, en cuyo caso se llevarían a cabo por divisiones totalmente independientes de la SC al objeto de asegurar que no haya conflictos al expedir los certificados correspondientes a estas últimas.

En cuanto a la forma de integrar los servicios de la SC durante el ciclo de vida, se plantean las siguientes posibilidades:

#### Según sean de consultoría o de clasificación/certificación

- En el primer caso podría llegarse a contratos independientes tanto con el propietario del submarino como con el astillero.
- En el segundo caso, quizá lo más adecuado fuese llegar a un acuerdo entre el propietario y el astillero para contratar a la SC como entidad de tercera parte.

#### Según sea el alcance temporal fijado al efecto

- Acuerdo marco de tipo general durante periodos prolongados.
- Apoyos puntuales durante una acción de mantenimiento (una gran carena por ejemplo).

Finalmente, hay algunas ventajas que conviene tener en cuenta en relación con la información de base usada por cualquier SC:

- Está estructurada de forma sistemática y es de acceso público, sin restricción alguna en cuanto a confidencialidad.
- Es moderna, estando sometida a un proceso continuo de revisión y actualización.
- Hace un uso extensivo de normas internacionalmente reconocidas (ISO, etc.), las cuales se adaptan perfectamente a la infraestructura industrial española.

#### **4. Marco de certificación SAFETY para submarinos existente en la OTAN**

En el año 2009 la OTAN publicó la primera edición del NAVAL SHIP CODE como ANEP-77 (para buques militares de superficie), al objeto de ofrecer un marco de certificación SAFETY con un alcance y un nivel de detalle esencialmente equivalentes al SOLAS de la OMI para buques civiles.

Sobre éste código se mantiene un ciclo de actualización anual con grupos de trabajo que se centran en diferentes áreas del mismo, y las actualizaciones aceptadas se transmiten a la OTAN para su revisión y publicación en la siguiente edición.

Posteriormente al año 2009, algunos miembros del ISSF (en el marco de la OTAN) decidieron elaborar un código equivalente al ANEP-77 pero para submarinos (NSC), y así se empezó a trabajar en el ANEP 102.

Los grupos de trabajo tomaron el ANEP-77 como base y desarrollaron capítulos y textos específicos para submarinos (manteniendo una similitud total con dicho ANEP en cuanto a estructura básica y metodología de generación de requisitos) hasta alcanzar un nivel de madurez suficiente para su publicación en el año 2020.

#### 4.1. Descripción general del NSC

El ANEP-102 es un código que posibilita la consecución de un nivel SAFETY adecuado tanto en la fase de adquisición como a lo largo del CV mediante planteamientos capaces de adaptarse a las peculiaridades de un submarino militar, habiendo sido desarrollado conjuntamente por un grupo de Armadas y SC para su publicación en el ámbito de la OTAN.

Proporciona una estructura de requisitos flexible basada en metas, con respecto a la cual una Administración (o Autoridad Naval) puede certificar que un submarino es seguro para operar y que, en definitiva, cumple los objetivos últimos de la política SAFETY que se haya definido al efecto.

El NSC consta de tres partes:

Parte 1: contiene los requisitos/metras de cada una de las áreas técnicas establecidas en el código, ordenados según el nivel de detalle alcanzado en su definición.

Parte 2: contiene soluciones específicas que permiten justificar el cumplimiento de los requisitos incluidos en la parte 1.

Estas soluciones no son las únicas, pudiendo establecerse otras mediante combinación de diferentes alternativas:

- En base a las reglas de alguna SC.
- En base a normas de ámbito internacional (OMI, ISO, etc.).
- En base a normas internas del astillero (debidamente validadas).
- En base a las reglas impuestas por la propia autoridad naval.
- Otros.

Y respecto a la combinación de alternativas finalmente elegida, es interesante observar que vendría a conformar el PENT citado en el punto 2 (o STANDARDS PLAN según el NSC).

Nótese que la clasificación por áreas técnicas y ordenación por niveles de detalle de las metas establecidas en la parte 1 conforman en realidad un SAFETY CASE de alto nivel (ver una definición de esto último en cualquiera de las muchas referencias existentes) cuyo objetivo es facilitar el desarrollo de la parte 2 o de un PENT equivalente.

Parte 3: contiene la justificación/antecedentes que permite entender la forma finalmente adoptada por las partes 1 y 2.

Antes de continuar, conviene llamar la atención sobre algunos temas importantes:

- Las partes 2 y 3 del NSC solo están disponibles para las entidades que participan activamente en su desarrollo/actualización.
- Dada la flexibilidad del NSC, puede aplicarse a submarinos incluso tras su entrada en servicio (y por tanto, que no hayan sido construidos bajo el mismo).
- Aunque es posible el uso parcial/selectivo de requisitos, el NSC recomienda no hacerlo debido a la interdependencia que exhiben muchos de ellos.

## 4.2. Aplicabilidad y limitaciones del NSC

Un aspecto esencial del NSC pasa por entender que, tal y como se ha concebido, no contempla de manera explícita los efectos del combate. No obstante, cabe indicar que la aplicación del NSC llevaría de forma implícita a unas capacidades de supervivencia en principio aceptables, salvo quizá en lo referente al comportamiento de ciertos equipos (y sus montajes elásticos) frente a fenómenos UNDEX.

Exponiéndolo de otra forma: es difícil cumplir con la parte 1 del NSC sin obtener a la vez un comportamiento básicamente aceptable frente a los efectos del combate, aunque este no se podría valorar en detalle a menos que se llevase a cabo un esfuerzo deliberado por analizar las soluciones incluidas en la parte 2 del NSC (o derivadas del PENT establecido al efecto).

Adicionalmente a lo anterior, y a pesar de que el NSC es aplicable a submarinos con todo tipo de plantas propulsivas, conviene poner de relieve algunas limitaciones que aparecen en el mismo:

- Queda fuera del alcance todo lo relacionado con el sistema de combate y con el armamento embarcado.
- No se analizan las competencias necesarias para operar el buque de forma segura (se presupone que las personas que embarcan en un submarino son físicamente aptas, tienen un buen conocimiento de sus sistemas y han recibido formación sobre los procedimientos de seguridad y manejo de los diferentes equipos).
- Los aspectos de salud y seguridad laboral en los diferentes locales no quedarían totalmente cubiertos.
- No se contemplan las condiciones de vida bordo.
- Tampoco se contempla la protección del medio ambiente.

Todos estos temas deberán incluirse como parte de otros sistemas de gestión distintos (seguridad laboral, protección del medio ambiente, etc.), según lo que cada marina decida aplicar en un momento dado. En cualquier caso, el cumplimiento del NSC no exime de la responsabilidad de cumplir con las convenciones y tratados internacionales que cada estado haya decidido respetar.

## 5. Auditorías externas de naturaleza formal y no formal

La necesidad de contar con una opinión experta e independiente que permita reducir el nivel de incertidumbre existente en las actividades técnicas del astillero se suele cubrir con una combinación de auditorías formales y no formales sin coordinación explícita entre ellas, presentando este enfoque algunos aspectos críticos sobre los que merece la pena hacer algunas reflexiones básicas.

Lo primero que hay que entender es que una auditoría externa no podrá considerarse formal en un sentido estricto:

- Si no hay un cuerpo reglamentario (un PENT según la terminología usada en el punto 2) claramente definido que sirva como base de la misma.
- Sin un documento final donde se certifique el cumplimiento de lo exigido en el cuerpo reglamentario arriba citado.

La flexibilidad que ofrece lo anterior puede resultar muy atractiva, pero también puede conducir a niveles de incertidumbre difíciles de justificar (amparándose en su prestigio, hay auditores que acaban por hacer aportaciones de escaso valor añadido en las que ni siquiera revelan las fuentes de información utilizadas).

Una forma de evitar situaciones como la que se acaba de describir pasa por establecer auditorías formales, y en este sentido, lo segundo que hay que entender es que una auditoría formal solo garantiza el

cumplimiento del PENT que se haya establecido, sin eliminar necesariamente la posibilidad de que este último resulte inadecuado. Nótese que los efectos de un PENT inadecuado se detectan frecuentemente por la aparición (a menudo tardía) de:

- ECS importantes no incluidos en el alcance.
- Actividades importantes no auditadas (o solo parcialmente auditadas) a pesar de que los ECS afectados se incluyeron en el alcance.

Establecer una combinación satisfactoria de auditorías formales y no formales (así como fijar un PENT adecuado para las primeras) constituye un problema cuyo análisis se ha dejado fuera del presente trabajo, aunque es fácil intuir que buena parte de la solución residirá en:

- Usar un esquema conceptual sistemático que facilite la identificación de zonas de solape y/o sin cubrir (como por ejemplo, el ofrecido por el NSC).
- Disponer de un equipo humano multidisciplinar con la formación y experiencia necesarias a tales efectos.

## 6. Integración de una SC en la construcción y apoyo al CV de un submarino

A la vista de todo lo anterior, parece adecuado definir un marco de certificación en el que cualquier autoridad naval pueda apoyarse en una entidad independiente tipo SC para establecer normas, métodos y procedimientos trazables con metas comunes a todas las marinas aliadas, facilitando así la definición de un PENT adecuado y, en definitiva, la comprobación de que el nivel SAFETY alcanzado por un submarino dado resulta satisfactorio.

Esto puede conseguirse mediante planteamientos basados precisamente en la aplicación del ANEP 102, en los que la Autoridad Naval sería la responsable de:

- ACTIVIDAD 1: Establecimiento inicial de un PENT (o STANDARDS PLAN según el NSC) y valoración inicial de cada submarino para comprobar el grado de cumplimiento de dicho PENT.
- ACTIVIDAD 2: Establecimiento y aplicación de un sistema de revisiones periódicas para garantizar el cumplimiento del PENT arriba citado (y por tanto, de la parte 1 del NSC) durante el resto del CV.
- ACTIVIDAD 3: Definición y aplicación de procedimientos para la selección y posterior delegación en las organizaciones reconocidas por la Autoridad Naval para desempeñar cualquiera de las funciones que puedan derivarse a partir de las actividades 1 y 2.

En la figura 1 puede verse un esquema de trabajo genérico basado en lo arriba indicado que podría aplicarse durante la construcción y posterior CV, en donde la Autoridad Naval tendría relación tanto con la organización reconocida como con el responsable del mantenimiento y control de la configuración, pero no con el astillero de apoyo.

Nótese que la SC sería precisamente la organización reconocida en que se apoyaría la Autoridad Naval para certificar que el submarino es aceptable a nivel SAFETY, a través de un régimen de revisiones, inspecciones y pruebas que cubriría los ámbitos del NSC cuyo cumplimiento se haya considerado relevante.

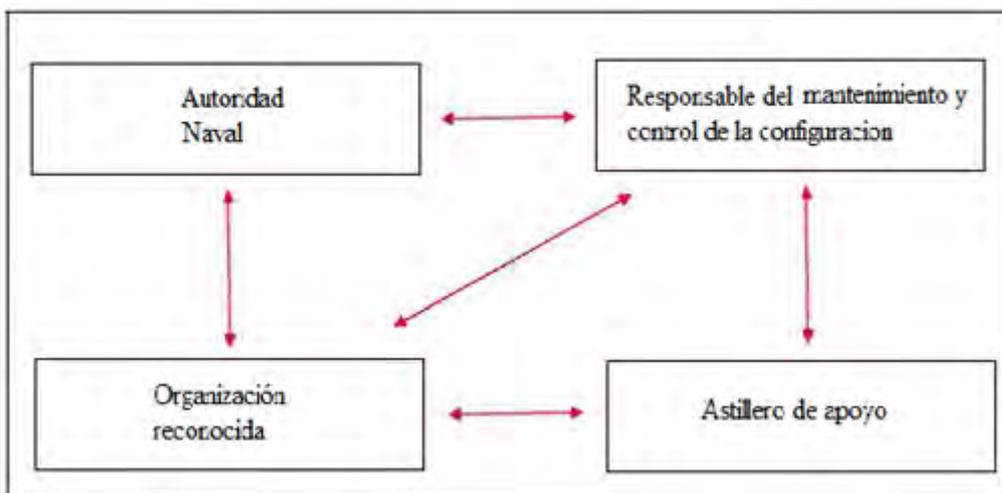
Así pues, la SC actúa bajo mandato de la Autoridad Naval (al margen de cómo pueda ser contratada/financiada) en un proceso que proporciona una garantía independiente del cumplimiento de las normas de seguridad establecidas en base a unos conocimientos y experiencia acreditados.

Por último, se van a presentar algunas reflexiones de interés sobre las dos tareas básicas incluidas en la actividad 1:

- Establecimiento inicial del PENT.
- Valoración inicial de cada submarino para comprobar el grado de cumplimiento de dicho PENT.

La primera es que estas dos tareas darán lugar previsiblemente a procesos largos y complejos (tanto más así cuanto más tarde tenga lugar su inicio), constituyendo por tanto dos puntos críticos que convendría abordar:

- Con la participación del astillero de apoyo (esto último no resulta imprescindible pero sí aconsejable).
- A la mayor brevedad posible si no se quiere demorar en exceso el inicio de la actividad 2.



**Figura 1.-** Esquema de trabajo genérico en base al NSC

La segunda reflexión tiene que ver con la posibilidad de que surjan incumplimientos graves del PENT al efectuar la valoración inicial del estado de cada submarino. Si este fuera el caso, la forma usual de proceder pasaría por alguna de estas tres vías de actuación:

- Aceptación directa del riesgo asociado al incumplimiento (en este caso no hay acciones derivadas salvo la justificación formal de los motivos que llevan a dicha aceptación).
- Gestión del riesgo asociado al incumplimiento adoptando medidas que impliquen reducción de algunas de las prestaciones (re-planificación de mantenimientos, restricciones de tipo operativo, etc.).
- Gestión del riesgo asociado al incumplimiento adoptando medidas que no impliquen reducción de prestaciones, por muy onerosas que sean (rediseños, reprocesamientos, etc.).

En la opinión del autor, la detección temprana de posibles incumplimientos frente al PENT que se haya establecido constituye una enorme ventaja incluso aceptando de forma directa el riesgo asociado a los mismos, pues siempre será mejor tomar decisiones con fundamento que hacerlo sin tener ni idea de sus implicaciones.

## 7. Conclusiones y comentarios finales

Según la experiencia del autor, la necesidad de apoyo externo en todo aquello relacionado con los aspectos SAFETY de cualquier plataforma submarina (en el sentido de contar con una opinión experta que permita reducir el nivel de incertidumbre existente en las actividades técnicas del astillero) es una de las más críticas tanto en el proceso de adquisición como durante el resto del CV.

Cuando una actividad técnica involucra algún ECS, es imprescindible que la auditoría correspondiente sea llevada a cabo por entidades independientes del astillero, y en este sentido, de entre todas las opciones existentes se considera que el marco de certificación constituido por el ANEP-102 (junto con la contratación de una SC como organización reconocida) constituye la más adecuada a los efectos de alcanzar unos niveles SAFETY satisfactorios durante la construcción y CV de cualquier submarino.

La contratación de una SC no implica eliminar otros órganos auditores (ya sean de naturaleza formal o no), sino más bien complementar su actividad con la de un organismo experto que actuando en paralelo y de manera independiente permita establecer una capa de seguridad adicional, sobre todo en las primeras fases de servicio activo de submarinos de nuevo diseño.

A medida que la experiencia acumulada tras los primeros años de servicio empiece a estar disponible (lo cual implica completar al menos 2 o 3 grandes carenas en el primer submarino de series de nuevo diseño), se podrían analizar las siguientes alternativas:

- Mantener en paralelo las actividades de la SC y de cualquier otro órgano auditor disponible con total independencia de los solapes que pueda haber entre las mismas.
- Por el contrario, modificar el alcance de las actividades desarrolladas por los organismos arriba citados al objeto de establecer una combinación de auditorías formales y no formales lo más eficiente posible.

Por último, y a modo de curiosidad, comentar que seis años antes de que el NSC fuese publicado, el autor ya describía en la referencia [1] cómo elaborar un SAFETY CASE de alto nivel siguiendo una metodología similar a la usada en el desarrollo de dicho NSC.

## **8. Referencias bibliográficas**

[1] **P.A. Casas**, 2014, *Metodología de generación de requisitos técnicos de seguridad para submarinos*, Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada nº07.

## FUNDAMENTOS CFD DE APLICACIÓN EN INGENIERÍA III: DISCRETIZACIÓN

CC (CIA) D. JULIO MANUEL PERNAS URRUTIA

Doctor Ingeniero Naval y Oceánico

### Resumen

Del conjunto de técnicas CFD («*Computational fluid dynamics*») para la resolución de problemas en los que intervienen fluidos, los métodos de discretización van a consistir en la división del dominio en porciones o celdas, en cuyos centroides se van a definir los valores de la solución al problema.

De la totalidad de métodos de discretización existentes, el conocido como método de los volúmenes finitos va a ser uno de los más utilizados en el campo de los CFD, debido a que permitirá evaluar expresiones exactas de la solución dentro de las celdas del dominio.

En el presente artículo se realiza una breve descripción del método de los volúmenes finitos, junto con el esquema de interpolación upwind necesario para conocer las velocidades en los centros de las caras de las celdas del mallado usado para la discretización del dominio.

También se exponen conceptos relacionados con la calidad, tipos y características del mallado, así como las denominadas funciones de pared para la correcta definición del perfil de velocidades de flujo próximo a la pared. Finalmente, se muestra un ejemplo de aplicación de todos los conceptos abordados en el presente artículo.

### 1. Introducción

Los orígenes de las técnicas CFD se remontan al año 1822, cuando Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes desarrollan el sistema de ecuaciones conocido como «*ecuaciones de Navier-Stokes*» o ecuaciones de gobierno de los fluidos, con el fin de describir el comportamiento de flujos viscosos.

Antes de la existencia de los ordenadores, las ecuaciones de gobierno de los fluidos únicamente podían resolverse de forma analítica y siempre bajo ciertas aproximaciones y geometrías simples.

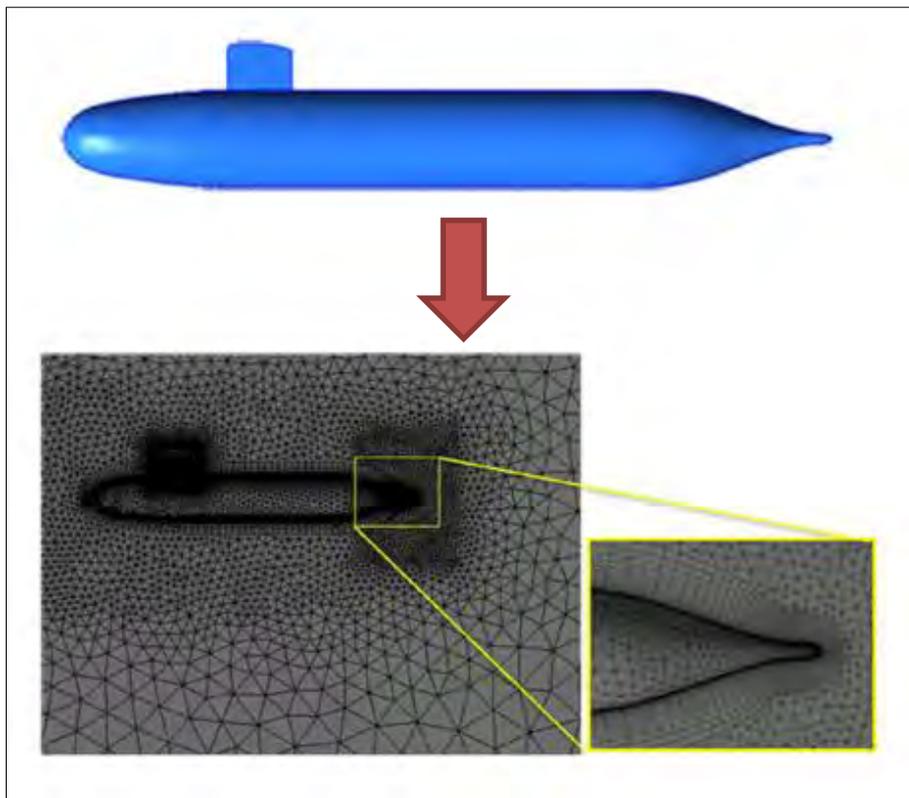
Aunque la resolución analítica de las ecuaciones de gobierno proporciona resultados instructivos que permiten comprender el comportamiento de los fluidos en casos sencillos, para la resolución de sistemas más complejos se precisa del uso de ordenadores junto con técnicas de cálculo numérico más complejas, lo que se conoce como técnicas CFD.

Dentro de las técnicas CFD, los métodos de discretización consisten en la división de una función continua en la suma de funciones discretas, donde los valores de la solución se definen para cada punto del espacio y en función del tiempo.

De los diferentes métodos de discretización existentes, el método de los «*volúmenes finitos*» FVM («*Finite Volume Method*») va a permitir pasar las leyes de gobierno de los fluidos de ecuaciones diferenciales parciales a ecuaciones algebraicas referidas a los centroides de cada una de las celdas que componen el dominio.

En el FVM, las integrales de volumen de una ecuación diferencial parcial que contienen términos de divergencia se van a convertir en integrales de superficie mediante la aplicación del teorema de la divergencia, evaluándose como flujos a través de cada volumen finito en los que se ha dividido el dominio. En este sentido, el FVM va a ser un método conservador, donde el flujo que ingresa dentro de un volumen dado será idéntico al que sale del volumen adyacente.

Otra de las ventajas del FVM es que evalúa expresiones exactas para el valor promedio de la solución en un volumen y utiliza estos datos para construir aproximaciones de la solución dentro de las celdas, a diferencia de otros métodos de discretización como, por ejemplo, el de las «diferencias finitas» FDM («*Finite Difference Method*»), donde se aproximan las derivadas utilizando valores nodales, o el de los «elementos finitos» FEM («*Finite Element Method*»), donde se crean aproximaciones locales de una solución utilizando datos locales, construyéndose de esta forma una aproximación a la solución global a partir de la unión de soluciones.



**Ilustración 1.** Mallado 2D proyecto SUBOFF – DARPA («*Defense Advanced Research Projects Agency*») <sup>[1]</sup>

## 2. Método de los volúmenes finitos

La aplicación del método de los volúmenes finitos como técnica de discretización del dominio fluido va a permitir el paso de la forma diferencial a la matricial de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento: <sup>[2]</sup>

$$MU = B \quad (1)$$

Debido a la presencia de términos no lineales, habrá que recurrir al empleo de «*solvers*» para, a través de un proceso iterativo, obtener la ecuación en forma de matriz «*linealizada*».

La ventaja de emplear el método de los volúmenes finitos radica en que la matriz de coeficientes obtenida a partir del proceso de discretización será independiente del tipo de mallado seleccionado para la discretización del dominio, además de aplicar las ecuaciones de conservación directamente sobre el dominio.

A partir de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, para el caso de flujo incompresible y estacionario: <sup>[3]</sup>

$$\nabla \cdot (\vec{v}\vec{v}) = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nabla \cdot (\nu\nabla\vec{v}) + \vec{g} \quad (2)$$

Integrando la anterior ecuación a lo largo de una celda genérica (p): <sup>[4]</sup>

$$\int_V \left[ \nabla \cdot (\vec{v}\vec{v}) + \frac{1}{\rho}\nabla p - \nabla \cdot (\nu\nabla\vec{v}) - \vec{g} \right] dV = 0 \quad (3)$$

Desarrollando la anterior ecuación término a término:

$$\int_V [\nabla \cdot (\vec{v}\vec{v})] dV = \int_V \left[ -\frac{1}{\rho}\nabla p \right] dV + \int_V [\nabla \cdot (\nu\nabla\vec{v})] dV + \int_V [\vec{g}] dV \quad (4)$$

Cada uno de los términos que forman parte de la anterior ecuación recibirá un tratamiento particular. Los términos fuente constantes, como la gravedad, serán fáciles de integrar:

$$\int_V [\vec{g}] dV = \vec{g} V_p \quad (5)$$

donde  $V_p$  es el volumen de la celda (p).

En cuanto a los términos convectivo y difusivo de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, estos requieren de un tratamiento más complejo, debido a la presencia del operador divergencia ( $\nabla \cdot$ ):

$$\underbrace{\int_V [\nabla \cdot (\vec{v}\vec{v})] dV}_{\text{Convección}} = \int_V \left[ -\frac{1}{\rho}\nabla p \right] dV + \underbrace{\int_V [\nabla \cdot (\nu\nabla\vec{v})] dV}_{\text{Difusión}} + \int_V [\vec{g}] dV \quad (6)$$

Aplicando el teorema de la divergencia al término convectivo: <sup>[5]</sup>

$$\int_V [\nabla \cdot (\vec{v}\vec{v})] dV = \int_S [\vec{v}(\vec{v} \cdot \hat{n})] dS \quad (7)$$

donde el producto de la velocidad, el vector normal a la superficie y el elemento de superficie es igual a la tasa de flujo volumétrico que sale de la superficie:

$$(\vec{v} \cdot \hat{n}) dS \quad (8)$$

y la velocidad fuera de paréntesis es el término incógnita que hay que resolver.

Separando la integral de superficie en la suma de un número finito de caras:

$$\int_S [\vec{v}(\vec{v} \cdot \hat{n})] dS = \sum_{i=1}^M \int_{S_i} \vec{v}_i(\vec{v}_i \cdot \hat{n}_i) dS_i \quad (9)$$

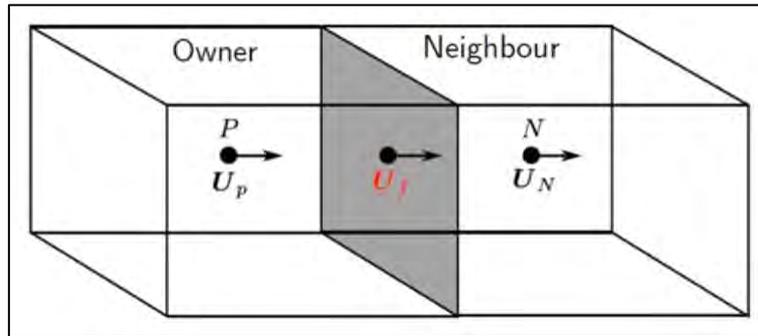
Considerando que la variación de flujo a través de una cara es lineal, se puede aproximar el valor de una cara completa al valor en el centro de la cara (f): <sup>[6]</sup>

$$\sum_{i=1}^M \int_{S_i} \vec{v}_i(\vec{v}_i \cdot \hat{n}_i) dS_i \approx \sum_{i=1}^M \vec{v}_{fi}(\vec{v}_{fi} \cdot \hat{n}_{fi}) S_i \quad (10)$$

Respecto del término difusivo, aplicando de nuevo el teorema de la divergencia: <sup>[7]</sup>

$$\int_V [\nabla \cdot (v \nabla \vec{v})] dV = \int_S [v(\nabla \vec{v}_i) \cdot \hat{n}_i] dS_i \approx \sum_{i=1}^M [v_{fi}(\nabla \vec{v}_{fi}) \cdot \hat{n}_{fi}] dS_i \quad (11)$$

A partir de las anteriores expresiones para los términos convectivo y difusivo se comprueba que, además de los valores de velocidad en los centroides de las celdas, resulta necesario conocer los valores de velocidad en los centros de las caras (f):



**Ilustración 2.** Velocidades en centroides y cara común de celdas vecinas <sup>[8]</sup>

Por lo tanto, resultará necesario interpolar a lo largo de todas las celdas en las que se encuentra dividido el dominio. Los códigos CFD de uso más común incorporan diferentes esquemas de interpolación con el fin de calcular el valor de la velocidad en los centros de las caras a partir de los valores de velocidad en los centroides de las celdas vecinas.

### 3. Esquemas de interpolación upwind

Los esquemas de interpolación «upwind» van a permitir conocer el valor de la velocidad en los centros de las caras a partir de los valores de velocidad en los centroides de las celdas vecinas, gracias al término convectivo de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento. Por lo tanto, el valor de la velocidad dependerá del flujo de masa que sale/entra en la celda: <sup>[9]</sup>

$$F_f = \rho_f A_f (\vec{v}_f \cdot \hat{n}) \quad (12)$$

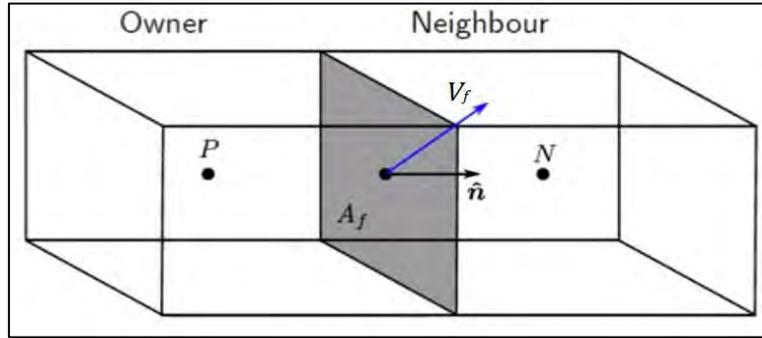


Ilustración 3. Planteamiento del esquema de discretización upwind <sup>[8]</sup>

A partir de la anterior expresión, se obtienen las siguientes relaciones:

- $F_f > 0$ , el flujo de masa sale de la celda p.
- $F_f < 0$ , el flujo de masa entra en la celda p.

Por lo tanto, el valor  $\phi$  de una variable cualquiera en la cara de la celda p ( $\phi_f$ ) vendrá dado por:

$$\phi_f = \begin{cases} \phi_P & F_f > 0 \text{ flujo de masa saliente} \\ \phi_N & F_f < 0 \text{ flujo de masa entrante} \end{cases} \quad (13)$$

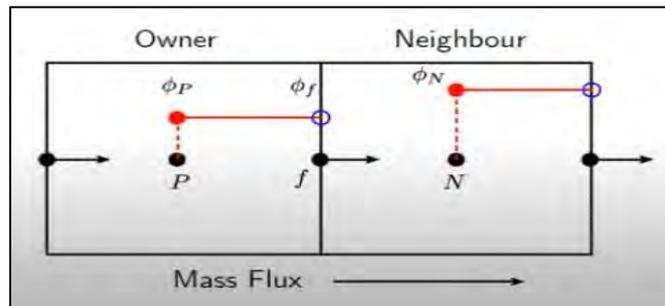


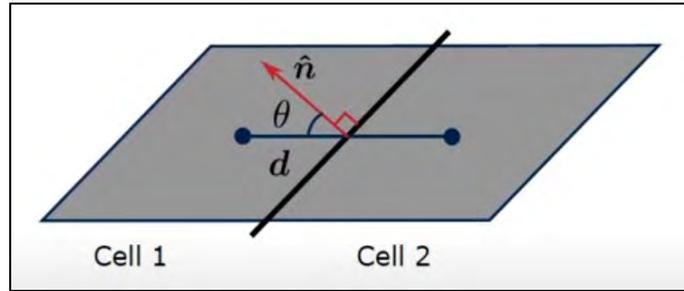
Ilustración 4. Esquema de discretización upwind de primer orden <sup>[8]</sup>

Los esquemas de interpolación «*first order accurate*» o aproximaciones de primer orden se encuentran especialmente indicados en aquellos casos en los que el valor de la variable  $\phi$  no presenta grandes variaciones lineales a lo largo de la cara de la celda, manteniéndose su valor constante entre el centroide y la cara de la celda.

#### 4. Calidad de ortogonalidad

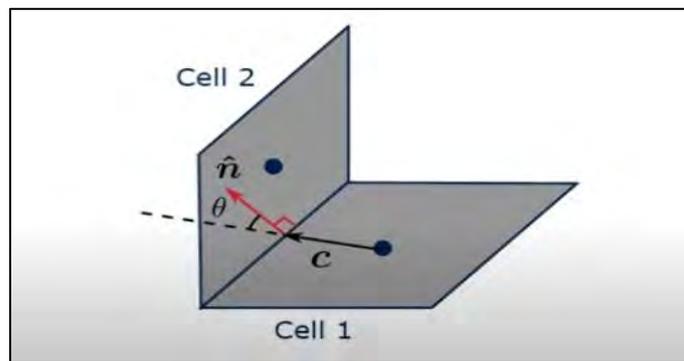
Se consideran dos celdas de un malla conectadas por una misma cara, un vector  $\vec{d}$  que conecta los centroides de ambas celdas y un vector normal unitario  $\hat{n}$  a la cara común de ambas celdas. El ángulo  $\theta$  entre el vector  $\vec{d}$  que une ambos centroides y el vector normal unitario  $\hat{n}$  se denomina «*cell based non-orthogonality*» o ángulo de no ortogonalidad entre celdas: <sup>[7]</sup>

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{d} \cdot \hat{n}}{|\vec{d}| |\hat{n}|} \right) \quad (13)$$



**Ilustración 5.** Cell based non-orthogonality o ángulo de no ortogonalidad entre celdas <sup>[8]</sup>

En el caso de celdas vecinas que no se encuentren completamente alineadas, es decir, que no pertenezcan al mismo plano, existe una alternativa al empleo del vector  $\vec{d}$ , que es utilizar el vector  $\vec{c}$  que va desde el centroide de la celda al centro de la cara:



**Ilustración 6.** Face based non-orthogonality o alineamiento entre celdas <sup>[8]</sup>

ANSYS Fluent calcula  $\theta_{cell}$  utilizando ambos vectores  $\vec{c}$  y  $\vec{d}$  en todas las caras de una celda. Posteriormente, selecciona el  $\theta_{cell}$  mayor como medida de no ortogonalidad de la celda: <sup>[10]</sup>

$$\theta_{cell} = \max \left[ \cos^{-1} \left( \frac{\vec{d} \cdot \hat{n}}{|\vec{d}| |\hat{n}|} \right), \cos^{-1} \left( \frac{\vec{c} \cdot \hat{n}}{|\vec{c}| |\hat{n}|} \right) \right] \quad (14)$$

encontrándose normalizado su valor entre 0 y 1, siendo 1 la mayor calidad de ortogonalidad. Conforme disminuye este valor aumenta la inestabilidad del modelo CFD para converger hacia la solución, por lo que a la hora de realizar mallas sobre dominios habrá que tener este parámetro de calidad en cuenta.

## 5. Tipos y características del mado

Tanto si se habla de flujos estacionarios como no estacionarios, para la resolución de un problema fluido mediante técnicas CFD, hay que proceder a la discretización espacial del medio con el fin de obtener una solución numérica del mismo. <sup>[11]</sup>

Las posiciones discretas para el cálculo de las variables se encuentran definidas por la malla numérica, que es básicamente una representación discreta del dominio geométrico del problema.

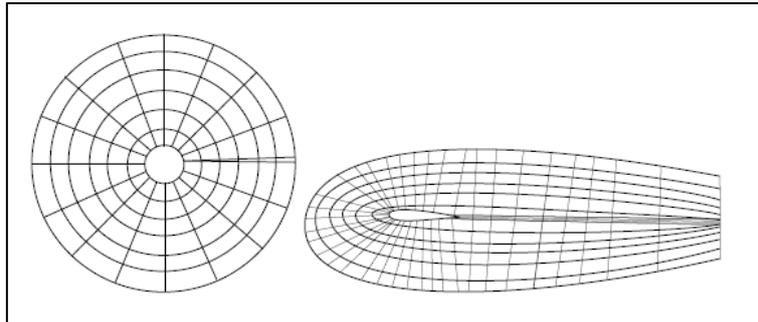
El mado espacial presentará mayor complejidad que el temporal debido a las dimensiones (2D o 3D), a que el dominio puede tener una geometría compleja y a la dificultad, a priori, de conocer que lugares del dominio requieren un mado más fino.

En cuanto a la clasificación por tipo de malla, existen básicamente tres tipos: mados estructurados, no estructurados e híbridos.

Los mallados estructurados son aquellos formados por un conjunto de nodos (o volúmenes de control) que pueden ser identificados de forma única mediante un grupo de índices ordenados  $i, j$  en 2D ( $i, j, k$  en 3D).

Los mallados estructurados son por lo general muy simples, resultando equivalentes a los cartesianos mediante el cambio de coordenadas apropiado. En este caso, cada nodo del mallado presenta 4 vecinos en 2D y 6 en 3D, a los que se accede variando los índices  $i, j, k$  en  $\pm 1$ . Su mayor desventaja es que únicamente pueden ser utilizados en dominios con geometrías simples, acumulando puntos en regiones de escaso interés.

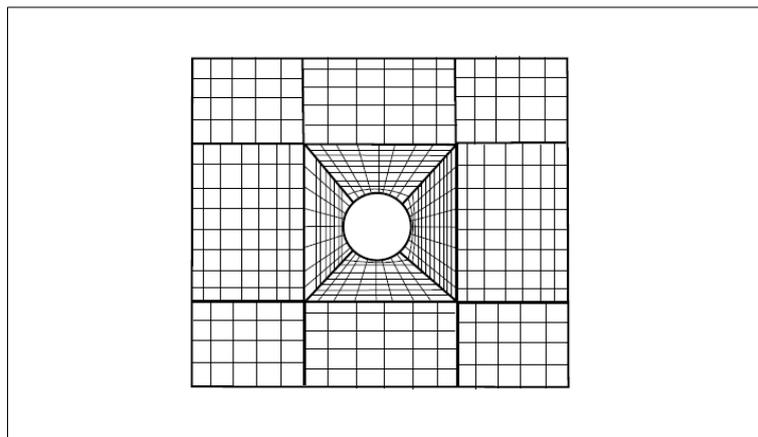
Los mallados estructurados se dividen a su vez en tres grupos, según cómo sea la deformación que hay que aplicar al mallado original cartesiano: mallados tipo O, tipo C o tipo H:



**Ilustración 7.** Ejemplos de mallados estructurados tipo O y C <sup>[11]</sup>

En los mallados tipo O los puntos se encuentran organizados circularmente de modo que las líneas que los unen son cerradas, mientras que en los de tipo C se doblan reproduciendo una forma en C. A los que no son de tipo O y C se les denomina tipo H.

Un caso particular de mallados estructurados son los denominados «*mallados estructurados multibloque*», donde existen varios niveles de subdivisión, desde un nivel exterior donde coexisten bloques grandes de estructura generalmente irregular, hasta un nivel más fino definido por mallados estructurados:

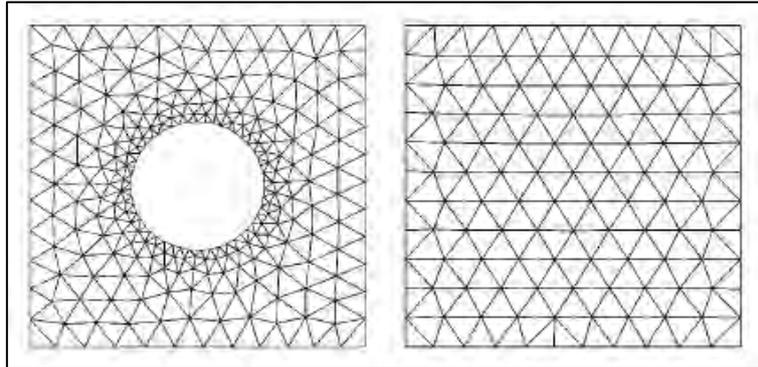


**Ilustración 8.** Ejemplo de mallado estructurado multibloque <sup>[11]</sup>

Los mallados estructurados multibloque serán más flexibles que los mallados estructurados, permitiendo una mayor resolución en aquellas zonas del dominio donde se requiera. Por el contrario, serán más complejos de programar que los estructurados.

Los mallados no estructurados están especialmente indicados en geometrías muy complejas, debido a que se pueden adaptar de forma arbitraria al dominio. Aunque pueden ser usados con cualquier esquema de discretización espacial, los métodos de volúmenes finitos y elementos finitos serán los que mejor se adapten a este tipo de mallado.

De forma mayoritaria, los mallados no estructurados se construyen utilizando triángulos y cuadriláteros en 2D o bien tetraedros o hexaedros en 3D. A pesar de su gran flexibilidad, su estructura irregular de datos obliga al empleo para su resolución de algoritmos más complejos y costosos, a la vez de tiempos de simulación mucho más largos:

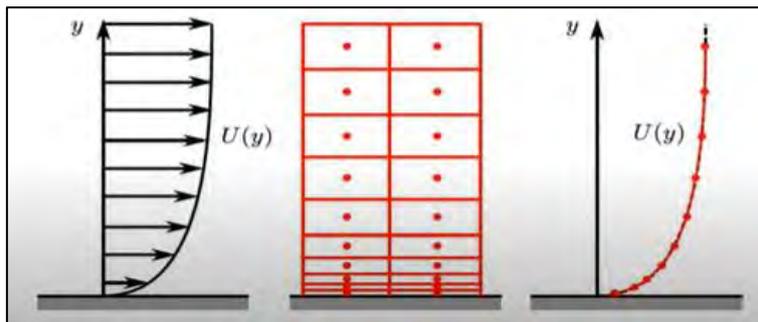


**Ilustración 9.** Ejemplos de mallados no estructurados <sup>[11]</sup>

En cuanto a los mallados híbridos, estos surgen de la combinación de mallados estructurados y no estructurados.

## 6. Funciones de pared

En las proximidades de la pared, los gradientes de velocidad, temperatura, etc., comienzan a ser elevados (área de bajo  $Re$ ). Por lo tanto, en estas zonas se requiere de un mallado más fino con el fin de resolver estos gradientes de la manera más precisa posible:

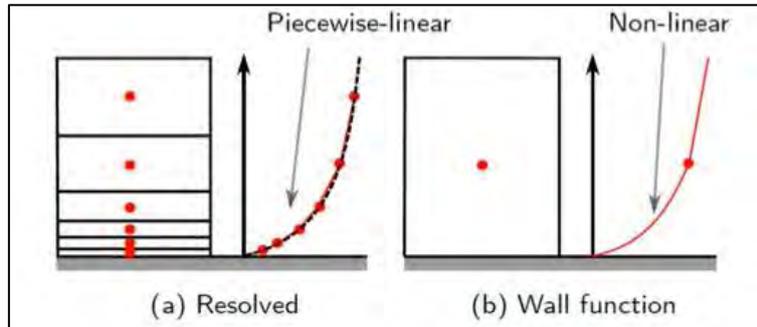


**Ilustración 10.** Gradiente de velocidad próximo a la pared <sup>[8]</sup>

Un tamaño de malla más fino supone celdas de mayor relación de aspecto conforme más próxima se encuentra la pared, lo que produce una reducción en la calidad del mallado y un incremento en el número de celdas del dominio.

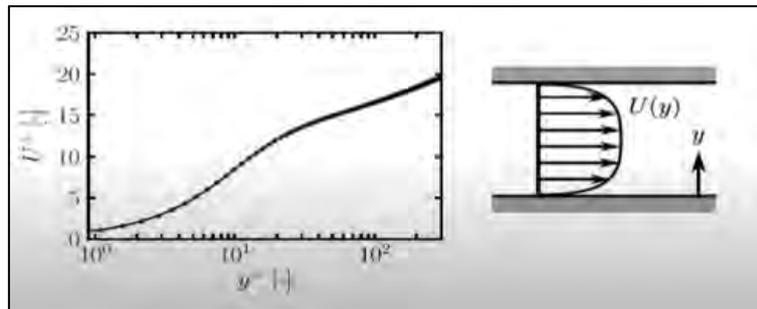
La calidad en el mallado se encuentra íntimamente relacionada con la estabilidad de convergencia hacia la solución, de modo que una reducción en la calidad de mallado reducirá la estabilidad de convergencia. <sup>[12]</sup>

Para solucionar el fenómeno de baja calidad de mallado o inestabilidad de convergencia, lo que se puede hacer es modelar la variación de la velocidad entre el centroide de la celda y la pared con la ayuda de una función no lineal, de modo que el tamaño de celda en las proximidades de la pared no tenga por qué ser demasiado fino, reduciéndose la relación de aspecto de las celdas próximas a la pared, el número de celdas y, por lo tanto, mejorando la estabilidad de convergencia hacia la solución del sistema, debido a la mejora de calidad del mallado:



**Ilustración 11.** Gradiente de velocidad próximo a la pared <sup>[8]</sup>

Medidas experimentales y simulaciones DNS («*Direct Numerical Simulation*») corroboran que la variación de la velocidad en las proximidades de la pared sigue la ley representada en la siguiente ilustración:

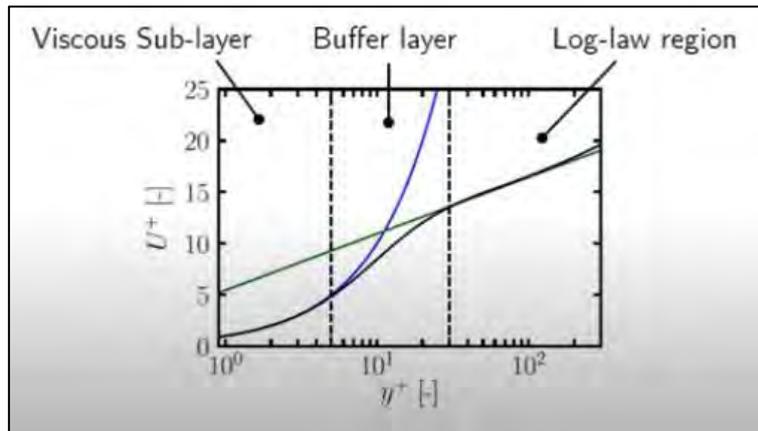


**Ilustración 12.** Perfil de velocidades próximas a la pared <sup>[13]</sup>

donde la distancia adimensional a la pared,  $y^+$ , resulta igual a:

$$y^+ = \frac{\rho u y}{\mu} \quad (15)$$

En este sentido, los modelos de pared son funciones empíricas que se adaptan al comportamiento del perfil de velocidades próximas a la pared. En la siguiente ilustración se muestran los modelos de pared empleados de manera general por los códigos CFD de uso común, destacando la curva de color azul que se ajusta a la parte inferior de la curva experimental (color negro) para valores de  $y^+ < 5$ , correspondientes a la denominada «*subcapa viscosa*» y la curva de color verde que se ajusta a la curva experimental para valores de  $y^+ > 30$ , en la denominada «*región logarítmica*»:



**Ilustración 13.** Zonas correspondientes al perfil de velocidades en función de  $y^+$  <sup>[14]</sup>

La forma matemática de las anteriores funciones empíricas es, para el caso de las funciones tipo «estándar», la siguiente:

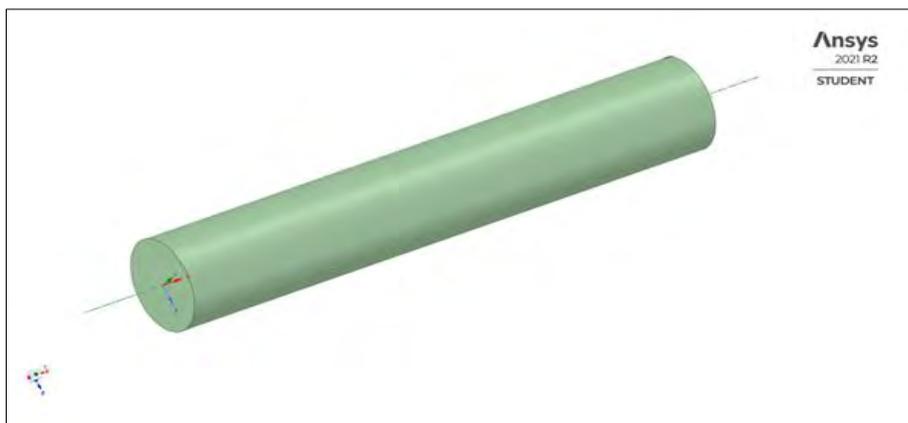
$$U^+ = y^+ \quad y^+ < 5 \quad (16)$$

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \log(Ey^+) \quad 30 < y^+ < 200 \quad (17)$$

donde  $\kappa$  y  $E$  son coeficientes empíricos con valores 0.4187 y 9.793 respectivamente, y  $U^+$  es la velocidad tangencial adimensionalizada por la velocidad de fricción  $u_\tau$ .

## 7. Ejemplo de aplicación de mallado

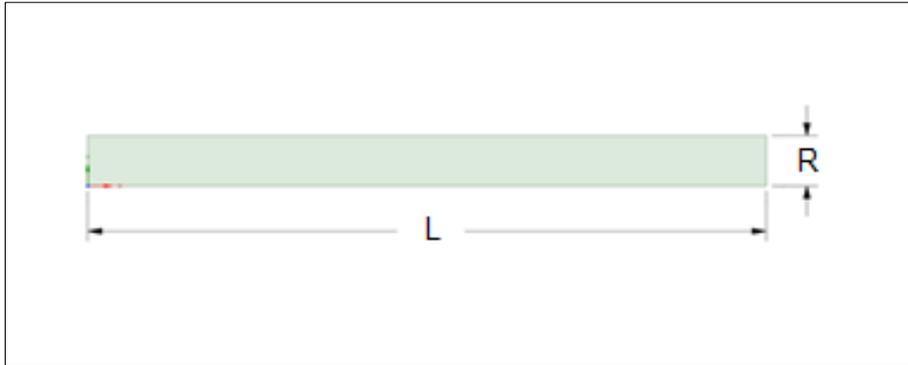
A partir del ejemplo de aplicación para un sistema HVAC publicado en el BTI N° 23 de diciembre de 2022 <sup>[15]</sup>, se procede a la descripción del proceso de mallado. Como se recordará, el ejemplo consistía en un conducto de descarga de aire a la atmósfera, de geometría cilíndrica y longitud determinadas por el que discurría un flujo de aire estacionario, incompresible e isoterma, a velocidades iniciales  $u_{in} = 1, 2, 3, 4$  y  $5$  m/s:



**Ilustración 14.** Geometría 3D del conducto de descarga de aire HVAC (cortesía ANSYS, Inc.)

En este caso concreto, para la discretización de dominio se seleccionó un mallado tipo estructurado, lo que permitió trabajar en 2D (plano) en vez de 3D (cilindro) gracias a la aplicación del concepto de simetría axial

(respecto del eje), simplificándose enormemente los cálculos realizados en las diferentes simulaciones llevadas a cabo:

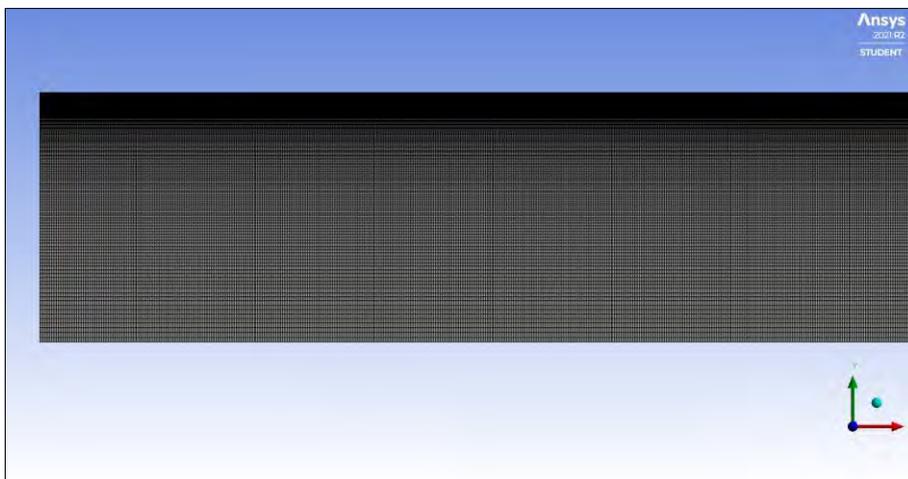


**Ilustración 15.** Geometría 2D del conducto de descarga de aire HVAC (elaboración propia)

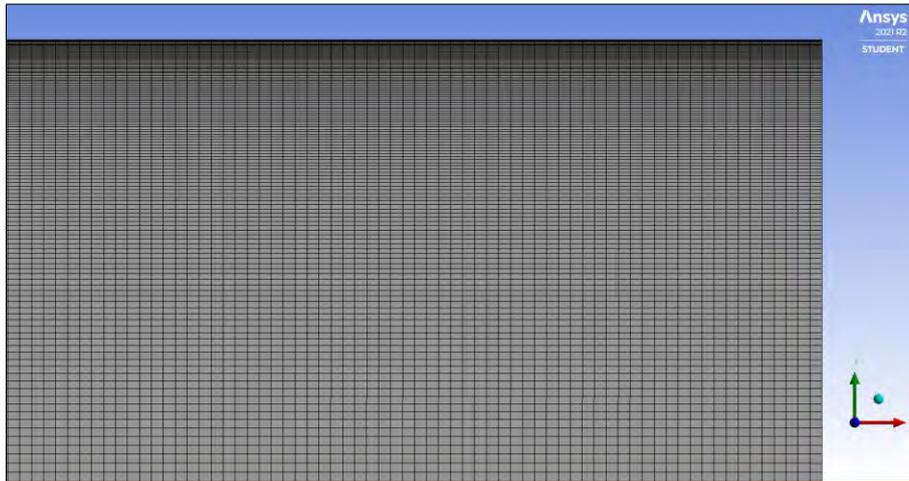
En las siguientes ilustraciones se muestran distintos detalles del mallado seleccionado, constituido por  $3,6 \cdot 10^5$  celdas cuadriláteras (200 filas y 1800 columnas), con una transición suave de menor a mayor densidad de celdas, en dirección y sentido la pared del conducto, con el fin de mejorar la predicción del comportamiento del flujo en dichas áreas (zonas de bajo Re).



**Ilustración 16.** Vista general del mallado correspondiente al dominio (cortesía ANSYS, Inc.)



**Ilustración 17.** Detalle del mallado en zonas próximas a la pared del conducto (cortesía ANSYS, Inc.)



**Ilustración 18.** Detalle del mallado en zonas próximas a la pared del conducto (cortesía ANSYS, Inc.)

En cuanto a la calidad del mallado, la siguiente tabla resume los parámetros de calidad finalmente alcanzados:

Relación de aspecto [1 - ...]	Mínimo	1,010
	Máximo	16,788
	Media	4,568
	Desviación	4,071
Relación Jacobiana [1 - 0]	Mínimo	1,000
	Máximo	1,000
	Media	1,000
	Desviación	0,000
Skewness [0 - 1]	Mínimo	0,131
	Máximo	0,140
	Media	0,131
	Desviación	0,000
Ortogonalidad [1 - 0]	Mínimo	1,000
	Máximo	1,000
	Media	1,000
	Desviación	0,000

**Tabla 1.** Resumen de parámetros de calidad del mallado (elaboración propia)

La «*relación de aspecto*», óptima para valores próximos a 1, se encontró fuertemente condicionada por los espesores de las celdas próximas a la pared. Por el contrario, la «*relación jacobiana*», que mide la distorsión del mallado, alcanzó un valor óptimo (igual a 1).

En cuanto a los parámetros de calidad «*skewness*» y «*ortogonalidad*», en la siguiente tabla se resume el nivel de calidad del mallado en función de dichos parámetros:

Mesh Quality	Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
Skewness	0 - 0.25	0.25 - 0.50	0.50 - 0.80	0.80 - 0.94	0.95 - 0.97	0.98 - 1.00
Orthogonality	1.00 - 0.95	0.95 - 0.70	0.69 - 0.20	0.20 - 0.15	0.14 - 0.001	0.001 - 0

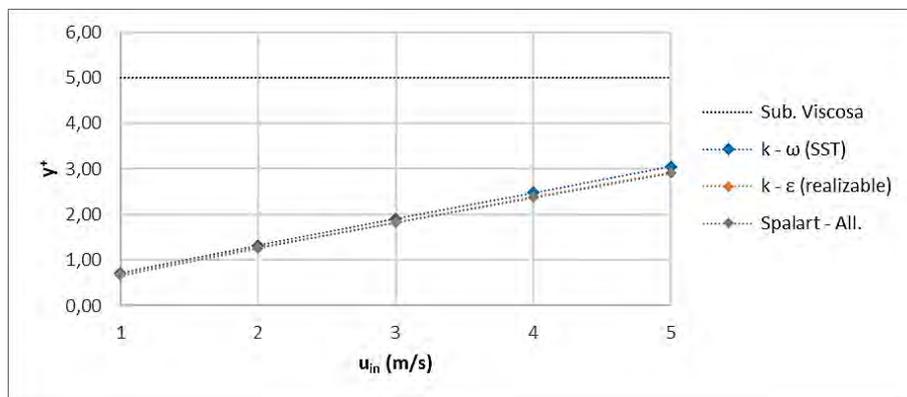
**Tabla 2.** Parámetros «*skewness*», «*ortogonalidad*» y calidad de mallado <sup>[10]</sup>

A partir de los parámetros de calidad de mallado resumidos en la tabla 1, se puede concluir que el mallado utilizado para las simulaciones del ejemplo anterior presentó, en términos generales, una calidad excepcional, a pesar de la penalización que supuso la transición respecto del tamaño de caldas en dirección y sentido la pared, que provocó una reducción de espesores de celdas y, por lo tanto, el incremento del valor global de la relación de aspecto (valor superior a 1).

Como se recordará, el mallado seleccionado determina el tipo de función de pared (lineal o logarítmica) empleado a la hora de predecir el comportamiento del modelo en zonas próximas a la pared (bajo Re). Para este caso concreto, se determinaron los valores de  $y^+$  para cada una de las simulaciones realizadas, valores que aparecen resumidos y representados en la siguiente tabla e ilustración:

$u_{in}$ (m/s)	1	2	3	4	5
Spalart - All.	0,7	1,3	1,8	2,4	2,9
k - $\epsilon$ (realizable)	0,7	1,3	1,8	2,4	2,9
k - $\omega$ (SST)	0,7	1,3	1,9	2,5	3,1

**Tabla 3.** Valores de  $y^+$  en función de  $u_{in}$  y modelo de turbulencia (elaboración propia)



**Ilustración 19.** Valores de  $y^+$  en función de  $u_{in}$  y modelo de turbulencia (elaboración propia)

Como se puede comprobar, se obtuvo un valor  $y^+ < 5$  en todas las simulaciones realizadas, lo que demuestra que el mallado seleccionado permitió incluir los centroides de las celdas adyacentes a la pared dentro de lo que se conoce como subcapa viscosa, representada por una función de pared de tipo lineal ( $U^+ = y^+$ ).

## 8. Conclusiones

A partir de los apartados anteriores relacionados con el mallado en el empleo de técnicas CFD, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- El método de discretización FVM va a permitir pasar las ecuaciones de gobierno de los fluidos de ecuaciones en derivadas parciales a ecuaciones algebraicas.
- A diferencia de otros métodos de discretización, el FVM permitirá evaluar expresiones exactas para el valor promedio de la solución dentro del volumen fluido, aportando datos para construir aproximaciones de la solución en las propias celdas.
- En cuanto a los tipos de mallado, estos se pueden clasificar en estructurados, no estructurados e híbridos, siendo los más simples de utilizar los estructurados debido a su similitud con el mallado cartesiano.
- La calidad del mallado resultante se encontrará íntimamente relacionada con la estabilidad de convergencia, de modo que una reducción en su calidad penalizará la convergencia hacia la solución.

- La falta de calidad del mallado en zonas próximas a la pared se puede mejorar mediante el empleo de funciones de pared, las cuales se adaptan al comportamiento del perfil de velocidades próximas a la pared, reduciéndose la relación de aspecto y número de celdas e incrementándose, por lo tanto, la estabilidad de convergencia hacia la solución.

## 9. Referencias bibliográficas

- [1] Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C. (2018) Computational Fluid Dynamics, A Practical Approach, 3th Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd., ISBN: 978-0-08-101127-0.
- [2] Bhaskaran, R. (2018) A Hands-on Introduction to Engineering Simulations, Training Documentation, Swanson Director of Engineering Simulation, Cornell University, Ithaca - New York, USA.
- [3] 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.
- [4] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. (2007) An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method, 2nd Edition, Pearson Education Limited, USA, ISBN: 978-0-13-127498-3.
- [5] Burbano, S., Burbano, E., Gracia, C., (2003) Física General, 32ª ed., Tebar, Madrid, ISBN 8-495-44782-7.
- [6] Gosman, A. D., Ioannides, E. (1983) Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fuelled Combustors, Journal of Energy, 7-6, ISSN: 1555-5917.
- [7] Jasak, H. (1996) Error Estimation and Analysis for the Finite Volume Method with Application to Fluid Flows, PhD Thesis, Imperial College, London, United Kingdom.
- [8] Wimshurst, A. (2018) Computational Fluid Dynamics, Fundamentals Course, Edit. Fluid Mechanics 101.
- [9] Barth, T. J., Jespersen, D. (1989) The Design and Application of Upwind Schemes on Unstructured Meshes, Technical Report AIAA-89-0366, 27th Aerospace Sciences Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), USA.
- [10] ANSYS Fluent (2019) Theory Guide, Release 20.0, ANSYS Inc. Southpointe 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317 Pensilvania, USA.
- [11] Lozano Durán, A. (2019) Apuntes sobre Dinámica de Fluidos Computacional, rev. 0.6.0, GNU Free Documentation License.
- [12] Bakker, A. (2002) Applied Computational Fluid Dynamics, Lecture 15 - Discrete Phase Model (DPM), ANSYS Inc. Southpointe 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317 Pensilvania, USA.
- [13] Moser, R. D., Kim, J., Mansour, N. N. (1999) Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow up to  $Re_\tau = 590$ , Physics of Fluids vol. 11, American Institute of Physics (AIP).
- [14] Bredberg, J. (2000) On the Wall Boundary Condition for Turbulence Models, Internal Report 00/4, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [15] Pernas, J. M. (2022) Fundamentos CFD de aplicación en ingeniería II: turbulencia, Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada (ETSIAN – DIENA – JEPER), Nº 23, páginas 53 – 68, NIPO (ed. línea): 083-17-202-1, ISSN (ed. línea): 2659-6458.

## **ANÁLISIS DE RIESGOS PARA LA SEGURIDAD DE LOS SISTEMAS EN OPERACIÓN Y SOPORTE (OSHA) EN BUQUES DE GUERRA**

**CC RAÚL VILLA CARO**

Doctor en Ingeniería Naval y Oceánica / Capitán de la Marina Mercante

**MARÍA PENEDO BAEZA**

Ingeniera Naval y Oceánica / Doctora por la Universidad de A Coruña

**SONIA BELLÓN POSE**

Ingeniera Naval y Oceánica

### **1. Introducción**

El Análisis de Riesgos para la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte (OSHA) en buques de guerra, se realiza principalmente para identificar y evaluar los peligros asociados con las interacciones entre las personas y equipos/sistemas del buque de guerra para garantizar que los procedimientos utilizados no introduzcan nuevos peligros. Estas interacciones incluyen todas las operaciones realizadas a lo largo del ciclo de vida del sistema. El OSHA identifica entonces, aquellos peligros que puedan aparecer durante el uso del sistema.

El propósito del OSHA es realizar un análisis de seguridad sistemático detallado y alineado con la ingeniería de sistemas que aborde los peligros y riesgos de seguridad aplicables a la operación y las actividades de apoyo de un sistema dado. Se evalúa la efectividad de controlar los peligros de los procedimientos en lugar de solo aquellos peligros creados por el diseño. Esto abarca la operación del sistema (principalmente aspectos de procedimiento) y las funciones de apoyo (por ejemplo, mantenimiento, servicio, revisión, instalaciones, equipos y capacitación).

El OSHA también se puede aplicar selectivamente a los proyectos para garantizar que los manuales de operación y mantenimiento aborden adecuadamente los requisitos de seguridad y salud. El OSHA se utiliza tanto para identificar nuevos requisitos como para respaldar la verificación y validación de los requisitos existentes.

Este análisis debe de comenzar a tenerse en cuenta en el desarrollo del diseño y no esperar a la entrega del buque de guerra para realizarlo, ya que, si lo hacemos así, somos capaces de integrarnos desde las fases iniciales, influyendo en el diseño y evitando que aparezcan peligros operacionales que podríamos haber eliminado o controlado con el diseño, mejorando la seguridad y reduciendo costes.

Si comparamos la aplicación del análisis OSHA frente a el uso de otra técnica de operación también realizada en los análisis de seguridad como es, la técnica de análisis de riesgos «Operational Risk Management (ORM)», donde; el ORM, es una herramienta de toma de decisiones que ayuda de forma sistemática a identificar los riesgos y beneficios operativos y determinar los mejores cursos de acción para cualquier situación dada, vemos que el análisis OSHA se realiza durante el desarrollo del diseño del sistema, por eso debemos hacerlo

lo antes posible en el ciclo de vida, según la información que tengamos disponible y el ORM se realiza durante el uso operativo.

Por lo tanto, el Análisis de Riesgos para la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte (OSHA) en buques de guerra, se realiza para minimizar los riesgos desde las fases de diseño e integrado dentro del proceso de ingeniería de sistemas con el fin de reducir accidentes, preservar las capacidades operativas y salvaguardar la salud y el medioambiente.

## **2. Análisis de riesgos para la seguridad de los sistemas en operación y soporte (OSHA)**

El Análisis de Riesgos para la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte se basa en los análisis de seguridad de los sistemas y subsistemas para investigar los peligros asociados al funcionamiento durante las operaciones y sus actividades de soporte.

Tiene como propósito principal evaluar la eficacia de los procedimientos para controlar los peligros identificados como controlados por procedimientos en lugar de por diseño y para asegurar que los procedimientos no introducen nuevos peligros.

El alcance del análisis OSHA incluye operación normal, prueba, instalación, mantenimiento, reparación, entrenamiento, almacenamiento, manipulación, transporte y operaciones de emergencia/rescate. Aunque se puede establecer una guía de las actividades sobre las que realizar estos análisis, es conveniente acordar con el cliente, cuales quiere someter a este proceso de análisis de la seguridad de los sistemas.

Debe tenerse en cuenta también la información proporcionada por los suministradores del proyecto, fundamental a la hora de conocer las restricciones en el diseño que pueden establecer la forma de operación definida en las operaciones que debe de realizar el buque de guerra.

Los peligros operacionales pueden ser introducidos por el diseño del sistema, el diseño de los procedimientos, el error humano y/o el medioambiente.

## **3. Objetivos del análisis OSHA**

Su objetivo principal es garantizar la seguridad de los sistemas (incluyendo mantener sus funcionalidades de modo seguro y sus capacidades operativas), del personal y del medioambiente, en la operación de los sistemas.

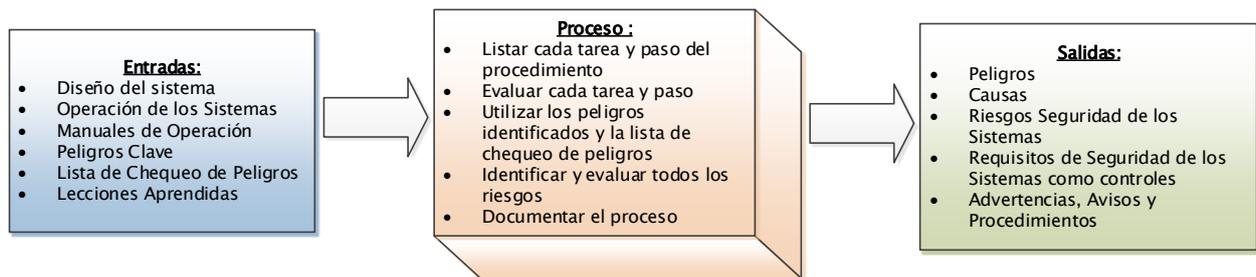
Como objetivos generales, podemos definir los que se listan a continuación:

- Proporcionar un enfoque de la seguridad de los sistemas desde el punto de vista de la realización de las operaciones y tareas operacionales.
- Identificar los peligros relacionados con la realización de las tareas causadas por el diseño, fallos de hardware, errores de software, errores humanos, sincronización y similares.
- Evaluar el riesgo de accidente de la realización de las operaciones.

- Identificar los requisitos de seguridad de los sistemas de diseño para mitigar los peligros de las tareas operacionales.
- Asegurarse de que todos los procedimientos operativos son seguros.

#### 4. Proceso y metodología del análisis OSHA

El proceso de Análisis de Riesgos para la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte se puede ver en la siguiente figura:



**Figura 1.** Proceso del Análisis de Riesgos para la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte

(Fuente: Hazard Analysis Techniques for System Safety)

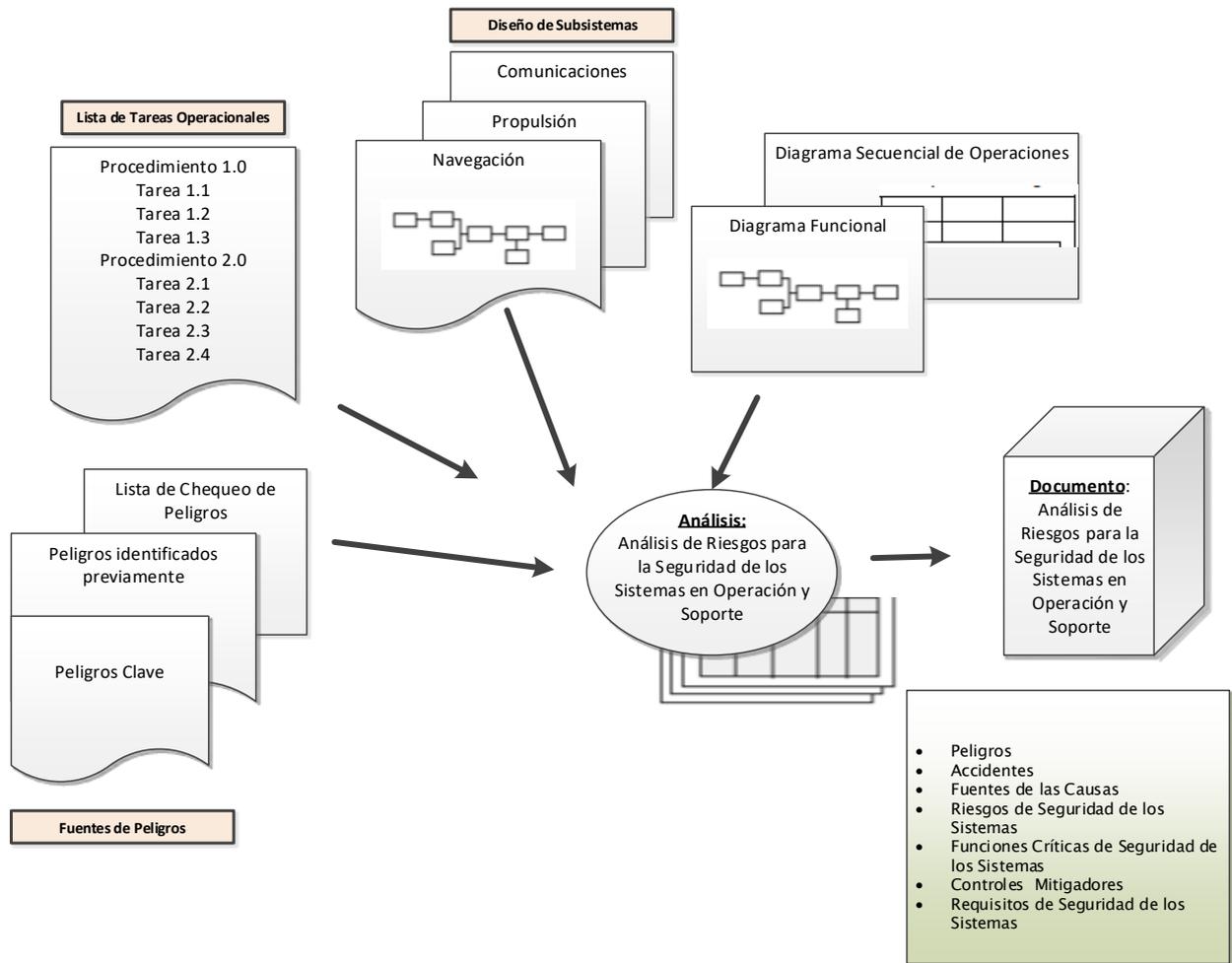
Vemos que este proceso, consiste en utilizar tanto la información de diseño como la información de peligros conocidos para verificar la cobertura completa de seguridad y el control de peligros.

Los peligros de las tareas operativas se identifican a través del análisis meticuloso de cada procedimiento detallado que se va a implementar realizado durante la operación o soporte del sistema.

Aunque siempre es importante solicitar la información en temas de seguridad a la cadena de suministro, se considera de vital importancia requerirla en estos análisis sobre todo si no se poseen los procedimientos operativos por parte del cliente, por ejemplo, en operaciones que incluyan productos noveles en el mercado.

Por ello, deberíamos de asegurar que tenemos toda la información necesaria de diseño, operación, mantenimiento y análisis de seguridad de los sistemas de los proveedores y que éstos participen en los talleres de trabajo de identificación de los peligros junto con el cliente final.

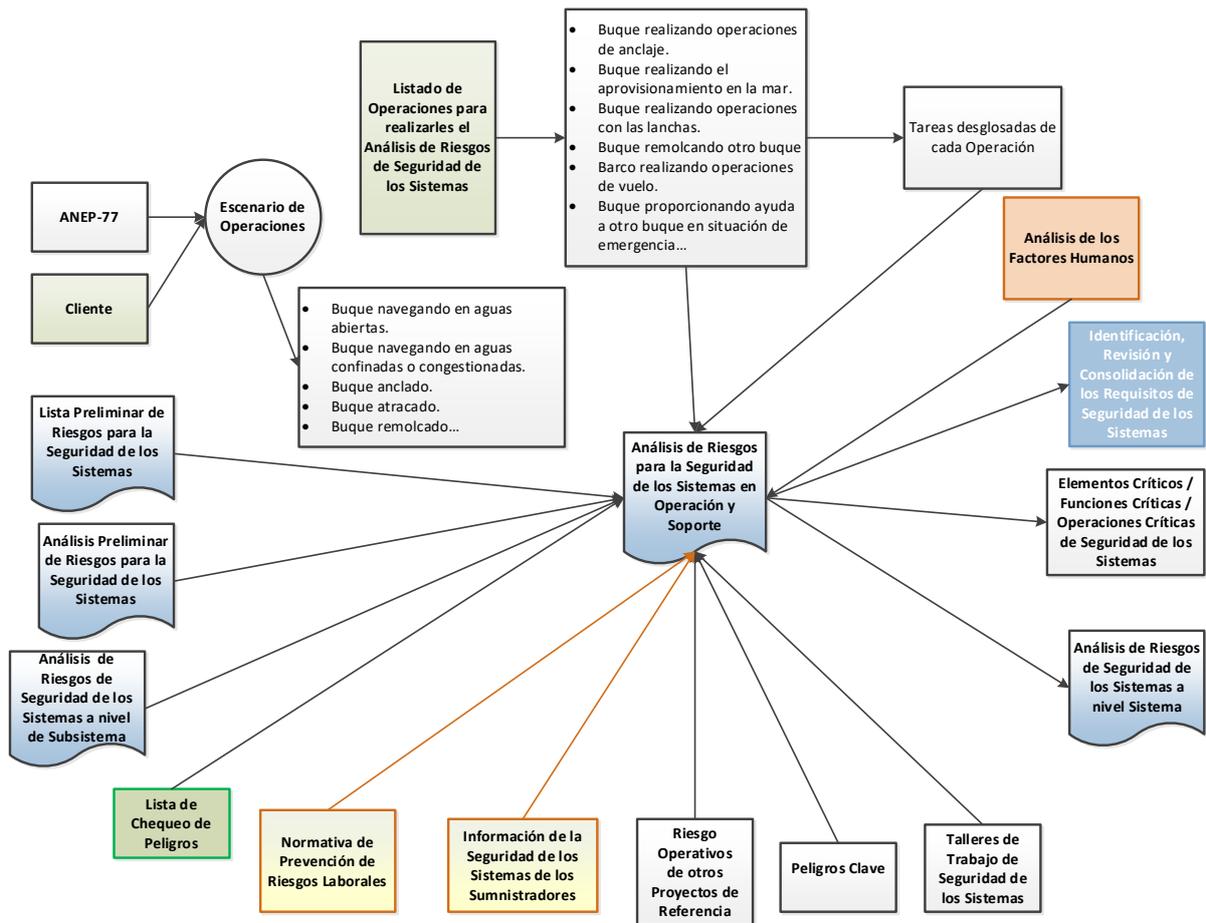
Vemos a continuación un ejemplo de la aplicación de la metodología OSHA:



**Figura 2.** Ejemplo de la Metodología para el Análisis de Riesgos para la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte  
(Fuente: Hazard Analysis Techniques for System Safety)

Durante el proceso de Análisis de Riesgos para la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte (OSHA) se identificarán los requisitos (o alternativas) necesarios para eliminar los peligros o mitigar los riesgos asociados a los peligros que no puedan eliminarse.

El ser humano debe ser considerado un elemento del sistema total, recibiendo tanto entradas como iniciando salidas dentro del análisis.



**Figura 3.** Metodología del Análisis de Riesgos para la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte (Fuente: Tesis Implantación del concepto de Seguridad (“Safety”) en el diseño de proyectos de un Astillero)

Esta metodología consta de las siguientes actividades principales para realizar el análisis:

- **Lista de operaciones a estudiar:** Identificación y descripción de las Operaciones, de los procedimientos operativos o de las actividades proporcionadas por el cliente que implican análisis de Seguridad. Se identifican aquellas operaciones que tienen implicaciones en la seguridad, es decir, que al realizarlas pueden conllevar que se genere un peligro.
- **Lista de peligros asociados a las operaciones:** Peligros asociados a cada Operación identificada de Seguridad. Se listarán todos los peligros asociados a cada tarea o subtarea de la operación seleccionada.
- **Análisis de riesgos safety:** Operaciones con consecuencias Críticas para la Seguridad, para las personas, equipos y sus funcionalidades y el medioambiente. Una vez que conocemos la severidad de los peligros implicados en cada una de las tareas y subtareas de cada operación se identificarán aquellas cuya tarea tenga unas consecuencias críticas y/o catastróficas y sabremos además aquellas funcionalidades que son críticas a la hora de realizar la tarea.



**Figura 4.** Actividades del Análisis de Riesgos de la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte (Fuente: propia)

Los análisis de riesgos de operación y soporte deben finalizar con la reducción de riesgos hasta un nivel ALARP, que se considere que un Riesgo Safety sea tan bajo como sea razonablemente POSIBLE (ALARP, As Low As Reasonably Practicable), cuando se ha demostrado que el coste de cualquier reducción del Riesgo Safety es extremadamente desproporcionado con respecto al beneficio obtenido de esa reducción de riesgo. Es decir, cuando se ha demostrado que el coste de cualquier reducción adicional del riesgo es inviable, extremadamente desproporcionado (para los riesgos de nivel serio) o desproporcionado (en el caso de riesgos medios) con respecto al beneficio obtenido por la reducción de riesgo. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que, si se considera que una medida es necesaria legalmente, entonces debe adoptarse con independencia del coste.

Debemos tener en cuenta, que, aunque en todos los análisis de riesgos de la seguridad de los sistemas es importante la participación del cliente y usuario final, en estos análisis la participación del usuario final es imprescindible para obtener los resultados esperados del mismo.

## 5. CONSIDERACIONES AL REALIZAR EL ANÁLISIS OSHA

Para realizar estos análisis se debe de tener en cuenta, al menos:

- La configuración/estado de cada sistema en las tareas a realizar.
- Las interfaces de los sistemas y el entorno operacional previsto, se puede utilizar el Diagramas de Bloque Funcionales y Diagramas Secuenciales de Operaciones.
- Estados del sistema potencialmente peligrosos bajo control del operador.
- Los peligros del operador como resultado del diseño del sistema (obsolescencia del hardware, distracciones, factores de confusión, sobrecarga del trabajador, tiempo operativo, superficies calientes expuestas, etc.).
- Las actividades que ocurren en condiciones peligrosas, sus periodos y acciones necesarias para minimizar el riesgo durante estas actividades/periodos de tiempo, definiendo las secuencias operativas/de tareas, efectos y limitaciones de tareas simultáneas.
- Tener en cuenta los requerimientos de la Prevención de Riesgos Laborales.
- Peligros del operador resultantes de un potencial error humano.
- Errores en los procedimientos e instrucciones.

- Los cambios necesarios en los requisitos funcionales o de diseño del hardware/software, instalaciones, herramientas o equipos de apoyo/prueba para eliminar o controlar peligros o reducir los riesgos asociados.
- Requisitos para dispositivos y equipos de seguridad, incluida la seguridad del personal y la seguridad de los equipos.

## 6. Evaluación del riesgo en el análisis OSHA

Con el de Análisis de Riesgos para la Seguridad de los Sistemas en Operación y Soporte (OSHA), se identifican los riesgos operacionales del sistema, las causas, el riesgo de accidente y los requisitos de diseño de seguridad para mitigar el riesgo. Y como hemos dicho, tiene el objetivo principal de identificar los procedimientos peligrosos, condiciones de diseño, modos de fallo y errores humanos que puedan desencadenar un evento o peligro no deseado durante el desempeño de las tareas operativas y de soporte.

La Evaluación de Riesgos de Safety se realiza, para obtener el Código de Evaluación de Riesgos (CER) para cada riesgo Safety identificado. Se determinará el CER en función de la severidad de las consecuencias asociadas a un determinado riesgo y de la probabilidad de que dichas consecuencias se materialicen.

DESCRIPCIÓN	NIVEL	ELEMENTO ESPECÍFICO	FLOTA / INVENTARIO
FRECUENTE	A	Posible que ocurra a menudo durante el ciclo vital del elemento, con una probabilidad superior a $10^{-1}$ en dicho ciclo.	Sucede continuamente.
PROBABLE	B	Posible que ocurra varias veces en el ciclo vital del elemento, con una probabilidad inferior a $10^{-1}$ pero superior a $10^{-2}$ en dicho ciclo.	Sucedirá con frecuencia.
OCASIONAL	C	Posible que ocurra en algún momento del ciclo vital del elemento, con una probabilidad inferior a $10^{-2}$ pero superior a $10^{-3}$ en dicho ciclo.	Sucedirá varias veces.
REMOTA	D	Poco probable que ocurra, pero posible, a lo largo del ciclo vital del elemento, con una probabilidad inferior a $10^{-3}$ pero por encima de $10^{-6}$ en dicho ciclo.	Poco probable, pero es razonable esperar que suceda.
IMPROBABLE	E	La probabilidad es tan mínima que se puede suponer que no se va a experimentar, siendo su probabilidad inferior a $10^{-6}$ en su ciclo vital.	Es improbable que ocurra, aunque posible.
ELIMINADO	F	Imposible que ocurra. Este nivel se usa cuando peligros potenciales son identificados y posteriormente eliminados.	Imposible que ocurra.

Tabla 1. Niveles probabilidad (Fuente: MIL-STD-882E)

DESCRIPCIÓN	CATEGORÍA DE LA SEVERIDAD	DAÑOS A LAS PERSONAS	DAÑOS O PÉRDIDA EQUIPO O PROPIEDAD		DAÑOS MEDIO AMBIENTALES
			Nivel buque	Nivel Equipo /Sistema	
CATASTRÓFICO	1	Podría causar la muerte o incapacidad permanente total.	Pérdidas iguales o superiores a 10.000.000 euros.	Fallo que impediría que el sistema cumpliera con los requisitos operativos principales.	Daños medioambientales graves e irreparables.
CRITICO	2	Podría causar incapacidad permanente parcial, heridas o enfermedades profesionales que pudiesen requerir de hospitalización de al menos tres miembros del personal.	Pérdidas iguales o superiores a los 1.000.000 euros, pero inferiores a los 10.000.000 euros.	Fallo que degradaría significativamente la capacidad del sistema para realizar su función principal.	Daños medioambientales significativos reversibles.
MARGINAL	3	Podría ocasionar heridas o enfermedades profesionales que causen la pérdida de una o más jornadas de trabajo.	Pérdidas iguales o superiores a los 100.000 euros, pero inferiores a los 1.000.000 euros.	Fallo que resultaría en la pérdida temporal de una o más capacidades significativas dentro del sistema.	Daños medioambientales moderados reversibles.
DESPRECIABLE	4	Podría ocasionar heridas o enfermedades que no den como resultado la pérdida de jornadas de trabajo.	Pérdidas Inferiores a los 100.000 euros.	Fallo que resultaría en la degradación o pérdida temporal de una o más capacidades del sistema.	Daños medioambientales mínimos.

**Tabla 2.** Categorías de severidad (Fuente: MIL-STD-882E)

Código de Evaluación del Riesgo (CER)		SEVERIDAD			
		CATASTRÓFICO (1)	CRITICO (2)	MARGINAL (3)	DESPRECIABLE (4)
PROBABILIDAD	FRECUENTE (A)	ALTO (1)	ALTO (3)	SERIO (7)	MEDIO (13)
	PROBABLE (B)	ALTO (2)	ALTO (5)	SERIO (9)	MEDIO (16)
	OCASIONAL (C)	ALTO (4)	SERIO (6)	MEDIO (11)	BAJO (18)
	REMOTA (D)	SERIO (8)	MEDIO (10)	MEDIO (14)	BAJO (19)
	IMPROBABLE (E)	MEDIO (12)	MEDIO (15)	MEDIO (17)	BAJO (20)
	ELIMINADO (F)				

**Tabla 3.** Matriz de Evaluación de Riesgos (Fuente: MIL-STD-882E)

## 7. EJEMPLO DE ANÁLISIS OSHA EN OPERACIÓN DE APROVISIONAMIENTO EN LA MAR

La función del sistema de aprovisionamiento en la mar es aprovisionar al buque de sólidos pesados, sólidos ligeros y líquidos y transferir personal y sólidos ligeros utilizando métodos CONREP. Para realizar el análisis de riesgos del sistema es necesario establecer las limitaciones operativas y los escenarios en los que se va a realizar esa operación.

Se han identificado las siguientes operaciones para el análisis:

- 1 - Traslado de Personal o Pesos Ligeros.
- 2 - Separación de emergencia durante la transferencia de personal o pesos ligeros.
- 3 - Transferencia de pesos pesados.
- 4 - Largado de emergencia durante la transferencia de pesos pesados.
- 5 - Recepción de combustible (por el través) de los barcos mientras navegan.
- 6 - Recepción de combustible (popa) de los barcos mientras navegan.
- 7 - Largado de emergencia mientras se recibe combustible en marcha.

Si escogemos, por ejemplo, la operación 5, «Recepción de combustible (por el través) de los barcos mientras navegan» uno de los peligros que se pueden identificar para esta operación es «Descarga Electroestática».

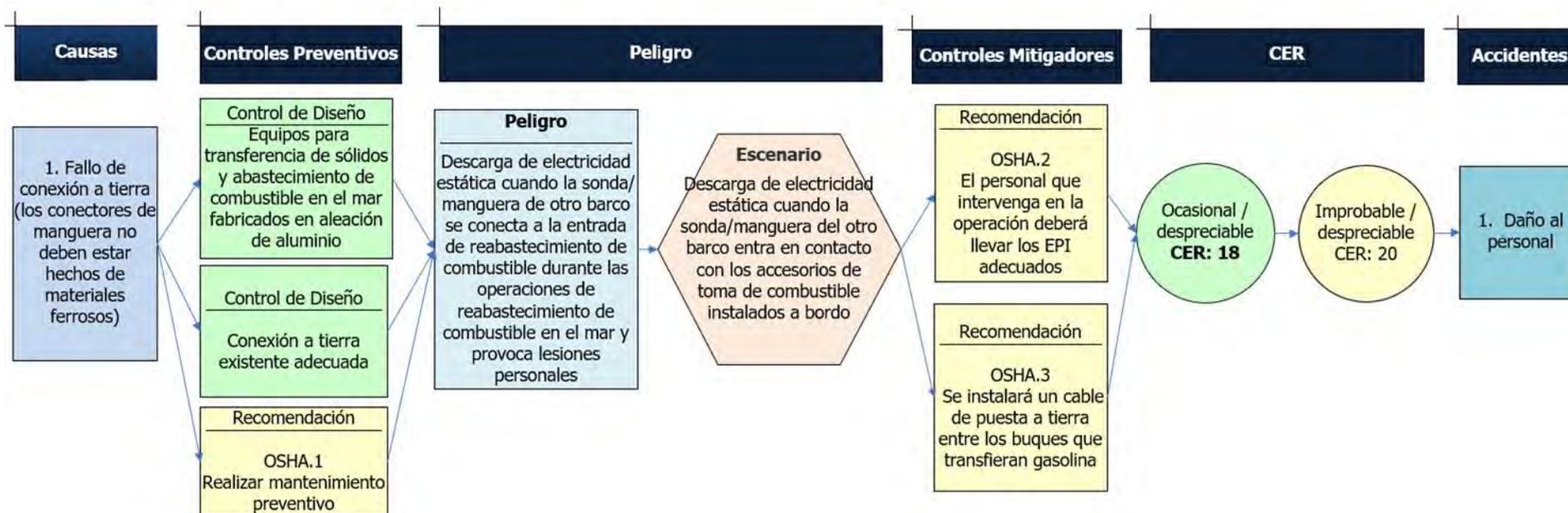


Figura 5: «Bow-Tie» Descarga Electroestática (Fuente: propia)

En la figura anterior se presenta mediante una representación gráfica «bow tie» de un modo visual el evento de riesgo de «Descarga Electroestática» de una manera simple donde se detallan las posibles causas y consecuencias en este escenario.

## 8. CONCLUSIONES

Como conclusiones, queremos destacar los beneficios que tiene este análisis de la seguridad de los sistemas, y para ello nos hacemos la pregunta ¿que nos ofrece?:

- **Evita rehacer el diseño y reduce costes:** Garantiza que la operación del buque se realiza de forma segura de acuerdo con las operaciones y capacidad operativa definida por el cliente.
- **Mejora los procesos de operación y facilita la toma de decisiones.**
- **Aseguramos** que en las operaciones que realiza el buque de guerra, los **riesgos estén minimizados lo máximo posible.**



Figura 6. Reducción ALARP (Fuente: propia)

## 9. Referencias bibliográficas

- [1] Penedo Baeza, María. Implantación del concepto de Seguridad (“Safety”) en el diseño de proyectos de un Astillero. UDC 2019/20.
- [2] FAA. FAA System Safety Handbook. 30 diciembre 2000.
- [3] Clifton A, Ericson, II. Hazard Analysis Techniques for System Safety. Fredericksburg. John Wiley & Sons, Inc.2005. ISBN 0-471-72019-4.
- [4] Nicholas J. Bahr. Taylor & Francis Group. System Safety Engineering and Risk Assessment: A Practical Approach. New York. 1997. ISBN: 1-56032-416-3.
- [5] Department of Defence Standard Practice. MIL-STD-882 System Safety. Versión E. 11 mayo 2012.

## **ESTRATEGIAS/INVERSIONES PARA GANAR VENTAJAS COMPETITIVAS EN LA INDUSTRIA DEL SECTOR NAVAL (CONSTRUCCIONES Y REPARACIONES) ESPAÑOL, EN LA ERA DE LA ECONOMÍA DEL CONOCIMIENTO**

**TN (CIA-EOF) Jesús Moreno Rodríguez**  
Ingeniero Naval y Oceánico

### **Resumen ejecutivo**

La industria del sector naval abarca muchas áreas de conocimiento y es una pieza central dentro del tejido industrial español.

España ha sido capaz de producir una cartera diversificada de buques (cumpliendo con las necesidades de heterogeneidad de la globalización), y tiene ventajas competitivas por situarse cerca de muchas rutas comerciales a nivel internacional, sirviéndose también de las oportunidades que le brinda ser un importante punto de almacenamiento y regasificación de GNL. Además, contar con las Islas Canarias y su clima favorable también son ventajas para el sector naval (por los tiempos de secado del pintado). Pero realmente España podría llegar a ser una potencia de la industria naval como China, Corea del Sur o Japón y no lo consigue porque no es capaz de desarrollar unas ventajas competitivas que se acoplen a la actual economía del conocimiento.

Las ventajas competitivas que debería desarrollar la industria sujeto de nuestro estudio, dentro de las condiciones de contorno que define la economía y sociedad española, pasan por 3 pilares clave: innovación, coordinación y formación. Para afianzar estos pilares resultaría tentador recurrir a proponer como solución toda la batería de tecnologías de la industria 4.0, pero en vez de ser tan simplistas y no tener presenta la debilidad/inestabilidad financiera de la gran parte de empresas del sector, proponemos solo 3 de entre las cuales una de ellas es la cabeza tractora y no repercute en un gran gasto, sino sólo repensar la manera de hacer la cosas (estamos hablando del Lean Manufacturing). De las 3 propuestas 2 de ellas son de aplicación tanto para los astilleros como para la industria auxiliar y tanto para las reparaciones como nuevas construcciones (Lean Manufacturing y Cloud Computing), mientras que la tercera (el gemelo digital) tiene como aplicación fundamental los astilleros de nuevas construcciones y pasa a ser de obligado cumplimiento, ya que los astilleros asiáticos ya lo están implantando [3].

Por último, cabe destacar que además de la versatilidad de aplicación del Lean Manufacturing, como solución este se ajusta realmente bien a la situación de España y al entorno socioeconómico del conocimiento en el que nos encontramos inmersos.

### **Análisis**

La industria del sector naval es una industria inter disciplinar, puesto que no solo afecta a la propia construcción en sí de las estructuras marinas, sino que se encarga de la integración de gran variedad de equipos en la mencionada estructura. Este alto grado de horizontalidad de conocimientos de muy diversos campos, convierte al sector naval en una pieza central para el intercambio de conocimientos entre sectores, así como la transferencia de innovaciones que se pueden acabar implementando en distintos sectores de los que las vieron nacer. El tejido industrial, que en la mayor parte de los casos, transforma en realidad las ideas del sector naval son PYMES subcontratadas, que aunque su carga de trabajo sea principalmente el sector naval, también realizan encargos para el sector energético, aeronáutico...

La innovación, coordinación y formación son claves para el sector naval [2], especialmente en la actual economía del conocimiento, y aunque sobre el papel pueda parecer que se está siguiendo un ritmo adecuado

(es cierto que se están dando pasos), la realidad es que queda mucho por hacer en los 3 conceptos. Por ejemplo, una alta innovación tendría que dar unos nuevos productos/procesos y/o formas de comercialización que supongan una ventaja competitiva, y a la vista está que no es el caso de la industria naval española, puesto que China, Corea del sur y Japón lideran la construcción naval mundial [2]. Respecto a la coordinación, si comparamos el sector de la automoción con el naval se aprecian grandes diferencias. Al igual que si comparamos la formación en el sector naval con el mundo de la informática, en donde la empresa cuyos empleados no estén formándose constantemente, están avocados al fracaso. En lo concerniente a la formación, la alta temporalidad de España supone una clara barrera en la transferencia de conocimientos que afecta directamente al aprendizaje en el trabajo. Esta temporalidad se refleja en las *Figuras 1 y 2* [8,9], en la *Figura 1* se ve como España no consigue salvar ese espacio de casi 10 puntos porcentuales entre la media de temporalidad de la Unión Europea de los 19, por otro lado en la *Figura 2* se aprecia como España posee un gran porcentaje de los empleos temporales en el sector manufacturero de la UE de los 19, comprendiéndose entre un 16% y 17% frente a al supuesto valor teórico del 6%, resultado del cálculo ( $1/19 \approx 5,3\%$ ) de un hipotético en el que los 19 países tuvieran la misma cantidad de empleados en el sector manufacturero.

Para avanzar en innovación, coordinación y formación, se están implementando en la industria naval iniciativas basadas en la economía del conocimiento, como las que está llevando a cabo Navantia [10]:

- Digitalización de la maquinaria de los talleres para integrarlos verticalmente y optimizar la producción. Este concepto estaría también bastante relacionado con el IoT, en donde a través de los datos recogidos por los sensores de las máquinas y su transmisión a tiempo real ayuda a coordinar mejor la producción y la cadena de suministros.
- Robótica colaborativa para automatizar las tareas codificables, con especial atención en las que entrañan mayor dificultad o peligrosidad.
- La fabricación aditiva, mediante la impresión 3D, a fin de abaratar procesos y disminuir tiempos. Gran aplicación en apéndices hidrodinámicos.
- La realidad virtual para construir un gemelo digital de cada buque, a fin de mejorar no solo el diseño y la construcción, sino también mantenimiento (especialmente el predictivo) para el cual tendrá un papel importante el big data. E incluso quien sabe si dará pie a la formación de las dotaciones mediante una gamificación del gemelo digital.
- Instauración de la nube, para aumentar la capacidad de almacenamiento, procesamiento y conocimiento de la información, con ventajas añadidas en lo concerniente a la ciberseguridad. El trabajo en la nube facilitaría el trabajo colaborativo.

En definitiva, de todas las líneas de acción que pretende tomar la mayor empresa de construcción y reparaciones navales de España, todas ellas atacan de un modo u otro los 3 puntos clave (innovación, coordinación y formación, aunque este último en menor medida). El problema es que muchas de estas iniciativas conllevan un gran desembolso inicial, y cuando financieramente «*no está el horno para bollos*» hay que saber dónde focalizarse y, sin olvidarse de las bondades de las herramientas de la industria 4.0, se hace más factible y «barato» transformar la cultura empresarial acorde con el nuevo contexto de la economía del conocimiento. De modo que el siguiente paso es preguntarse qué cultura empresarial (sin necesidad de costosas inversiones) demanda el actual entorno de la economía del conocimiento, particularizada en la industria naval española. El sector sujeto de nuestro estudio ha de crear ventajas competitivas que no sean meramente circunstanciales, como ubicación geoestratégica o la capacidad de almacenamiento y regasificación de GNL [2], pero para saber cuál es nuestro radio de acción primeramente vamos a enmarcarnos en el contexto actual de la economía del conocimiento.

Para empezar, en el momento en que se compete en un entorno de globalización, contra países como China o Corea del Sur, la estrategia de aumentar el ratio productividad/coste laboral mediante la reducción de salarios deja de tener sentido, de modo que hay que pensar formas de aumentar la productividad antes de invertir grandes cantidades en TIC's. Algunas herramientas son los salarios de eficiencia, la generación del capital intelectual en la empresa, que se engloba contablemente dentro del concepto «fondo de comercio» (goodwill), o la formación. En estas 3 herramientas hay un considerable margen de actuación en España y más concretamente en la industria naval.

La globalización, como evolución de la mundialización, ejerce una demanda heterogénea de productos, en esto es especialista la industria naval española (cartera de pedidos diversificada en buques tanque, offshore, pesqueros, remolcadores, dragas, oceanográficos) [2], y con fluctuaciones en el tiempo, por lo que se necesita una producción flexible. Y es precisamente en la parte de producción flexible donde realmente el sector naval español apenas ha conseguido adaptarse, y los pocos pasos que ha dado en este sentido han sido el aumento de contratación temporal o, sobre todo en el caso de los astilleros más que las empresas auxiliares, mediante la subcontratación. No obstante, esta estrategia cae en la ilusión de que a corto plazo consiguen un mayor beneficio, pero a costa de una rotación de personal que no consigue transferir los conocimientos adquiridos por los trabajadores, redundando en una falta de formación práctica y por tanto limitación de la competitividad a largo plazo. Ante este contexto ya se ideó en su momento el Lean Manufacturing o Toyotismo, el cual consigue procesos más eficientes (ahorro de costes de material y tiempo) y en el que haremos hincapié más adelante.

Otro frente que cada vez toma más relevancia es la falta de empleos que proporcionen una realización personal, como ya aconteció en la sociedad postindustrial y que conllevó a una pérdida de productividad. De modo que esta carencia se traduce en: una pérdida de empleados comprometidos con la empresa y sus metas. Esta última característica del compromiso está contemplada dentro de la nueva tendencia de trabajo en red, propia de la economía del conocimiento, y que tiene los siguientes pilares [7]:

- Infraestructura tecnológica/digital, capaz de sustituir el trabajo codificable y complementarlo con el mental no rutinario.
- Un alto grado de formación, junto a una educación continuada y polivalente donde son muy valoradas ciertas habilidades como la creatividad o la capacidad de llevar a cabo iniciativas.
- La flexibilidad organizativa, que comprende conceptos como: autonomía de los trabajadores, trabajo por objetivos, organización del trabajo por procesos o por proyectos.
- Gestión de los recursos humanos para retener la mayor cantidad de trabajadores autoprogramables y conseguir aumentar su grado de compromiso con los objetivos de la empresa. Presentándose nuevas formas de retribución más efectivas y eficientes que una simple subida de salarios, como por ejemplo aquellas que permitan atajar los problemas que surgen de compatibilidad entre la conciliación de la vida personal con la laboral.

Por último, a fin de responder cual es la «cultura empresarial» y líneas de actuación en el sector naval español dentro de su contexto (en el que ya se ha explicado el marco de la economía del conocimiento), vamos a hacer una radiografía del sector, representado por los principales astilleros de España. En la *Figura 3* [11] aparecen los principales astilleros ordenados por cantidad de beneficios al año, y además se presentan dos métricas a fin de dar una sucinta imagen de como de «buenos negocios» son, nos referimos a la «Rentabilidad de recursos propios» y el «Margen de beneficio». Y como los datos de un solo año no son ni mucho menos concluyentes para extraer una imagen fiel de la empresa, se ha hecho la media de dichas métricas en los últimos 4 años. Desde luego con este breve análisis no se pretende sentenciar con exactitud cuál es mejor empresa que otra, pero nos da un punto de partida bastante consistente.

A la vista de los resultados podemos separar estos astilleros en 3 grupos:

- Astilleros deficitarios (Zamakona, Metalships & Docks, Balenciaga Murueta y Navantia): que se caracterizan por resultados de ejercicio muy bajos y ante la mínima contingencia pasan a ser negativos. Dentro de este grupo se encuentra como líder de ineficiencia Navantia, y esto tiene su explicación por ser una empresa pública muy vinculada además al sector defensa, donde el presupuesto es «ilimitado» a fin de dar una capacidad operativa. La relación entre el Ministerio de Defensa y Navantia es de comensalismo (en donde el beneficiado es Navantia) a causa del establecimiento de un monopolio artificial generado por el Estado, y es por esta situación tan especial que este astillero no tiene realmente ningún incentivo para pertenecer al grupo de «Astilleros rentables» puesto que en última instancia el Estado siempre la financiará, con el argumento de ser una industria estratégica. Es por esta razón que más allá de clasificar a Navantia en este grupo, no seguiremos utilizándola para sacar conclusiones de los datos aportados por la *Figura 3*.
- Astilleros inestables (Freire, Astilleros Mallorca, Gondan y Francisco Cardama): estos astilleros son capaces de dar un resultado de ejercicio moderado y tienen unos ratios de rentabilidad positivos pero débiles, además tienen un plantilla de empleados generosa en relación a los beneficios que son capaces generar. En este grupo se encuentra Astilleros Mallorca que presenta los mejores ratios dentro de su grupo, y esto se debe a la particularidad de su negocio, fundamentado sobre todo en embarcaciones de recreo, es decir, dirigido a clientes que están más dispuestos a un desembolso mayor por ciertos extras de calidad en los acabados.
- Astilleros rentables (Astilleros de Santander, Astilleros canarios, Nodosa y Armón): son capaces de dar resultados de ejercicio por encima del millón de euros de forma sostenida y son empresas con una rentabilidad consolidada, lo que se aprecia en sus ratios. Cabe mencionar que los dos astilleros que salen mejor parados (Astilleros de Santander y Astilleros canarios) pertenecen al mismo grupo empresarial. Una característica de este tipo de grupo de «Astilleros rentables» es que tienen una plantilla de empleados bastante reducida en relación al resultado de ejercicio que dan, por decirlo de algún modo sus trabajadores son capaces de obtener entre 54000 € y 89000 € de beneficio, lo que supera con margen el coste que supone un trabajador medio en España, solo basta comparar Astilleros de Santander con Balenciaga, con la misma cantidad de trabajadores. Todo esto pone de relieve uno de los conceptos explicados anteriormente, y es que los astilleros que han conseguido proporcionar la flexibilidad de producción requerida por el entorno de globalización, lo han hecho a costa de contratos temporales y subcontratación.

En la *Figura 3* aparecen a la derecha del todo dos columnas a las que no se ha mencionado en absoluto hasta el momento pero resultan interesantes, son las de «Inmovilizado material (medio en los 3 últimos años)» e «Inmovilizado inmaterial (medio en los 3 últimos años)». A priori lo que cabría pensar es que los beneficios de un astillero están intrínsecamente relacionados con su inmovilizado material (el propio varadero, maquinaria de corte, puentes grúa...) y sin embargo como se puede ver (*Figura 4*) la correlación es muy débil. Pero lo más interesante es que si estos astilleros, que a día de hoy conviven en la era de la economía del conocimiento, realmente estuvieran aprovechando las bondades que les proporcionan las tecnologías de la industria 4.0 deberían de tener una cierta correlación con su capital intelectual, el cual se engloba en el fondo de comercio o en nuestro caso el inmovilizado inmaterial, y como se manifiesta por la *Figura 5* esta hipotética correlación es inexistente. De modo que podemos extraer que, a día de hoy existe un amplio margen y una gran oportunidad para implementar el gran abanico de herramientas tecnológicas de la economía del conocimiento.

## **Propuestas**

Una vez desarrolladas las condiciones de contorno en que opera el sector de la industria naval en España y como se está comportando este hasta la fecha, nos podemos permitir establecer una ruta de acción/inversiones para dicho sujeto, las cuales podrían llevar acabo las propias empresas.

Planteamos el punto de vista de que realmente las demandas productivas de la globalización (flexibilidad a nivel temporal) y la estrategia de la industria 4.0 son un evolución del método de producción que desbancó al Taylorismo, el Lean Manufacturing, pero incorporando las tecnologías de la nueva revolución industrial. Es por esto que el eje principal de la estrategia para el sector objeto del estudio pasa por adaptar el Lean Manufacturing al sector y a los tiempos actuales. No obstante, muchas veces se dice que este método de producción es de poca aplicación a industrias que no tienen una cadena de montaje más al estilo del Taylorismo, que dicho modelo de producción adolece de necesitar fabricaciones en serie para tener una aplicación real, es por esto que está muy extendido en el sector de la automoción. Pero nada más alejado de la realidad, a continuación vamos a exponer los principios en los que se fundamenta el Lean Manufacturing [1]:

- *Trabajar en la planta y comprobar las cosas in situ.*
- *Formar líderes de equipos que asuman el sistema y lo enseñen a otros.*
- *Interiorizar la cultura de «parar la línea».*
- *Crear una organización que aprenda mediante la reflexión constante y la mejora continua.*
- *Desarrollar personas involucradas que sigan la filosofía de la empresa.*
- *Respetar a la red de suministradores y colaboradores ayudándoles y proponiéndoles retos.*
- *Identificar y eliminar funciones y procesos que no son necesarios.*
- *Promover equipos y personas multidisciplinarios.*
- *Descentralizar la toma de decisiones.*
- *Integrar funciones y sistemas de información.*
- *Obtener el compromiso total de la dirección con el modelo Lean.*

Como podemos ver, en dichos principios en ningún momento dicen nada de que tienen que ser procesos en serie, ni lo dan a entender. Aunque ya se han expuesto los principios del Lean Manufacturing, merece la pena hacer hincapié en la importancia que se le da en este tipo de producción al concepto de tareas que suponen un despilfarro o por lo contrario un valor añadido, así como la mejora continua (kaizen) y la utilización de las facultades de toda la plantilla implicada en el proceso. Es decir, el método Lean le da muchísima más importancia al capital humano. Una vez expuesto en qué se basa el Lean Manufacturing, se presentan las herramientas/procedimientos de los que este se sirve para hacer realidad esa filosofía, lo cual nos ayudará aún más a asentar la cultura del método [1].

- *Las 5S: Técnica utilizada para la mejora de las condiciones del trabajo de la empresa a través de una excelente organización, orden y limpieza en el puesto de trabajo.*
- *SMED: Sistemas empleados para la disminución de los tiempos de preparación.*
- *Estandarización: Técnica que persigue la elaboración de instrucciones escritas o gráficas que muestren el mejor método para hacer las cosas.*

- *TPM: Conjunto de múltiples acciones de mantenimiento productivo total que persigue eliminar las pérdidas por tiempos de parada de las máquinas.*
- *Control visual: Conjunto de técnicas de control y comunicación visual que tienen por objetivo facilitar a todos los empleados el conocimiento del estado del sistema y del avance de las acciones de mejora.*
- *Jidoka: Técnica basada en la incorporación de sistemas y dispositivos que otorgan a las máquinas la capacidad de detectar que se están produciendo errores.*
- *Técnicas de calidad: Conjunto de técnicas proporcionadas por los sistemas de garantía de calidad que persiguen la disminución y eliminación de defectos.*
- *Sistemas de participación del personal (SPP): Sistemas organizados de grupos de trabajo de personal que canalizan eficientemente la supervisión y mejora del sistema Lean.*

Por último, resulta enriquecedor saber cómo entiende el Lean Manufacturing la incorporación de tecnología y/o maquinaria en la producción. Basándose en el concepto de mejora continua, en el que influyen desde el operario de primera línea hasta los directivos, cuando surge un problema en la producción, se para el proceso y se analiza hasta encontrar el origen, a fin de establecer medidas correctivas e incorporarlas al sistema. Así sucesivamente iteración tras iteración hasta que llega un punto en el que el cuello de botella en la producción es la propia tecnología, y es ahí donde se hace realmente necesaria la inversión en una nueva.

Una vez hecha una presentación del Lean Manufacturing, vamos a ver hasta qué punto es capaz de ajustarse a nuestro sector y a la economía del conocimiento. Lo primero de todo es lo bien que cuadra el peso que se le da al factor humano con las características del trabajo en red y como busca la productividad cambiando la manera de hacer las cosas, olvidando la estrategia errónea de bajar los salarios en el sin sentido que supone al encontrarnos en un mercado global. Es más, de hecho bajo el método Lean, y en un entorno de globalización, lo que cobra más sentido es aplicar salarios de eficiencia, ya no solo para retener el capital humano, sino para captarlo (incluso si cabe, de otras industrias) a fin de darle ese factor disruptivo a la industria naval, que antes o después acabará desembocando en innovación.

Entre las coincidencias del punto de vista de la nueva importancia del factor humano de la economía del conocimiento y del Lean Manufacturing, podemos agrupar las características en dos conjuntos principales:

- **Educación/formación:** la transmisión de conocimientos adquiridos a través de la experiencia por los empleados veteranos a los más novicios se hace vital, «lecciones aprendidas». Para eso se necesita disminuir la rotación del personal, es decir eliminar en la medida de lo posible los contratos temporales y convertir ese conocimiento tácito en conocimiento observable a través de una de las herramientas del Lean antes explicada, la estandarización. El establecimiento de un programa en el que los más experimentados formen a los nuevos, además de mejorar la productividad por razones obvias, también la aumenta por la sensación reconfortante que experimentan los trabajadores que se convierten en maestros, recordemos los peldaños de la pirámide de Maslow, en concreto los de afiliación y de reconocimiento. De este modo a la par que se alcanza una transferencia de conocimientos especializados y de alto valor añadido, también obtenemos empleados más felices y por tanto, motivados para alinearse con los valores y objetivos de la empresa. Por último, teniendo en cuenta que eliminar de la noche a la mañana la temporalidad en la industria naval española es una tarea prácticamente imposible, el uso de la realidad virtual cobra gran importancia e incluyendo las implicaciones que puede tener con el gemelo digital, del que hablaremos más adelante. De este modo se consiguen acelerar sustancialmente los ciclos de aprendizaje de las nuevas incorporaciones de empleados.
- **Trabajadores autoprogramables:** desarrollar equipos de trabajadores con la filosofía de que siempre hay una mejor manera de hacer las cosas, a fin de eliminar los derroches y agregar valor añadido, y la

descentralización de decisiones junto con la «formación» del punto anterior, son las claves para convertir la mayor cantidad posible de mano de obra en empleados autoprogramables. Con la gran ventaja de que al establecerse una cultura de empresa en donde cualquier trabajador puede ejercitar su creatividad y poner en práctica su capacidad de ejecutar una iniciativa, hace que estos puedan ver el fruto de su esfuerzo e identificar con mucha mayor facilidad la consecución de objetivos de la empresa con los suyos propios (sin necesidad de subir los salarios), alcanzando el tan anhelado compromiso de los trabajadores que esperan la empresas en el actual entorno económico. Pero para esto es necesario que toda la estructura de la empresa esté alineada, especialmente la directiva.

Ante esta potenciación de la figura del trabajador, al que se le pide que dé el máximo esfuerzo mental con un alto grado de compromiso y además una cierta flexibilidad de horarios, habrá que remunerarle adecuadamente. Ante esto, surgen cuatro marcadas vías de acción para articular la estrategia de recursos humanos y se pueden ejecutar por separado, pero desde luego crean sinergias al aplicarse conjuntamente:

- Salarios de eficiencia [6]: hay que tener en cuenta que la rotación del capital humano ya no solo limita el crecimiento a largo plazo, sino que también genera costes de contratación y también de formación. Para aquellos tipos de trabajos en los que el tipo de cualificación es bastante diferente, la posibilidad de control y supervisión es difícil llevar a la práctica y los anteriormente mencionados costes de rotación son altos, la estrategia más apropiada es la aplicación de este tipo de salarios. De este modo, al empresario le interesa pagar salarios por encima de lo que marca el mercado ya que captarán a aquellos trabajadores de más calidad y productivos, también disuadirán a los propios trabajadores de no dar la productividad y compromiso que se espera de ellos, puesto que saben que si pierden su puesto de trabajo sería difícil encontrar uno con condiciones tan ventajosas. Por último, los trabajadores se sentirán justamente remunerados y por tanto valorados, lo que dará también prestigio también a su puesto (al igual que a día de hoy no es lo mismo decir que uno trabaja en Google que en la ferretería del barrio).
- Incentivos por objetivos: precisamente en un modelo de Lean Manufacturing donde todos los trabajadores contribuyen al logro de objetivos (eliminar el despilfarro), es de fácil implantación la incentivación por objetivos, puesto que se actúa sobre variables sencillas de medir.
- Teletrabajo: justamente ante un entorno de objetivos mensurables y una demanda de trabajo con un horario flexible, es coherente que el empleador brinde la oportunidad de teletrabajar hasta 2 días a la semana [5] (no hay que olvidar que para la gran mayoría de los puestos de trabajo en la industria naval son trabajos de campo y por tanto requiere aunque sea un mínimo de trabajo in situ). Esta modalidad de trabajo no es de aplicación a la totalidad de los empleos, quedando descartada para aquellos que tienen un trabajo manual de primera línea. Lo que se consigue es mayor capacidad de conciliación de vida personal con la laboral, y como ya hemos dicho que estamos hablando de puestos en los que es difícil ejercer un control/supervisión pero sin embargo los objetivos son fáciles de medir, basta con ejercer un control sobre los objetivos. Además el trabajar en casa evita romper la concentración en tareas donde esta cobra gran importancia, como puedan ser funciones de ingeniería correspondientes a un astillero de nueva construcción, o elaborar un buen presupuesto de una reparación, en donde el desvío de unas horas de trabajo o unos kg de bronce puede hacer que no se obtenga el beneficio esperado.
- Formación: pagar al empleado con formación como retribución en especie, con utilidad en el propio puesto de trabajo y por otro lado con reconocimiento fuera de la empresa. Esta es una buena idea por partida doble, por un lado el conocimiento adquirido sirve para aplicarlo al aumento de la productividad de la propia empresa y por otro, el empleado percibe que la empresa está invirtiendo en él, lo que le hace sentirse más valorado, generando los mismos costes de cambio que con los salarios de eficiencia.

Al margen de la adopción del Lean Manufacturing como estrategia, sin elevadas inversiones, para crear ventajas competitivas robustas que actúen sobre al menos alguno de los puntos clave de nuestro sector:

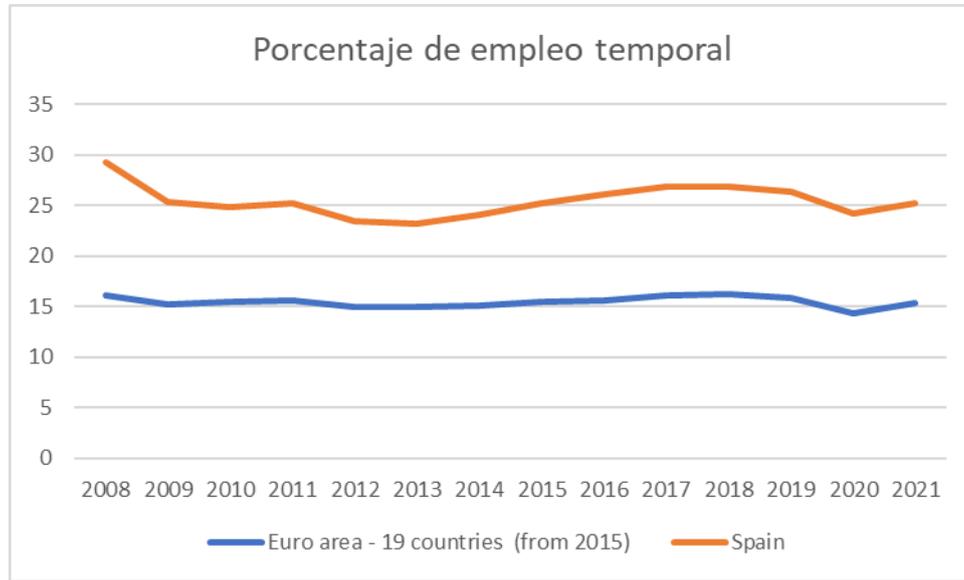
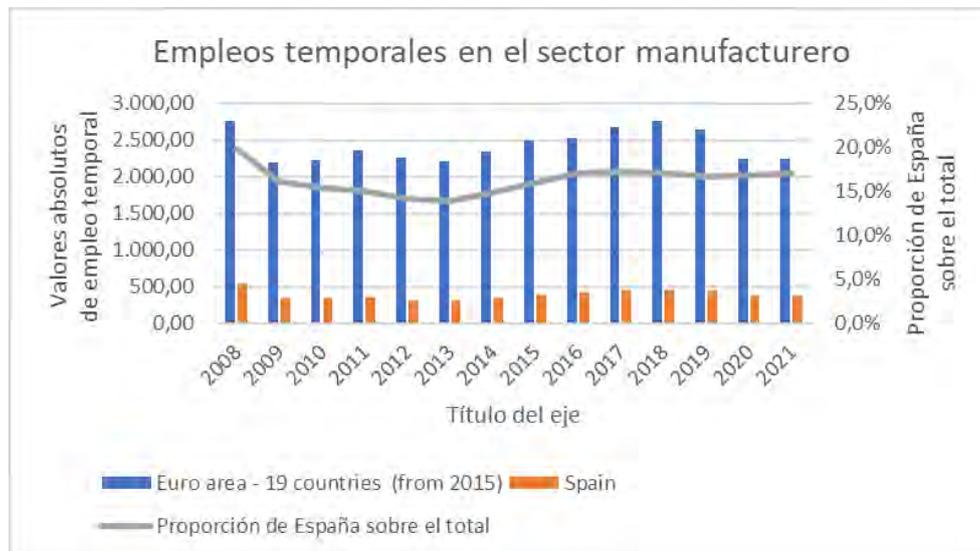
innovación, coordinación y formación, existen otras dos palancas con clara aplicación en la industria naval y que potencia alguno de los 3 puntos clave. Y aunque ya se habían mencionado cuando se detallaban las iniciativas de Navantia, a continuación vamos a entender el porqué de su importancia dentro de la estrategia propuesta:

- Trabajo en la nube (cloud computig) [4]: en un ámbito de aplicación de Lean Manufacturing las aplicaciones en la nube proporcionan versatilidad y autonomía, contribuyendo a lograr mejorar la innovación y la coordinación. Por ejemplo, se pueden disminuir en muchas ocasiones tiempos de traslado, por el hecho de que se quiera consultar una cierta documentación o función de software que sólo se encuentra en el ordenador de la oficina (esto visto sobre todo desde el punto de vista de una empresa que efectúa reparaciones navales fuera de sus instalaciones) u otorgando mayor facilidad de implantación para la estandarización, dando la oportunidad a que los trabajadores carguen directamente en la nube los datos necesarios. Son solo algunos ejemplo, pero posiblemente aun no llegamos a ver la cantidad de aplicaciones que nos brinda esta tecnología, incluso en un futuro se podría vincular con el gemelo digital del buque, con lo que ello significa. Lo más normal es que una empresa con pocos recursos utilice un cloud computing del tipo SaaS (Software as a Service) ya existente. Pero a poco que se hayan estudiado cuales serían todos los requisitos de una empresa con una férrea cultura de Lean Manufacturing, que ya tenga un cierto bagaje en la compenetración de este con el cloud computing, y además tenga una posición financiera más sólida, le compensará tener una nube del tipo PaaS (Platform as a Service), en el cual la aplicación sea un traje a medida para satisfacer la necesidades de su producción.
- Gemelo digital [4]: ésta tiene una aplicación más reducida en la industria naval, abarcando solo astilleros de nueva construcción y astilleros de conversión. Para entender las implicaciones más significativas del gemelo digital es muy útil saber primeramente como se diseña un buque y es aquí donde entra la espiral de proyecto (*Figura 6*). A grandes rasgos, en primera instancia se hace una definición del buque en la que se tratan todos los aspectos por orden de importancia y una vez se llega al final de la primera vuelta se empieza una nueva iteración para refinar los aspectos que entran en conflicto con pasos anteriores y así sucesivamente las veces que hagan falta hasta que cada uno de los pasos del diseño sean coherentes con todos los demás. Por poner un ejemplo sencillo, en el primer paso de la primera vuelta de la espiral definimos las dimensiones principales (eslora, manga, puntal, coeficiente de bloque...), en el segundo la velocidad y por tanto la potencia propulsora que necesita llevar instalada, en el tercero las formas para cumplir con dichas dimensiones y velocidades etc. Hasta que llegamos a la etapa donde se diseña la planta propulsora y el resto de la cámara de máquinas, y vemos, por ejemplo, que con los pesos y estructura diseñados en pasos anteriores se produce un conflicto en la disposición de los motores principales poniendo en peligro los requisitos de estabilidad, siendo en ese punto donde empezaría la siguiente espiral/iteración del proyecto del buque. Después de esta breve introducción al proyecto del buque, para los profanos en la materia, se comprende mejor las grandes facilidades que da el gemelo digital, en donde al haber una copia digital del buque real aumenta la probabilidad de encontrar aquellos puntos críticos que conllevan a la siguiente iteración y así, al acortar las iteraciones, se disminuye el tiempo de diseño. Pero ya no solo son las ventajas del diseño, sino que el gemelo digital abre un abanico de posibilidades enorme, desde poder conectarlo con la fabricación inteligente en la cual se puedan optimizar los procesos de producción en función de cada fase del proceso de construcción, o el asociarlo a un modelo de realidad virtual que pueda ser visitado por los futuros usuario o los posibles mantenedores, dando un diseño de más calidad de cara a su vida operativa o incluso darle una utilidad como herramienta de formación. Puede abrir nuevas vías de negocio en el campo del mantenimiento de la plataforma, en el que dicho gemelo digital reciba como input del buque, una vez construido y operativo, señales de sensores de vibraciones temperaturas presiones... De modo que el astillero de construcción sea capaz de identificar un mantenimiento predictivo del equipo en cuestión antes de que este falle, o incluso que pueda enviar una asistencia de mantenimiento correctivo a cualquier parte del mundo, teniendo de antemano el origen

de la avería suficientemente acotada, este último punto se acopla bastante bien a la flexibilidad geográfica que demanda el contexto económico de globalización.

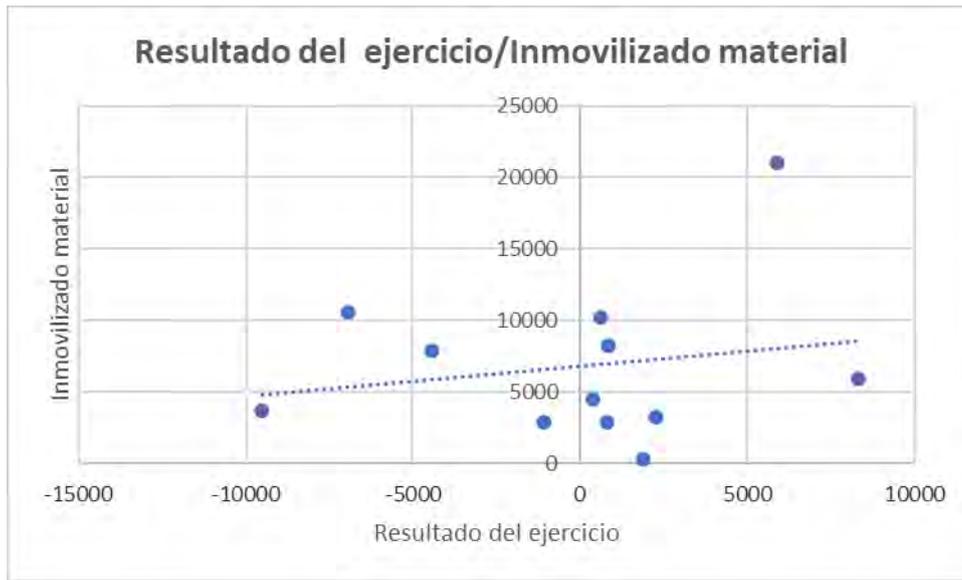
### **Referencias Bibliográficas**

- [1] HERNÁNDEZ MATÍAS, Juan Carlos, VIZÁN IDOIBE, Antonio. Lean manufacturing. Conceptos, técnicas e implantación. Madrid: Fundación EOI, 2013.
- [2] MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO. Agenda Sectorial de la Industria Naval
- [3] Woo, J.H.; Zhu, H.; Lee, D.K.; Chung, H.; Jeong, Y. Assessment Framework of Smart Shipyard Maturity Level via Data Envelopment Analysis. Sustainability 2021, 13, 1964.
- [4] RODAL MONTERO, Enrique. Industria 4.0, Conceptos, tecnologías habilitadoras y retos. Madrid, Ediciones Pirámide, 2020. ISBN: 9788436842142.
- [5] <<https://cepr.org/voxeu/columns/working-home-too-much-good-thing>> (Consultado: 14/12/22).
- [6] PÉREZ INFANTE, José Ignacio. El desempleo. Barcelona: FUOC.
- [7] TORRENT I SELLENS, Joan. TIC, conocimiento y trabajo. El trabajo en red en la economía del conocimiento. Barcelona: FUOC.
- [8] <[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/LFSA\\_ETGAN2/default/table?lang=en&category=la\\_bour.employ.lfsa.lfsa\\_emptemp](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/LFSA_ETGAN2/default/table?lang=en&category=la_bour.employ.lfsa.lfsa_emptemp)> (Consultado: 14/12/22).
- [9] <[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/LFSA\\_ETPGAN/default/table?lang=en&category=la\\_bour.employ.lfsa.lfsa\\_emptemp](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/LFSA_ETPGAN/default/table?lang=en&category=la_bour.employ.lfsa.lfsa_emptemp)> (Consultado: 14/12/22).
- [10] <<https://shipjournal.co/index.php/sst/article/view/165/467>> (Consultado: 14/12/22).
- [11] <<https://login.bvdinfo.com/R0/SabiNeo>> (Consultado: 14/12/22).

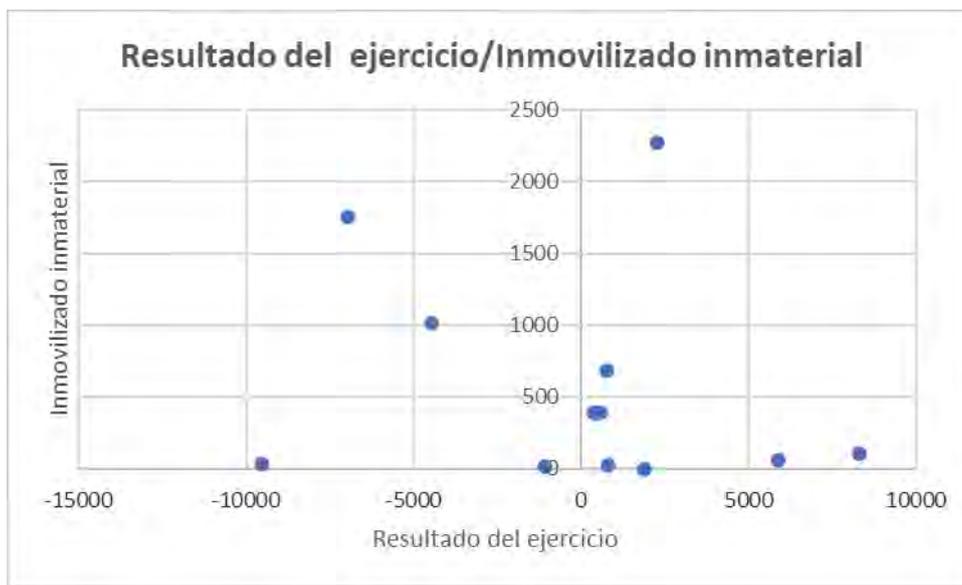
**Anexos****Figura 1.** Porcentaje de empleo temporal.**Figura 2.** Empleos temporales en el sector manufacturero.

Nombre	Ingresos de explotación mil EUR Últ. año disp.	Resultado del Ejercicio mil EUR Últ. año disp.	Número empleados Últ. año disp.	Resultado del Ejercicio/Número empleados	Rentabilidad sobre recursos propios (%) Medio (4 años)	Margen de beneficio (%) Medio (4 años)	Inmovilizado inmaterial mil EUR Medio (3 años)	Inmovilizado material mil EUR Medio (3 años)
<b>ASTILLEROS DE SANTANDER SAU</b>	46.378	8.323	93	89	36,71	14,63	108	5.877
<b>ASTILLEROS CANARIOS, SA</b>	41.835	5.886	111	53	33,44	15,87	61	21.050
<b>NODOSA SL</b>	30.057	2.271	154	15	18,74	7,40	2.267	3.239
<b>ASTILLEROS ARMON-VIGO SA</b>	65.313	1.895	35	54	5,79	5,35	1,38	237,33
<b>CONSTRUCCIONES NAVALES P FREIRE, SA</b>	102.202	827	56	15	-0,04	-0,29	22	8.254
<b>ASTILLEROS DE MALLORCA SA</b>	43.830	792	107	7	18,34	4,07	688	2.831
<b>ASTILLEROS GONDAN SA</b>	67.543	592	68	9	3,68	1,05	395	10.209
<b>FRANCISCO CARDAMA SA</b>	8.698	397	66	6	1,93	2,37	389	4.504
<b>ASTILLEROS ZAMAKONA SA</b>	23.484	-1.075	52	-21	-1,47	-3,02	18	2.893
<b>METALSHIPS &amp; DOCKS SA</b>	14.373	-4.452	66	-67	-57,99	-19,53	1.014	7.868
<b>BALENCIAGA, SA</b>	73.097	-6.951	93	-75	-10,12	-5,99	1.758	10.593
<b>ASTILLEROS DE MURUETA SOCIEDAD ANONIMA</b>	72.206	-9.512	85	-112	-103,02	-8,71	38	3.635
<b>NAVANTIA SA SME.</b>	1.331.675	-93.248	3.912	-24	17,84	-17,70	19.401	311.730

Figura 3. Situación financiera de los principales astilleros españoles, hasta 2021.



**Figura 4.** Correlación con el inmovilizado material.



**Figura 5.** Ausencia de correlación con el inmovilizado inmaterial.





## BIOGRAFÍA<sup>1</sup>

### *Jorge Próspero De Verboom, fundador del Real Cuerpo de Ingenieros*

Debido a su gran dedicación y profesionalidad como ingeniero militar, De Verboom fue convocado a regresar a la península ibérica (se encontraba en los Países Bajos, ocupando el cargo que su padre dejó vacante a su muerte) por el propio rey, con la finalidad de nombrarle encargado de organizar lo que se conocería como el **Real Cuerpo de Ingenieros Militares** de España.

Mediante Real Decreto de 13 de enero de 1710, Felipe V nombró ingeniero general a Jorge Próspero de Verboom, quien, meses después, constituiría el Cuerpo de los Ingenieros, el antecedente del ahora conocido como Arma de Ingenieros. Dicha organización se componía de diferentes categorías, que iban desde el ingeniero general hasta el designador. El rey aprobó finalmente esta nueva organización el 17 de abril de ese mismo año.

Pese a encontrarse en una época en la que abundaban los conflictos bélicos debido a la situación política, con las consiguientes vicisitudes que debían afrontar los ingenieros militares, De Verboom consiguió focalizar todas sus fuerzas en mejorar la calidad de la labor de estos dentro del sector militar, con la creación del nuevo cuerpo.

Gracias a De Verboom, aumentó el número de ingenieros que entraron en el Ejército, tanto de origen nacional como procedentes de otros países. Asimismo, evolucionaron las técnicas defensivas y de ataque, y se fueron adquiriendo conocimientos que se pusieron en práctica, exitosamente, en conflictos como la toma de Mesina, en el año 1718.

---

<sup>1</sup> FUENTE: [Jorge Próspero de Verboom, fundador del Real Cuerpo de Ingenieros - El blog de la ingeniería \(elblogdelaingenieria.com\)](http://elblogdelaingenieria.com)

Debido a la experiencia adquirida por haber tratado con diferentes militares procedentes de ejércitos europeos, Jorge Próspero de Verboom consiguió organizar un sistema de reconocimientos y formación cuyo fin era enseñar a los ingenieros a mejorar y a que dieran lo mejor de sí mismos.

Todas estas actuaciones derivaron en una nueva meta: la reapertura de la Real Academia Militar de Matemáticas y Fortificación, ubicada en Barcelona, para conseguir que todos los ingenieros que pertenecieran al cuerpo tuviesen la oportunidad de formarse debidamente, con la adquisición de todos los conocimientos necesarios.

De Verboom construyó la ciudadela de Barcelona y la de la Seo de Urgel, reformó el castillo de Montjuïc y la fortaleza de San Fernando, en Figueras. También actuó fuera de Cataluña y, en 1725, comenzó a trabajar como inspector de edificios y fortificaciones. En esta época proyectó distintas infraestructuras, de gran robustez, que pudieran ser útiles al servicio militar, como el arsenal de la ciudadela de Barcelona.

En definitiva, Jorge Próspero de Verboom fue una figura muy destacada, no solo en el ámbito militar. Gracias a sus construcciones, planteamientos e ideas, se avanzó notablemente en el sector de la ingeniería en su época.

