

Arqueología naval virtual: reconstrucción digital de la nao de 400 toneladas de la “Instrucción náutica” de Diego García de Palacio (1587)

Virtual nautical archaeology: digital reconstruction of the 400 toneladas nao from Diego García de Palacio’s “Instrucción náutica” (1587)

Ricardo Visiers Bañón. Ingeniero naval
Director de tesis: Francisco Fernández González. Doctor Ingeniero Naval. Gabinete de Historia de la Ciencia y la Tecnología Navales.

Resumen

El período de la Historia comprendido entre 1570 y 1620 nos ha dejado un importante conjunto de documentos relacionados con la construcción naval en la Península Ibérica. Entre ellos destaca la “Instrucción náutica” escrito por Diego García de Palacio en 1587. Entre sus páginas se encuentra la descripción de una nao de la *Carrera de Indias* de 400 toneladas y sus proporciones, a las que el autor añadió lo que se consideran los primeros planos impresos de una embarcación.

El sistema de generación de formas empleado por los constructores de la época provenía de una secular tradición nacida en el Mediterráneo. Mediante reglas geométricas sencillas, el constructor naval trazaba las secciones centrales y el perfil de la nao, quedando los extremos de la misma (hasta más de la mitad de la eslora) a su buen hacer y experiencia.

Las herramientas informáticas de generación de superficies mediante NURBs (Non-Uniform Rational B-spline) permiten reconstruir las formas de los navíos reproduciendo con fiabilidad las carenas de los mismos. En este trabajo se interpretan las formas de la nao de 400 toneladas descrita por Palacio y se comparan sus proporciones y coeficientes hidrostáticos con otros navíos de distintas épocas.

Abstract

The period between 1570-1620 has left a remarkable amount of documents related to shipbuilding in the Peninsula Ibérica. Among them, the *Instrucción náutica* wrote by Diego García de Palacio in 1587 is widely recognized as the first published book that includes an extensive discussion of ship design and construction. García de Palacio centers his discussion around a ship of 400 *toneladas*, the explanation is accompanied by a series of woodcuts that illustrate the shape and dimensions of the ship.

In the last XVI century, ship hulls were designed following procedures based upon an old shipwrighty tradition born in the Mediterranean. By simple rules, the master shipwright plots the central frame and tail frames and complete the hull body by means of wooden ribbands.

3D computer modelling software by NURBs surfaces helps to recreate ships hulls. In this work the 400 toneladas nao is reconstructed and her hydrostatics parameters are assesed against other old ships.

Palabras clave: (entre 4 y 6) Construcción naval, Historia, Arqueología naval, Cálculos hidrostáticos, Diseño por ordenador

Keywords: Shipbuilding history, naval archaeology, Hydrostatics, 3D modelling

Índice

1. Introducción	2
2. La generación de formas en el siglo XVI.....	3
3. El autor y la obra.....	5
4. La construcción naval en el texto.....	7
5. Reconstrucción de la nao de 400 toneladas	16
6. Análisis hidrostático.....	19
7. Comprobación del arqueo	24
8. Conclusiones	28
9. Bibliografía.....	30
10. Ilustraciones.....	32

1. Introducción

El período comprendido entre 1570 y 1620 es rico en documentos de construcción naval y navegación de marcado carácter técnico en la Península Ibérica. Se conocen un buen número de manuscritos y libros¹ que, bien en exclusiva, o como parte de una temática marítima más amplia, contemplan aspectos claves de la construcción naval en esos años. El comienzo del siglo XVII trajo consigo la normalización de la construcción naval en España a través de las Juntas de Constructores, que redactaron lo que se convirtió en Ordenanzas Reales de construcción naval promulgadas en los años 1607, 1613 y 1618, completando así la documentación de marcado carácter técnico del período.

Entre ellos destaca la *Instrucción náutica*², considerado el primer libro publicado de esta naturaleza. En sus páginas, el autor, Diego García de Palacio, describe con detalle las proporciones de una nao de 400 toneladas que toma como ejemplo de *nao de la carrera de indias* e incluye “planos” tanto de esta nao como de otra de 150 toneladas.

Ya en nuestros días, la aparición de herramientas de trabajo digitales ha facilitado la que hasta entonces era una tediosa tarea de alisado de formas. Desde principio de los años 80 del siglo pasado comenzaron a proliferar programas informáticos de generación de formas a partir de superficies NURBs (Non-Uniform Rational B-spline). Con el transcurso de los años, este sistema se generalizó en determinados ámbitos y muy especialmente en el diseño naval de embarcaciones deportivas.

El presente trabajo se propone, a partir de una interpretación del texto de García de Palacio y mediante el empleo del software de generación de formas, reproducir la carena de la nao de 400 toneladas de forma que nos permita conocer sus características hidrostáticas y compararla

¹ Nos referimos, entre otros, a: “Ars Nautica” (1570) y “Livro da fabrica das naus” (1580) del padre Fernando Oliveira, “Itinerario de navegación de los mares y tierras occidentales “ (1575) de Juan Escalante de Mendoza, “Instrucción náutica” (1587) de Diego García de Palacio, “Livro primeiro de arquitectura naval” (1608) de J.B. Lavanha, “Arte para fabricar, fortificar y aparejar naos de guerra y merchante” (1611) de Tomé Cano y el “Livro de traças de carpintaria” (1616) de Manuel Fernández.

² (García de Palacio, 1587)

con otras embarcaciones similares. Para ello emplearemos el software Rhinoceros© en su versión 5.

2. La generación de formas en el siglo XVI

El diseño de los buques de finales del siglo XVI y principios del XVII en la Península Ibérica fue el resultado de una tradición depurada a lo largo de una experiencia secular que los estudiosos denominan “mediterránea” en oposición a la llamada tradición “atlántica” del norte de Europa. La primera se asocia con la construcción mediante el trazado previo de unas secciones sobre las que se colocaban las tracas del forro a testa debidamente calafateadas, mientras que en la segunda, el forro era el primer elemento que se montaba, colocando las tracas a tingladillo sobre las que posteriormente se situaba la estructura transversal.

Dado que no se empleaba la técnica del trazado de formas mediante planos, los diseños se apoyaban en reglas simples y en formas sencillas trazadas a partir de arcos de circunferencia. Muchos de los constructores navales de esta época eran analfabetos y difícilmente conocían las reglas geométricas más elementales. Los procedimientos eran empíricos y se basaban en la experiencia celosamente guardada por los profesionales del gremio.

No obstante existieron científicos, navegantes, constructores, armadores e incluso gobernadores de las tierras de ultramar que se preocuparon por dejar constancia de ciertas reglas y proporciones que garantizaran la consecución de unas formas fiables y resistentes. Uno de ellos es Diego García de Palacio a cuya obra dedicamos este trabajo.

Partiendo del porte de la nave y tomando como base una medida constructiva principal, que bien podía ser la manga, como es el caso de Tomé Cano:

« Lo primero que se ofrece y que hay que saber para que una nao tenga ben fundamento en todo su fabrica, cuerpo y cosas que le convienen, es la manga que ha de tener»³,

bien la longitud de la quilla como es el caso de F. Oliveira:

« (...) Viniendo a nuestros propósitos que es tratar de las medidas de los navíos: conviene que en cada navío de cualquier tamaño o forma que sea, se toma de una cierta parte de el para regla y fundamento de las medidas de todas las otras partes del mismo navío.(...) Esta cierta parte en los navíos de carga es la quilla»⁴

mediante simples reglas geométricas se determinaban las medidas principales del buque.

Hasta prácticamente finales del siglo XVI continuaba vigente la “regla” de As, Dos, Tres, establecida durante el siglo anterior y mediante la cual se relacionaba la manga (as), la longitud de la quilla (dos veces la manga) y la eslora (tres veces la manga)

Para trazar la cuaderna maestra⁵, se determinaba el plan⁶ como una fracción de la manga y el puntal (como medida tomada desde el plan hasta la cubierta principal). Poco a poco se fueron añadiendo más parámetros constructivos incrementando el control sobre los diseños, proceso que finaliza con la Ordenanza Real de 1618 en la que se regulan más de 200 medidas de navíos entre 80 y 1074 toneladas. El trazado de la cuaderna maestra hasta la cubierta principal se realizaba mediante un arco de circunferencia. También quedaban definidas desde un principio la eslora⁷ en la cubierta que determinaba los lanzamientos⁸ de proa y popa. El codaste

³ Cano, 1611, pág. 14v

⁴ Oliveira, 1570-1580, fol. 69

⁵ Sección donde se situaba la manga máxima del buque.

⁶ Parte inferior y más ancha del fondo de un buque en la bodega; o bien la que de cada lado de la quilla se acerca a ser horizontal y está formada por varengas llanas. (Lorenzo, Murga, & Ferreiro, 1865)

⁷ Se nombraba simplemente con el término “eslora”.

se trazaba mediante una línea recta mientras que para la roda se empleaba un arco de circunferencia.

Para generar unas formas “controladas” se diseñaban dos secciones transversales adicionales y situadas simétricamente a proa y popa de la maestra. Estas cuadernas, llamadas redeles o almogamas⁹ se trazaban mediante unos gálivos creados a partir de la maestra, por los que se modificaban: el plan y la astilla en los redeles. Posteriormente, se añadió un tercer gálivo, la joba, que aumentaba la manga en el genol para evitar que la carena se cerrara a medida que se desplazaba el gálivo del plan hacia proa o popa¹⁰. Entre los redeles se situaban otras cuadernas, llamadas “de cuenta” cuya forma (plan y astilla) se determinaba mediante instrumentos geométricos de reparto¹¹, de manera que se garantizaba unas formas ovaladas, tal como dice Tomé Cano al describir el método empleado por Juan de Veas:

« (...) a cada uno de por sí muda la forma y muda el trazo así como se ha dicho, con el cual trazo queda la forma y el plan de la nao ovado y no cuadrado como lo es la forma de las otras naos que fabrican todos los otros maestro»¹²

En algunos casos el autor añadía las alturas de los delgados¹³ a proa y popa en su intersección con la roda y el codaste.

Finalmente se dejaba en manos del buen hacer del constructor, determinar las formas comprendidas entre los redeles y los extremos de proa y popa de la nao. Para ello, el maestro carpintero se valía de unas varilla flexibles o vagras¹⁴ a modo de junquillo. Este sistema producía buques de formas impredecibles que eran difíciles de reproducir de un barco a otro.

⁸ La inclinación o salida que hacia fuera de las perpendiculares de la quilla tienen el codaste y la roda. (Lorenzo, Murga, & Ferreiro, 1865)

⁹ Habitualmente los autores españoles empleaban “redel” mientras que los portugueses utilizaban “almogama”, sin embargo, Tomé Cano emplea también el término “almogama” en su obra ya citada.

¹⁰ Tomé Cano es el primero que la menciona en su libro junto con una definición algo confusa: “Joba: es un crecimiento que se da a los maderos de cuenta en las puntas altas que hacen el costado”. (Cano, 1611, pág. 54r)

¹¹ Estos “instrumentos” consistían en proporciones geométricas generadas a partir de una circunferencia (“media luna”) o triángulos (“brusca”). *El método se fundamenta en la definición de crecimientos o acortamientos progresivos de las dimensiones básicas de varengas y genoles obtenidos como proyecciones de segmentos circulares sobre su radio. Estas proyecciones al progresar a lo largo de la eslora generaban formas elípticas que resolvían bien las formas de proa y popa.* (Fernández González, Apestegui, & Miguelez García, 1992, vol. 1, pág. 17)

¹² Cano, 1611, pág. 50r

¹³ Las partes de los extremos de popa y proa en las cuales se estrecha el pantoque, formando sus lados un ángulo más o menos agudo desde la quilla que es donde está el vértice. (Lorenzo, Murga, & Ferreiro, 1865)

¹⁴ Estas varillas también se conocían como “madres” y se denominaron “armaduras” en Portugal

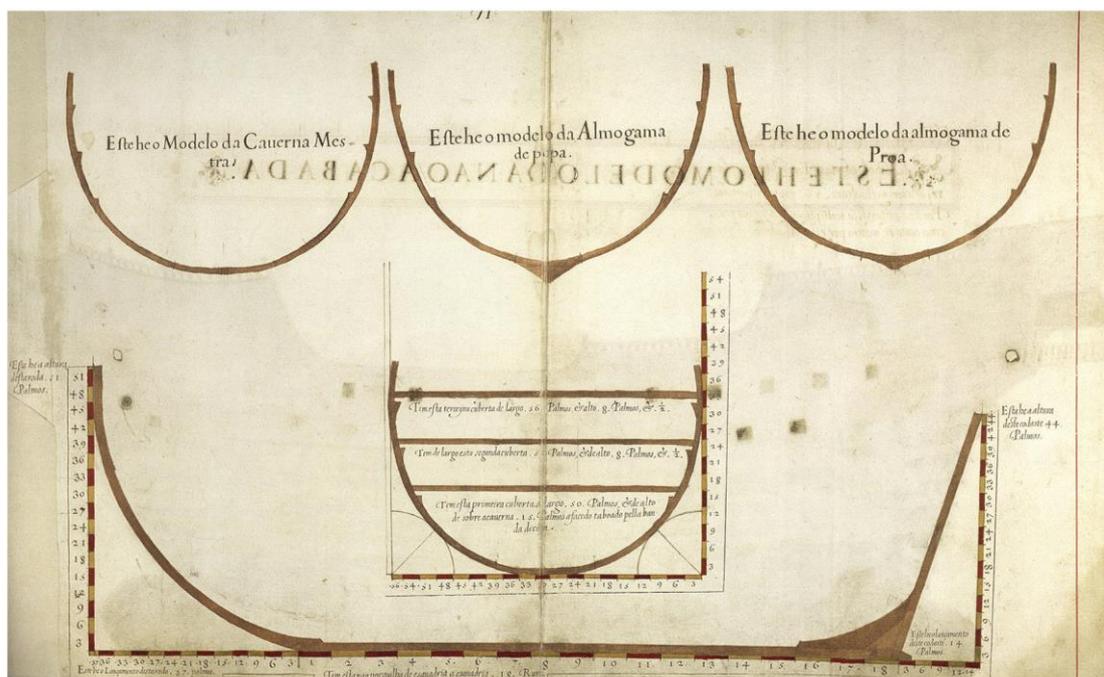


Ilustración 1. Perfil, cuaderna maestra y almogamas de nao de quatro cubiertas. Fuente: "Livro de traças de carpintaria" (1616)

3. El autor y la obra

Diego García de Palacio, hijo de Pero García de Palacio) y María Sanz de Arce, natural de Ambrosero (Cantabria), nació en 1542, estudió en Salamanca y Valladolid donde se licenció en Leyes. Aunque algunos estudiosos pretenden que fue educado para el servicio naval, no existen evidencias de ello¹⁵. Fue el mayor de cinco hermanos, tres de los cuales murieron en combate.

Sus estudios le aseguraron un puesto de relevancia al servicio del rey al mismo tiempo que le otorgaron el nombramiento de hidalgo. Su matrimonio con Isabel de Hoyo Solórzano, sobrina del secretario de Carlos V impulsó su carrera como burócrata al servicio de la corona. Fruto de él, nacieron cuatro hijos, el primero de los cuales en España y los otros tres en México.

En 1572 fue nombrado "oidor" (equivalente a juez en la actualidad) lo que le concedía la prerrogativa de dirigir correspondencia directamente al rey Felipe II. Sus responsabilidades incluían el despacho de informes al rey informándole de acontecimientos en la colonia y la emisión de ordenanzas, entre otras. Tras su llegada a Ciudad de México, fue nombrado rector de la Universidad en 1581. En 1583 publicó su primer libro "Diálogos militares", en el que reflejaba las tácticas militares desarrolladas en Italia sin apenas referencia al Nuevo Mundo, por lo que es de suponer que Palacio las adquirió a través de diversas fuentes, distintas de su propia experiencia.

Es cierto que si en su "Instrucción náutica" acreditó profundos conocimientos astronómicos y marinos, en sus "Diálogos militares" dio prueba de su profunda instrucción en las matemáticas, la historia y en la balística y la artillería, de un modo tanto más portentoso, cuanto

¹⁵ (Laanela, 2008)

que su profesión parecía alejarle de unos estudios tan complicados y difíciles¹⁶. En 1587 el virrey le nombra de nuevo “capitán general” de una flota creada para combatir a Thomas Cavendish en la costa del Pacífico de Perú. La elección de García de Palacio fue justificada por ser una persona “muy versada y experta en materia de guerra en mar y tierra”. De nuevo Palacio no fue capaz de ejecutar las órdenes y esperó hasta recibir noticias de la ausencia de Cavendish en las costas.

En 1589 fue condenado por el Consejo de Indias por corrupción y abuso de poder, algo habitual entre los “oidores” del Nuevo Mundo. Fue suspendido por nueve años pero no pudo retomar su puesto ya que murió en México en 1595.

Su “Instrucción náutica” fue publicada en 1587 en México en formato de cuarto menor (solo están numerados los “rectos” de cada página) con tipografía romana. Al texto lo acompañan 24 dibujos realizados mediante moldes de madera grabada que aparecen distorsionados como resultado del proceso de impresión. Está escrito, al igual que sus “Diálogos militares” en formato de diálogo entre un vizcaíno y un montañés a imitación de los escritores clásicos¹⁷, lo cual dota al texto de un claro carácter didáctico. Está considerado como la primera obra impresa de la que una parte importante de su contenido constituye un tratado de construcción naval.¹⁸

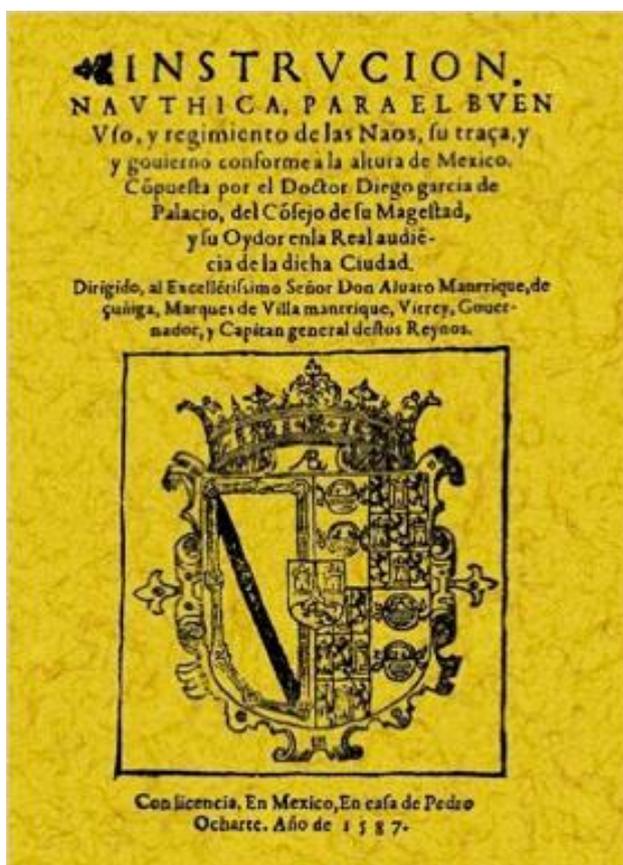


Ilustración 2. Portada del libro "Instrucción náutica" (1587)

¹⁶ (Fernández Navarrete, 2003)

¹⁷ La mayoría de los textos relativos a náutica de la época están escritos en este formato.

¹⁸ Rieth, Essai de restitution d'un bâtiment de 400 toneladas, d'après Diego García de Palacio (1587), 1988, pág. 466

Los primeros tres libros son un compendio de conocimientos de navegación y astronomía de la época. El cuarto libro de la *Instrucción náutica* es el más original y por ello ha llamado la atención de los estudiosos. Incluye discusiones sobre las proporciones de las naos, mástiles, jarcia, responsabilidades del personal de a bordo y tácticas navales. El libro concluye con un vocabulario de términos “que usa la gente de la mar”, en el que se relacionan más de 500 palabras¹⁹ reforzando así la hipótesis de que el libro estaba dirigido a una audiencia no especializada en los temas tratados en él. Está considerado como el primer texto náutico de esta naturaleza²⁰.

Existe una docena de ediciones²¹ originales repartidas entre Estados Unidos y España. En 1944 se publicó una edición facsímil prologada por J. Guillén Tato. Fernández Duro reprodujo las páginas del libro cuarto²².

4. La construcción naval en el texto

El texto relativo a construcción naval lo encontramos en el libro cuarto, titulado “De la cuenta y lo que pertenesce a la rosa²³ de qualquier nao”. Está dividido en 35 capítulos, el primero de los cuales trata de las proporciones y medidas de las naos, sobre las que fundamentaremos nuestro estudio.

Tras una primera parte en la que introduce el tema estableciendo semejanzas entre el hombre y el navío²⁴, Palacio determina las unidades de medida:

«hácese pues la cuenta de las naos generalmente por codos, que dos pies o dos tercias de vara hacen un codo» [p. 89v]

Esta medida denominada “codo castellano”²⁵ equivalía a 2 pies o 32 dedos y fue modificada posteriormente en 1590 mediante una orden de Felipe II que determinaba:

«(...) cómo se han de tomar las medidas para el arqueo y que se haga con el codo cuyo patrón acompaña, que es de dos tercias de vara y más un treinta y dos avo dél, como se hace en la costa de Poniente, el cual es medio entre los mayores y menores con que de presente se arquea, a fin de que en todas partes de estos reinos sea igual».²⁶

Esta nueva medida se denominó “codo real” o “codo de ribera” y equivalía a 2 pies y un dedo o 33 dedos.²⁷

A continuación establece el tamaño más conveniente para la nao mediante sus toneladas de carga:

«me parece que assí para guerra, como para merchancia, y para porte, y tamaño conviniente de una nao, vastan quatrocientas toneladas: y assi ire respondiendo según este tamaño lo que entendiere» (pág. 90).

Especifica, a continuación, las toneladas a las que se refiere dando su equivalencia en pipas de vino:

«Por manera que una nao de quatrocientas toneladas (que dos pipas²⁸ hacen una)...» (pág. 90).

¹⁹ De ellas más del 10% pertenecen al casco del barco o su construcción.

²⁰ Laanela, 2008, pág. 35

²¹ Para realizar este trabajo se ha empleado una edición facsímil de Editorial Maxtor de 2007.

²² Fernández Duro, 1881, pág.7-35

²³ “rosca” (Fernández Duro, 1880, pág 44)

²⁴ Otros autores de tratados de náutica proceden de forma similar (Oliveira y Lavanha).

²⁵ El codo castellano medía 557 mm (Hormaechea, Rivera, & Derqui, Vol 1, pág. 114)

²⁶ Fernández Duro, 1880, pág 370

²⁷ Casado Soto J. , 1988, pág. 67

El hecho de que añada este detalle nos induce a pensar que las toneladas a las que se refiere son toneladas de flete o de carga (no de arqueo) que se correspondía con el tonel andaluz de 8 codos castellanos cúbicos equivalente a 1,3844 m³ ya que de lo contrario estaría empleando el codo castellano como unidad de longitud y el codo de ribera como unidad de volumen. En cualquier caso, hasta 1590 convivieron ambas unidades de arqueo como “toneladas de sueldo” o “toneladas de carga”.

Palacio comienza por dar las medidas principales de la nao de 400 toneladas:

«(...) ha de tener treynta y quatro codos²⁹ de quilla, desde el codaste de popa, al codillo de proa, y de manga, diez y seis, que es casi la mitad de la quilla: y no aviendo de llevar xareta, tendrá el navío deste porte, onze codos y medio de puntal, que es el tercio de la dicha quilla: porque aviendo de tenerla (por lo que esta ha de subir) será nescessario añadir otros tres codos, que por todo serán catorze y medio» (pág. 90)

Las tres dimensiones principales: quilla, manga y puntal, se corresponden con las de la regla As, Dos, Tres, tal como el propio autor describe en el texto con las coletillas que añade al final de cada una de ellas: “que es casi la mitad de la quilla”; “que es el tercio de la dicha quilla”.

El puntal, lo define el propio Palacio en el vocabulario al final del libro como:

“Puntal del navío, es el alto que tiene el navío desde la quilla a la cubierta principal” (pág. 152 r.)

Este puntal a la cubierta principal, no era el empleado en ninguna de las fórmulas de arqueo³⁰ vigentes en 1578 sino que se correspondía con la capacidad de carga de la embarcación, como se ve cuando el mismo Palacio, da las alturas de las bodegas:

«para la primera³¹, contando desde la quilla hasta lo alto, se asientan unos tablones gruesos, por la parte de dentro que llaman durmientes: y sobre estos se ponen y asientan ciertos maderos algo gruesos, que llaman baos: y estos hacen la primera división, y han de estar en quatro codos y medio de puntal, que es la altura de tres pipas³². La segunda, que llaman primera cubierta, se forma y haze de la mesma manera: estará esta en tres codos de los dichos baos, que es la altura que han menester dos pipas. La segunda, y que llaman la puente y es la tercera división, tendrá otros tres codos, y todos harán diez y medio, y occupara el grueso de los baos: y hasta las dos cubiertas serán onze, sin otros tres que se han de añadir, si la nao uviere de llevar xareta, como queda dicho: que es sobre la cual se marearan las velas, y gobiernan los mareantes: y debaxo della, están los pasajeros, o gente de guerra» (pág. 90v)

La forma de cálculo de las toneladas de carga (400 según el propio Palacio) a partir de las alturas de las bodegas es desconocida “dada la considerable diferencia de pipas que se observa entre una y otra de ellas”³³. Lo que sí parece claro es que en los contratos de construcción del País Vasco durante el siglo XVI existen muy pocos buques de dimensiones comprendidas entre 300 y 400 toneladas, lo que podría ser debido al salto necesario para estibar una tongada más de barricas, manteniendo las proporciones.³⁴

²⁸ Escalante de Mendoza ya lo aclaraba: “(...) el tamaño y medida de una tonelada de las que nosotros usamos son dos pipas de vino de las de a veintisiete arrobas y media (...)”. (Escalante de Mendoza, 1575, pág. 29r)

²⁹ El codo castellano equivalía a $\frac{2}{3}$ de vara castellana o 32 dedos, unos 56 cm (Casado Soto, 1988, pag. 60)

³⁰ No es objeto de este trabajo profundizar en los sistemas de arqueo vigentes a finales del siglo XVI, tema que ya ha sido objeto de numerosos estudios.

³¹ En este caso se trata de la bodega, tal como aclara más adelante.

³² Una pipa sevillana de las de arqueo , de 27 $\frac{1}{2}$ arrobas, media dos codos y medio de alto por uno y medio de diámetro por lo más ancho.

³³ Casado Soto J. , 1988, Pág. 80

³⁴ Loewen, L'archéologie d'un baleiner basque du XVIe siècle, concepts et questions, Vol 3, pág. 7

Obtenemos, así los datos de partida para el diseño de la nao: quilla (34 codos), manga (16 codos)³⁵ y puntal³⁶ desde la cara alta de la quilla a la cubierta principal (segunda) 11 ½ codos.

A continuación da los lanzamientos con lo que queda determinada la eslora en la cubierta:

« y lançando como han de lançar: la roda de popa 5 codos, y dos tercios, que es el sesmo de la quilla, y la roda de la proa lançara doblado que la de la popa, con la cual vendrá a tener de roda a roda 51 codos, y un tercio de largo» (pág. 92r)

La medida de la eslora junto con la longitud de la quilla y la manga determinan los parámetros básicos de las proporciones de la regla As, Dos, Tres, según la cual por cada codo de manga se daban dos de quilla y tres de eslora. Si bien la regla no se cumple con rigurosidad (las medidas 51 1/3 – 34 – 16 resultan en proporción 3,2 – 2,125 -1)

Determina las medidas que componen el espejo de popa:

«y por que con el altor de popa y proa, aya proporción ygual, se assentaran las aletas, que son las que forman la frente de popa, sobre el codaste en la altura dlos dichos 6 codos, y dos tercios, y a estas se le darán 12 codos de altura que con los 6 y dos tercios, serán 18 y dos tercios: » (pág. 92r)

Establece la altura de la roda:

«y al mesmo altor que queda assentado el dragante, se assentara la roda de proa, para que quede en el peso que conviene, y en buena proporción, y sobre ella la madre del espolón» (pág. 92r)

A continuación da la posición de la maestra³⁷ y la forma de fabricarla:

« y porque en el asiento de los maderos de quenta, se tome el punto mas cierto, conviene tomar el medio de la quilla, y dos codos más adelante, y tomada, allí se assentara el primer madero de quenta, el cual es formado de un palo que llaman estamenara, y dos barraganetes, a manera de un medio círculo, al cual se ha de dar 5 codos y un tercio del plan de la nao, que es la tercia que abre de sus 16 codos» (pág. 92v)

Como vemos, continúa relacionando las distintas medidas con la principal y así el plan es 5 1/3 codos correspondientes a 1/3 de la manga y que se emplea un círculo para trazar la cuaderna maestra.

La primera cuestión que se plantea es la altura a la que se sitúa la manga, ya que el autor no la especifica. Eric Rieth trabajó en un modelo en madera de la nao de 400 toneladas con desigual fortuna³⁸. En su trabajo establece la altura de la manga máxima en la primera cubierta a partir del dibujo del propio G. de Palacio:

«le texte ne précise pas de quelle largeur il s'agit. La figure de la coupe transversale de la maîtresse-section permet de constater que la largeur (manga) considérée par Palacio se situe au niveau du second pont»³⁹

Por su parte José L. Rubio Serrano en su dibujo de la nao de Palacio⁴⁰ estima, de la misma forma, que la manga máxima se sitúa a 7 ½ codos de la quilla aunque dibuja la primera cubierta 1 codo por encima.

³⁵ No especifica la altura en la que la nao alcanza esa manga que suponemos es la máxima en la maestra. Obtendremos la altura al trazar el gálibo de la sección maestra con un círculo, más adelante

³⁶ La definición que el mismo Palacio establece para puntal vista anteriormente, concuerda con la medida que da al tratar de las cintas y con la magnitud inicial del texto, por lo que será ésta la que emplearemos en nuestro trazado.

³⁷ A la maestra la nombra como “primer madero de quenta”

³⁸ Rieth, Essai de restitution d'un bâtiment de 400 toneladas, d'après Diego García de Palacio (1587), 1988

³⁹ Rieth, Essai de restitution d'un bâtiment de 400 toneladas, d'après Diego García de Palacio (1587), 1988, pág 467

Supondremos que la manga máxima está situada a una altura de $7 \frac{1}{2}$ codos, que coincide con la primera cubierta. Dado que el plan es de $5 \frac{1}{3}$ codos, el centro de la circunferencia que describe el genol está prácticamente situado en el eje de la cuaderna maestra.

Palacio no especifica la forma del trazado de la cuaderna por encima de la primera cubierta. Si nos guiamos por el dibujo de la página 94r, deberíamos trazar una curva de radio externo de tal forma que la manga en la cubierta superior fuera casi igual a la máxima y algo mayor en la batayola. Por su parte Rubio Serrano traza una recta desde el nivel de la primera cubierta hasta la cubierta principal, disminuyendo la manga, que luego prolonga con una recta vertical sin acotar la manga resultante, que del dibujo se mide en 15 codos. Rieth traza una recta prácticamente vertical desde el nivel de la primera cubierta si bien la forma desde el plan hasta ésta no sigue una circunferencia tal como establece Palacio.

Trazaremos un arco de circunferencia desde el punto de manga máxima en la primera cubierta hasta otro de manga 15 codos en la cubierta superior con un radio de 32 codos que de cierta continuidad a la unión. En cualquier caso la forma de la nao por encima de la primera cubierta es meramente especulativa y cualquier propuesta es igualmente válida.

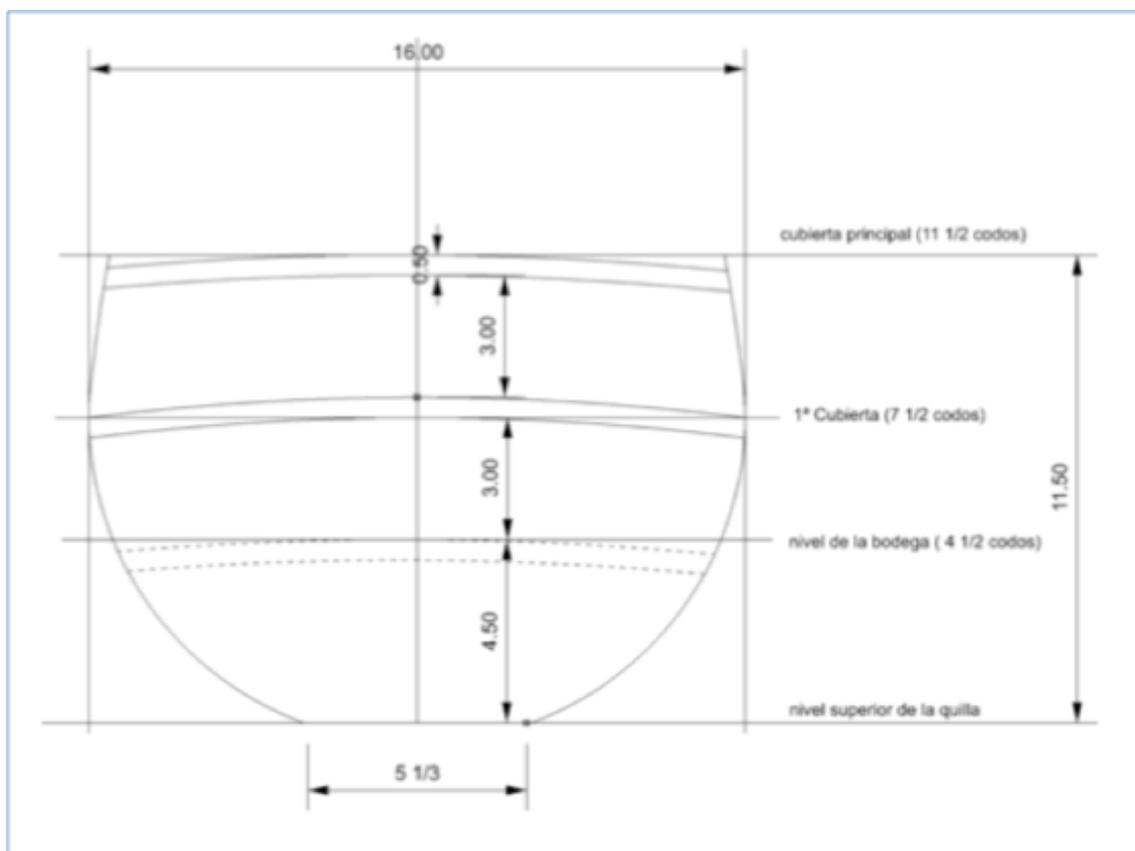


Ilustración 3. Propuesta de sección de maestra de la nao de 400 toneladas. Fuente: elaboración propia. Medidas en codos castellanos.

La posición de la maestra en la quilla está perfectamente determinada en el texto:

«conviene tomar el medio de la quilla, y dos codos más adelante» (pág. 92v)

⁴⁰ Rubio Serrano, 1991, pág. 144

En cuanto a la posición del redel de proa queda determinado por el comienzo de los delgados y su puja⁴¹:

«y los delgados de la proa, que comiencen 9 maderos delante del primero de quenta y que acaven en la roda, algo enharcados» (pág. 92r)

«y tendrá de astilla que es el pie que comienza a formar los delgados de proa, codo y medio» (pág. 92v)

Para estimar la posición debemos conocer el escantillón de las cuadernas que Palacio no da. Una hipótesis factible es suponer que el grueso a la línea de las varengas y ligazones era de ½ codo de manera que lo que el autor denomina “madero” que es el conjunto varenga-genol tendría un codo de grueso a la línea⁴². Esto supone que “nueve maderos delante” equivalen a 9 codos. La “astilla” equivale a la puja del plan que en el redel de proa es de 1,5 codos.

La posición del redel de popa y su puja:

«que desde el primer madero de quenta de nuestra nao 6 maderos a popa, comiencen los delgados del rasel, y que acaben algo enharcados en el codaste, y en 6 codos, y dos tercios de altura, que es el quinto de la quilla» (pág. 92r)

«y el postrero madero de quenta de popa, se assentara a los 20 maderos, desde el primero de quenta, en la mitad de la quilla, desde el pie del mástil al codaste: y tendrá este de astilla dos codos y medio, y de manga 14» (pág. 92v).

Se plantea en este momento la cuestión de la concordancia entre los redeles (últimos maderos de cuenta o almogamas) y los finos⁴³. Algunos autores interpretan que los redeles coincidían con el comienzo de los finos tanto a proa como a popa⁴⁴. Sin embargo los estudiosos de la construcción naval portuguesa de finales del siglo XVI como Pimentel Barata⁴⁵ interpretan que a finales de siglo apareció una simplificación de la técnica de calcular las cuadernas de cuenta según la cual se redujo su número (Lavanha⁴⁶ en 1608 solo prescribe 10 maderas de cuenta, mientras que en la nao de Oliveira en 1570 aparecen 36). Esta reducción de maderas “prediseñadas” implicaba que el fondo no terminara en las almogamas por lo que la definición más adecuada para éstas sería las de que son las últimas cuadernas “prediseñadas” del fondo.

En el caso de la nao de Palacio, el texto nos indica que los delgados de popa comienzan antes de llegar al redel (6 maderos a popa del primer madero de cuenta) que se sitúa a 20 maderos a popa. No sucede lo mismo en proa dado que Palacio únicamente especifica el comienzo de los delgados (9 maderos delante del primero de cuenta) y refiere la astilla a esa misma posición (“el pie que comienza a formar los delgados”). Se entiende que en este caso el redel (al que se refiere la astilla) está situado donde comienzan los delgados. Sin embargo al estar la maestra situada a 17 codos del extremo de popa de la quilla (2 codos por delante del punto central) resultaría que el redel cae fuera de la quilla⁴⁷ lo cual es completamente imposible.

Caben dos posibles soluciones a esta situación anómala. Una primera sería suponer que ambos redeles se encuentran a la misma distancia de la maestra, igualando la distancia del

⁴¹ Puja es como se denominaba la medida de aumento de la astilla en los redeles.

⁴² Rieth así lo supone, según él, “extraído de los datos escritos” aunque no da más detalles. En cualquier caso es habitual que el ancho a la grúa sea un número entero de la medida básica (el codo o el palmo) (Rieth, *Essai de restitution d'un bâtiment de 400 toneladas, d'après Diego García de Palacio (1587)*, 1988, pág. 474). Lo mismo hace Rubio Serrano (Rubio Serrano, 1991, vol I, pág. 122)

⁴³ Se emplea con el mismo significado de “delgado”

⁴⁴ Rubio Serrano, 1991, pág. 117

⁴⁵ Pimentel Barata J. , 1989, vol I, pág. 191

⁴⁶ (Lavanha, 1608)

⁴⁷ Siempre que se cumpla lo anteriormente expuesto en relación al grueso a la línea del par varenga-genol.

redel de proa (9 codos) con el de popa. Otra solución es buscar la sección de los finos de popa donde la astilla corresponda a los 2 ½ codos que indica el texto de Palacio

También sería posible que en la medida que da Palacio de los “20 maderos a popa del primero de cuenta” estuviera tomada desde el redel de proa con lo que el de popa estaría situado aproximadamente en la posición marcada como “redel-2” en el dibujo, a 20 codos de popa del redel de proa. Como primera aproximación tomaremos esta posición para el redel de popa adelantándolo de forma que la distancia entre los dos redeles sea de 20 codos. Según esta hipótesis el cuerpo central de la nao estaría formada por 21 maderos (11 cuadernas y 10 claras)⁴⁸

Otro dato importante es que establece la manga en el redel de popa (14 codos) pero no así con el de proa. Sin embargo dicha manga de 14 codos no se corresponde con ninguna de las dos secciones que dibuja junto con la maestra en la página 94r (ver Ilustración 5) ya que la sección de popa ronda los 12 codos de manga, mientras que la de proa llega a los 14 si medimos sobre el dibujo dando por buena la escala de la manga en la sección maestra de 16 codos. Esto corrobora la inexactitud de los dibujos del libro que al ser grabados sobre una plancha de madera, para su impresión era golpeada por la parte posterior lo que daba como resultado serias deformaciones. E. Rieth ⁴⁹estudió las diferencias en las medidas tomadas sobre los dibujos obteniendo una variación media del 6% sobre la unidad de medida (el codo).

Palacio no menciona ningún procedimiento para obtener el plan y la puja de las maderas de cuenta y, mucho menos, cualquier referencia a la joba u otro procedimiento similar. Una primera forma de estimar el plan en los redeles nos la proporcionan los dibujos de las dos secciones de proa y popa de la página 94r considerando las medidas con mucha cautela por lo explicado anteriormente relativo a estas figuras.

Tomando como medida del plan 4 codos en el redel de proa y 3 en el de popa, resultan las siguientes formas para los redeles:

⁴⁸ Rubio Serrano estima 13 maderos y 12 claras. (Rubio Serrano, 1991, vl I, Pág. 122)

⁴⁹ Rieth, Essai de restitution d'un bâtiment de 400 toneladas, d'après Diego García de Palacio (1587), 1988, pág. 473

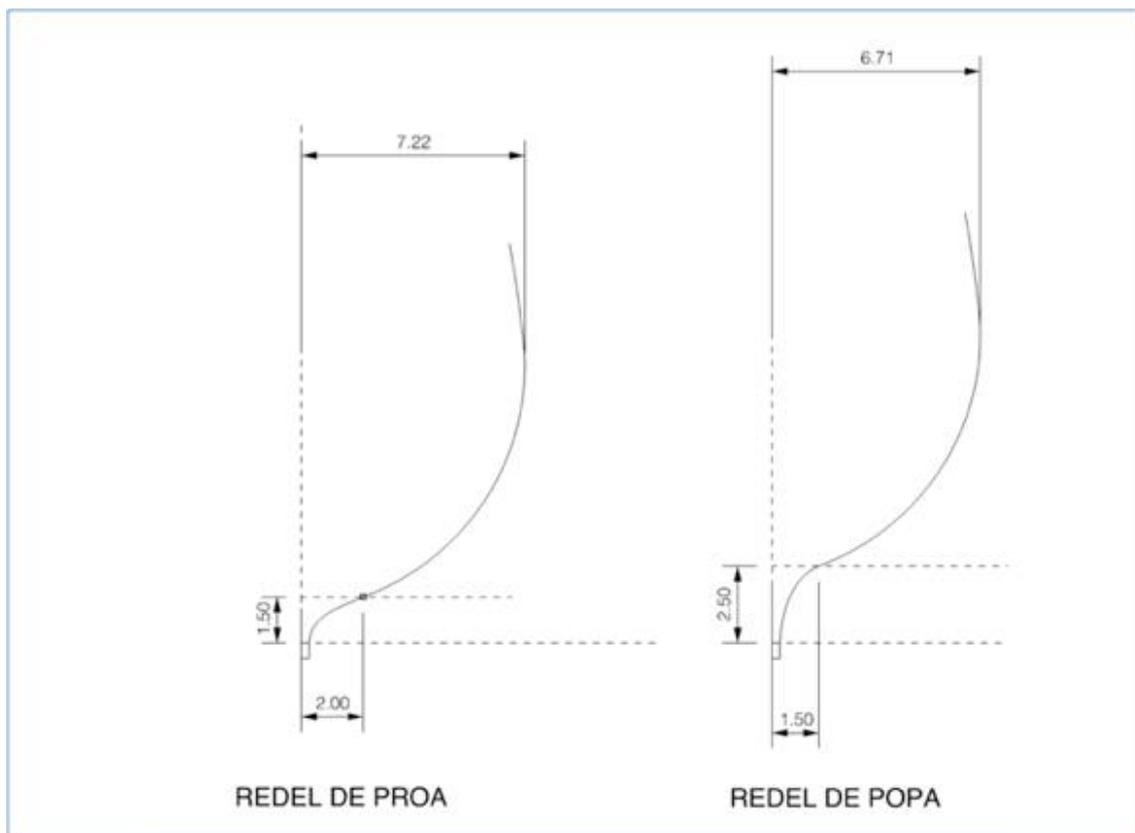


Ilustración 4. Trazado de redeles. Fuente: elaboración propia

Como se observa en la figura, las pujas (o astillas) se corresponden con el texto de Palacio y las mangas obtenidas en los redeles con el mismo gálibo de la maestra son congruentes con las cifras que hemos obtenido previamente de los dibujos originales. Se confirma así que los 14 codos de manga indicados por el autor corresponde al redel de proa y no al de popa tal como él mismo quería indicar en sus dibujos.

La altura del espejo de popa la obtenemos a partir de la altura de las aletas:

«y por que con el altor de popa y proa, aya proporción yqual, se assentaran las aletas, que son las que forman la frente de popa, sobre el codaste en la altura dlos dichos 6 codos, y dos tercios, y a estas se le darán 12 codos de altura que con los 6 y dos tercios, serán 18 y dos tercios » (pág. 92r)

Nos queda por conocer cual es la manga en el espejo (determinada por el yugo⁵⁰) y su trazado. Siguiendo con el texto, Palacio describe la posición del “dragante” de la siguiente forma:

«y en esta altura se assentara el dragante, que vendrá a ser de 7 codos, y dos tercios, que es casi la mitad que la nao tiene de manga, y al mesmo altor que queda assentado el dragante , se assentara la roda de proa, para que quede en el peso que conviene, y en buena proporción, y sobre ella la madre del espolón (...)» (pág 92r)

El mismo Palacio en el vocabulario del final del libro define “dragante” como:

«un trozo de madero grueso, fixo en el espolón de babor a estribor, con dos tohinos, o tacos de palo a los lados que lo forman, y hacen hueco donde encaxa, y asienta el bauprés y descansa» (Pág. 141 r)

⁵⁰ “Cada uno de los maderos de diversas dimensiones que cruzan el codaste y en él se endentan para formar la popa”. (Lorenzo, Murga, & Ferreiro, 1865)

Esta definición coincide con la que da el Diccionario Marítimo de O'Scanlan⁵¹, sin embargo el mismo diccionario traduce el término yugo en italiano como "tragante" lo que ha dado pie a que algunos autores lo interpreten como una influencia italiana en la construcción naval española que derivó al término "dragante"⁵². Contente Domingues⁵³, en su vocabulario técnico lo traduce como "el yugo en las galeras". Traducción que lo confirma C. Hormaechea y otros : " En las galeras el dragante era un madero transversal que se situaba adosado a la parte alta del codaste o roda de popa y que servía de apoyo a la estructura de la carroza"⁵⁴. Por todo lo expuesto, y dado que la longitud del "dragante" próxima a la mitad de la manga máxima es coherente con las posibles medidas del yugo, nos tomaremos la licencia de considerarlo como tal.

Esto nos permite trazar el espejo de popa con una buena aproximación. Las aletas las dibujamos con la hipótesis de que su forma se obtuviera de con igual radio que el gálbo de la maestra (8 codos) si bien el autor no da indicaciones de los mismos, parece razonable pensar que así fuera. Tampoco las encontraremos en Tomé Cano y deberemos acudir a las Ordenanzas de 1613 en las que se facilitan algunos puntos para su trazado. Anteriormente, J.B. Lavanha da con exactitud las medidas para obtener los círculos de las aletas si bien la proporción de la nao portuguesa no es extrapolable a la de Palacio al tener aquélla más delgado en el codaste.

El texto continúa dando las posiciones de las tres cintas «que la tomen y ciñan desde popa a proa» dando las alturas en el medio, desde 10 codos de puntal hasta 16 codos en las rodas de popa y proa para la primera y un codo más para la segunda y tercera:

«y en esta mayor altura quedara assentada la cubierta principal que se llama puente, y estará en 11 codos y medio de puntal, según nuestra cuenta⁵⁵» (pág. 92v).

En las páginas siguientes (93v y 94r) el autor incluye unas figuras, tal como él mismo explica:

«Y porque la cuenta y medidas por el objeto se entiendan mejor, hare la figura siguiente del cuerpo de la nao, en rosca: y con las medidas de la manga, en tres posiciones, para mayor claridad» (pág. 93r)

⁵¹ (O'Scanlan, 1831)

⁵² Laanela, 2008, pág. 93

⁵³ Contente Domingues, 2004, pág. 310

⁵⁴ Hormaechea, Rivera, & Derqui, Los galeones españoles del siglo XVII, pág. 295

⁵⁵ La cuenta en este caso sale distinta de la que ya ha hecho anteriormente al referirse a las alturas de las cubiertas. Entonces el total era de 11 codos y no 11 ½ codos como dice ahora. La diferencia podría atribuirse a una distinta medida del grueso de baos que sería de ¼ de codo en el primer caso y de ½ codo en el segundo.

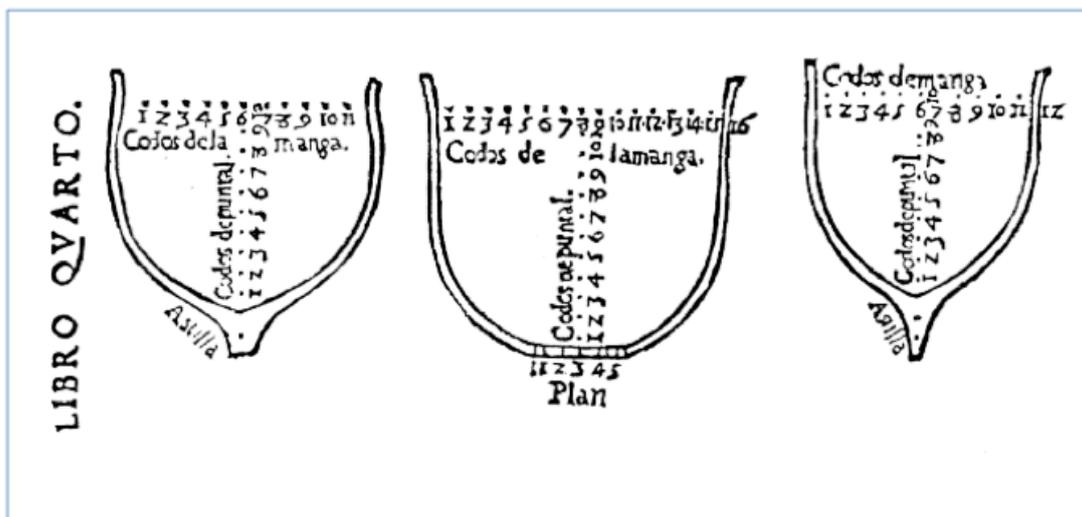
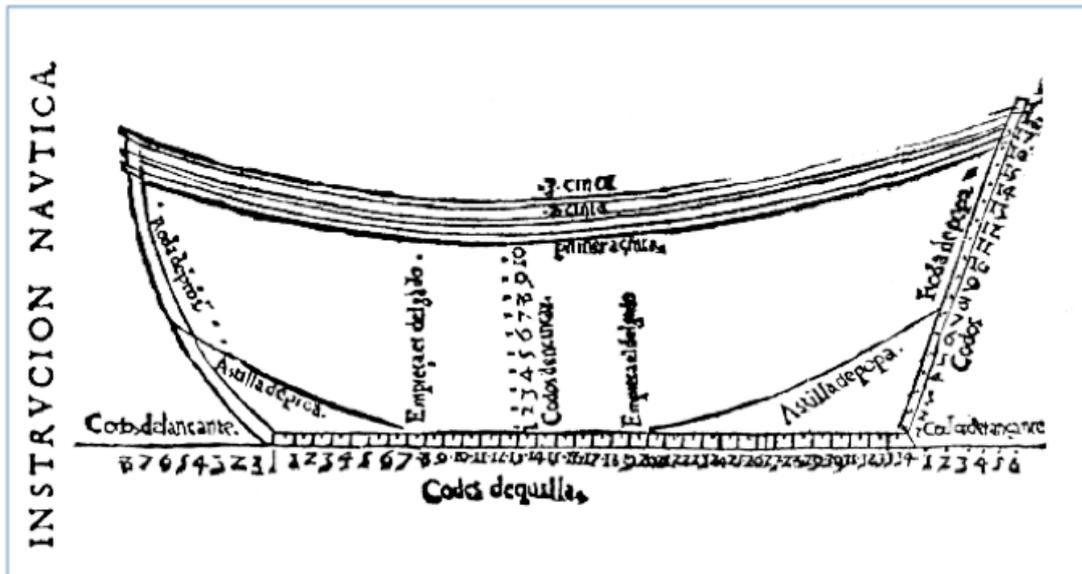


Ilustración 5. Nao de 400 toneladas. Fuente: "Instrucción náutica" (1587)

Continúa dando las medidas de los mástiles y jarcias de la nao de 400 toneladas, que no detallaremos por quedar fuera del alcance de este trabajo.

Seguidamente Palacio califica la nao de 150 toneladas como tamaño medio de referencia, sin embargo, por algún motivo que se desconoce, el autor no detalla en el texto las proporciones, limitándose a incluir tres figuras de la nao en las páginas 96 y 97.

«Pondrase en la hoja siguiente, la traça del navio menor, y proseguirse ha todo lo demás deste libro, correspondiendo a la nao primera: pues por ella se podrá disminuir, y hazer la quenta cierta, para los masteles, entenas, gavias, xarcia y demás aparejos que tuviere necesidad, con la buena discreción del maestro, a cuya determinación se han de quedar muchas cosas que por huyr prolixidad no se pueden decir en esta figura, y porque son comunes a los oficiales de este arte.» (pág. 95r y 95v)

Es destacable la inclusión en el caso de la nao de 150 toneladas, de una figura en la que aparece una planta en la que se indican las posiciones de tres secciones, eslora, y lanzamientos. Las secciones de los extremos no están equidistantemente situadas respecto de la central, que podría interpretarse como la maestra, aunque en ella no se sitúa la manga

máxima. Curiosamente algunos de los textos están invertidos probablemente por un error tipográfico.

El libro continúa con los detalles de las vergas y gavias (capítulo III), jarcias y aparejos (capítulo IV-IX), las velas (capítulos X-XIII), la chalupa y batel (capítulo XIV), bombas y bastimentos, anclas, cables y breas (capítulos XV-XIX).

En los capítulos XX a XXXII describe las labores de los diferentes puestos a bordo desde el capitán hasta los pajes. Los capítulos finales (XXXIII a XXXV) los emplea en relatar las funciones de la nao de guerra. Finalmente Palacio incluye en su libro un vocabulario “de los nombres que vi a la gente de la mar, en todo lo que pertenesce a su arte, por el orden alphabetico”.

5. Reconstrucción de la nao de 400 toneladas

A partir de los datos extraídos del texto y las figuras de García de Palacio trazamos las secciones y el perfil sobre los que apoyamos tres líneas longitudinales: una situada al nivel de la cubierta puente, otra que se corresponde con los puntos de escoa del plan de la maestra y los redeles finalizando en la roda y el codaste a la altura de los finos y una tercera intermedia a la altura de la unión de las ligazones. Estas tres líneas copian las tres posibles posiciones de las vagras que empleaban los constructores navales para trazar los extremos de popa y proa de la nao.

La indefinición de la carena en el espacio comprendido entre los redeles y la roda y codaste nos obliga a ser imaginativos a la hora de dar forma a las curvas que los determinan, en este sentido, y a la vista de las representaciones de las naos de la época, sabemos que las embarcaciones de gran porte poseían un volumen generoso en el tercio de proa⁵⁶, es decir, las líneas deben entrar en la roda casi con tangente perpendicular al eje de crujía de forma que generen secciones “poderosas” en esta parte de la carena.

⁵⁶ “Sin embargo, en 1691, Garrote criticaba las prácticas de su época y postulaba un semicírculo, con objeto de que la proa tuviese suficiente sustento en las cabezadas y no rindiesen los palos”. (Hormaechea, Rivera, & Derqui, Tomo II, pág. 178)

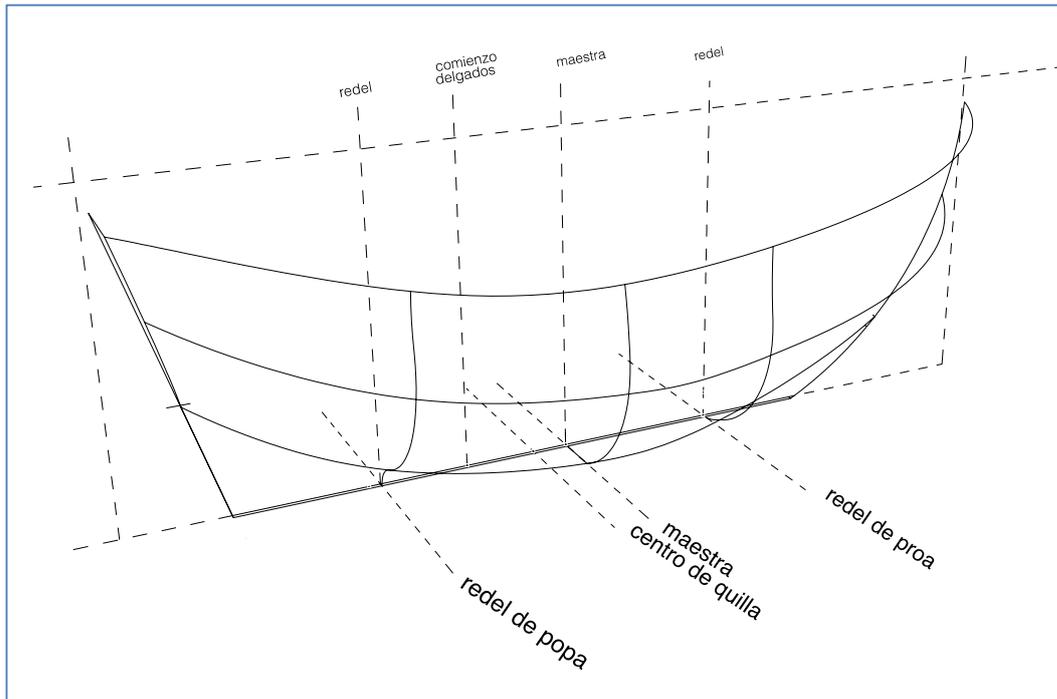


Ilustración 6. Líneas de definición de la carena de la nao de 400 toneladas. Fuente: elaboración propia.

Estamos, por tanto, en condiciones de trazar la superficie de la carena delimitada por quilla, roda, codaste, espejo de popa, maestra y redeles.

Para ello procederemos generando tres superficies entre las líneas anteriormente dibujadas, que luego uniremos. De esta forma garantizamos que prevalezca la transición de la curva del costado, generada a partir de arcos de circunferencia, y la línea de pantoque evitando un redondeo en la unión que escondería la intención original del constructor.

Las dos superficies generadas, están “gobernadas” por las cinco secciones “transversales” principales del buque, es decir, el contorno del espejo de popa, la sección maestra, los redeles y el perfil de la roda. Previamente hemos considerado el grosor de la quilla que estimamos en $\frac{1}{2}$ codo en cuadrado.

El resultado obtenido una vez generadas las dos superficies y unidas entre sí y con el plano del espejo y el plano de la roda, se muestra a continuación

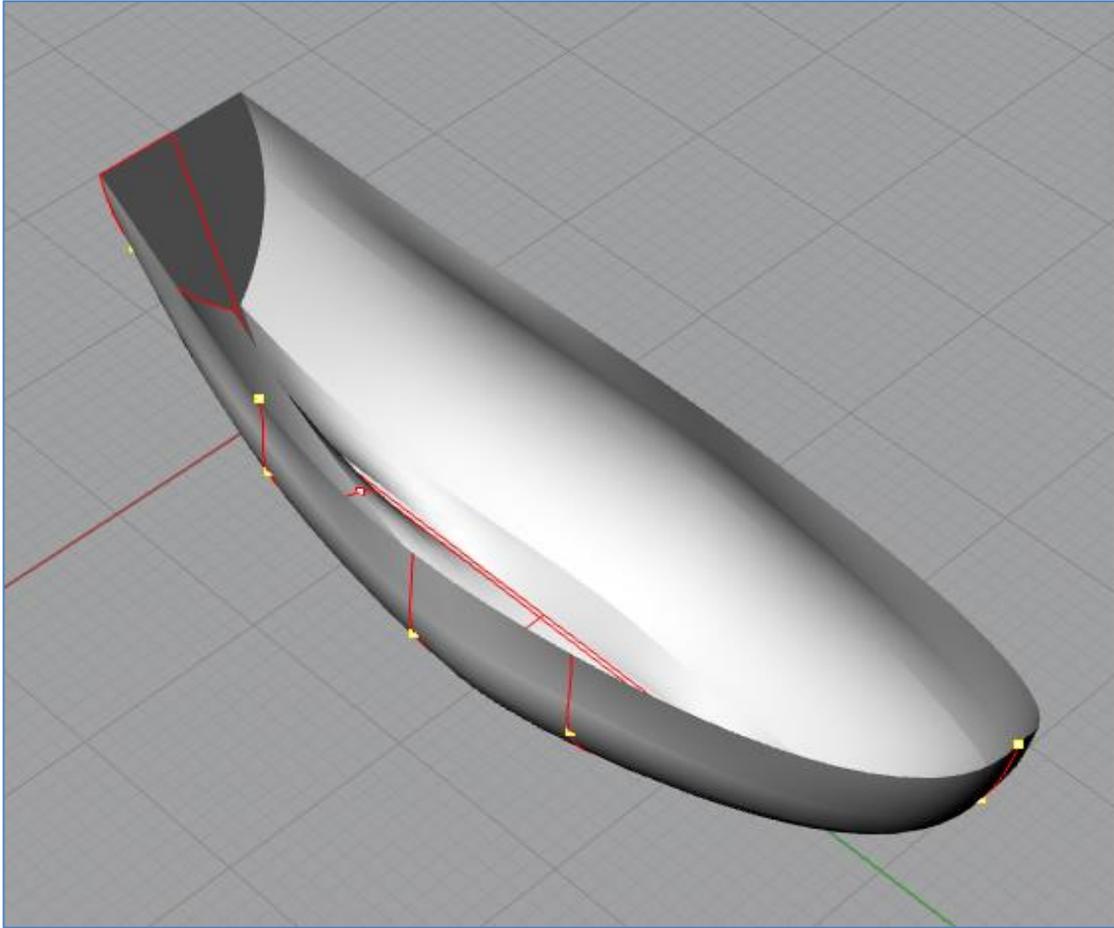


Ilustración 7. Imagen 3D de la carena generada. Fuente: elaboración propia.

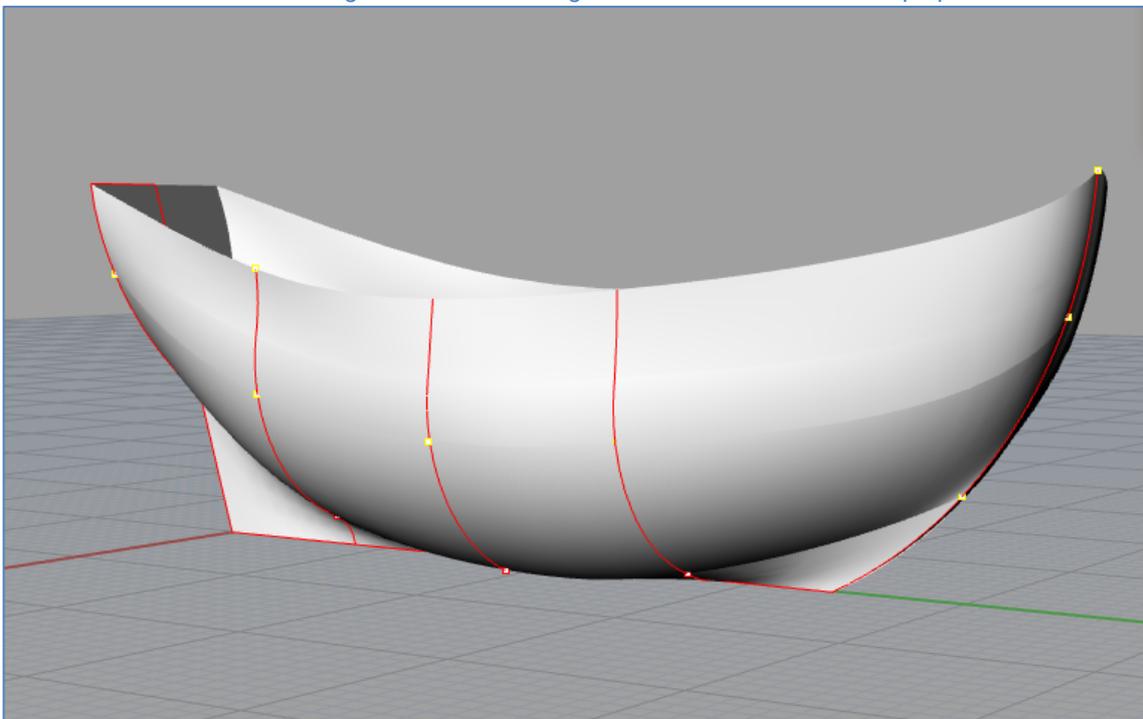


Ilustración 8. Imagen 3D de la carena generada. Fuente: elaboración propia

6. Análisis hidrostático

A partir de aquí disponemos de la superficie de la carena para su análisis hidrostático mediante software. Previamente habremos convertido las unidades del dibujo (desde un principio hemos trabajado en las unidades originales, codos castellanos) a unidades del sistema internacional de forma que los resultados sean comparables con los de otras naos similares.

Estimamos que la flotación está situada al mismo nivel de la manga máxima, $\frac{1}{2}$ codo más que la estimación que hace E. Rieth⁵⁷, es decir a $7 \frac{1}{2}$ codos por encima de la cara alta de la quilla, que hemos establecido como nivel de referencia. Al igual que Rieth supondremos la nao en flotación sin asiento. En la Ilustración 9 se observa como en este calado la nao moja ligeramente la parte baja del espejo de popa.

A partir de aquí, exportamos los datos de la superficie de la carena y los capturamos mediante el programa POLYCAD© de análisis hidrostáticos y de formas, obteniendo el siguiente resultado:

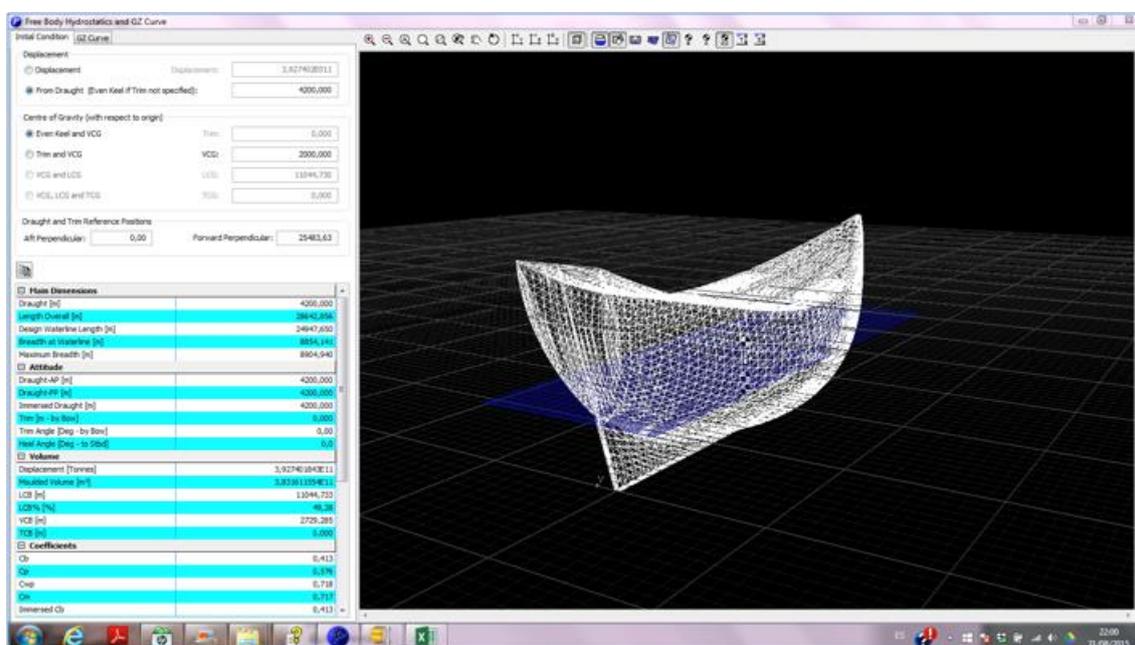


Ilustración 9. Captura de pantalla del programa de cálculo hidrostático donde se muestra la flotación a 7,5 codos. Fuente: elaboración propia

⁵⁷ Rieth establece el calado a partir de las representaciones de la época en las que se muestran las nao en navegación sin trimado y con el espejo de popa sumergido. (Rieth, 1988, pág. 478)

DIMENSIONES PRINCIPALES		COEFICIENTES		AREA	
Calado (m)	4,18	Cb	0,496	Superficie mojada (m ²)	274,27
Loa = Eslora total (m)	28,23	Cp	0,606	Área de la maestra	30,49
Lw = Eslora en flotación (m)	24,84	Cwp	0,760	ESTABILIDAD	-
Bw = Manga en flotación)	8,92	Cm	0,818	GMT [m]	0,75
Manga máxima (m)	8,92	Cb sumergido	0,491	GML [m]	12,80
TRIMADO		Cm sumergido	0,810	PARAMETROS	
Calado Proa (m)	4,18	AREA DE FLOTACION		Lw/Bw	2,79
Calado popa (m)	4,18	Superficie de flotación (m ²)	168,36	Lw/T	5,88
T Calado medio (m)	4,22	LCF (m)	11,08	Lw ² /(Bw*T)	16,38
VOLUMEN		LCF% [%]	49,73	Bw/T	2,11
Desplazamiento (T)	470,49	TPC (T)	0,00	Cws	2,57
Volumen sumergido (m ³)	459,02	MCT (T-m)	3,10	Cv = volumen de carena/Lw ³ (10 ⁻³)	29,96
LCB [m]	11,20	BMT [m]	1,75	Superficie mojada/volumen de carena ²⁰³	4,61
LCB% [%]	50,19	BML (m)	13,80	Circ M (L/vol ¹⁰³)	3,22
VCB [m]	2,55	KMT [m]	4,30	Desplazamiento/Eslora	16,66
TCB [m]	-	KML [m]	16,35	DLR	869,65

TCB (transverse center of buoyancy)
Cwp (Coeficiente de alineamiento de la flotación)
LCF [m] Longitudinal center of floatation
TPC (T) Rate of immersion
MCT (T-m) Moment to change trim

BMT (m) Transverse metacenter above center of buoyancy
BML [m] Longitudinal metacenter above center of buoyancy
KMT [m] Transverse metacenter above keel
KML [m] (Longitudinal metacenter above keel)
DLR=despl (longton)/(0,01*Lw)3

Ilustración 10. Cálculos hidrostáticos de la nao de 400 toneladas. Fuente: elaboración propia

Este tipo de análisis en embarcaciones antiguas no se prodiga entre los estudiosos de la historia y arqueología naval, por lo que, para encontrar datos con los que poder comparar los resultados de la nao de García de Palacio, debemos recurrir a las diversas fuentes⁵⁸:

- Urbieta (1450)⁵⁹. Embarcación ligera probablemente de navegación fluvial ayudada de remos.
- Nao de 17,5 rumbos de quilla de J.B. Lavanha (1608) y nao de 600 toneles de F. Oliveira (1570)⁶⁰. Ambas son naos de navegación oceánica para la ruta de Indias de Portugal.
- Yassiada (625), Bozburum (874), Serçe Limani (1025), Culip VI (c. 1300), Contarina I (c. 1300)⁶¹. Pecios mediterráneos de la Edad Media, de un solo mástil, a excepción del último de ellos que arbolaba dos velas latinas.
- Fragata Hebe (1782), fragata Bellona (1778), Coca de Lübeck (S. XV).⁶²
- Nossa Senhora dos Martires (1606)⁶³. Pecio portugués de una nao de India.
- Victory (1778), Greyhound (1780), Amsterdam (1750) y Batavia (1628)⁶⁴. Todos ellos navíos de combate

Si bien los buques representados pertenecen a muy distintas épocas y estaban destinados a realizar diferentes funciones, servirán para encajar desde el punto de vista de las formas la nao objeto de nuestro trabajo. Entre ellos el estudio del pecio “Nossa Senhora dos Martires” datado en 1606 es el que más se aproxima por sus características a la nao de finales del siglo XVI del texto de García de Palacio. Se trata de una *nao de India* de origen portugués, de gran porte, y cuyos restos han sido objeto de un exhaustivo trabajo de restitución por un equipo multidisciplinar del Centro de Engenharia e Tecnologia Naval de Lisboa y de la Universidad de

⁵⁸ Ordenados según fuente de la que sean extractado los datos. Entre paréntesis la antigüedad de la embarcación.

⁵⁹ (Rieth, L'epave d'Urbieta une embarcation a clin du millie du XV siecle., 2006)

⁶⁰ (Castro, Fonseca, Santos, & Vacas, 2010)

⁶¹ (Fonseca, 2006)

⁶² (Harries, Böndel, Geistert, & Hochkirch, 2000)

⁶³ (Fonseca & Santos)

⁶⁴ (Brown, 1998)

Texas A&M, encabezado por Filipe Viera do Castro. Sus formas siguen las instrucciones contenidas en el manuscrito de Manuel Fernández.⁶⁵

El escaso volumen de trabajos que abordan el estudio hidrostático de buques antiguos limitan el número de parámetros a la hora de realizar un estudio comparativo de las formas de la nao de García de Palacio, limitándonos, por ello, a aquellos más significativos. En la siguiente tabla se muestran los datos de las formas y coeficientes de estas embarcaciones junto con los obtenidos para la nao de 400 toneladas:

	García de Palacio	Yassiada	Bozburum	Serçe Limani	Culip VI	Contarina I	Urbietta	Coca de Lübeck	Oliveira
	1587	625	874	1025	1300	1300	1450	SXV	1570
Calado (m)	4,18	1,77	1,19	1,02	1,44	1,73	0,6	2,78	4,9
Loa = Eslora total (m)	28,23	20,52	14,3	14,55	16,35	20,98		29,6	28,96
Lw = Eslora en flotación (m)	24,84	17,2	12,2	12,94	12,81	18,37	10,04	24,56	
Bw = Manga en flotación)	8,92	4,6	4,74	4,64	3,88	5,17	2,55	7,73	12
Volumen sumergido (m ³)	459,02	72,45	38,92	38,33	39,80	103,53	6,5	194	
Cb	0,496	0,51	0,56	0,62	0,55	0,63	0,42	0,439	0,513
Cp	0,606	0,76	0,62	0,68	0,69	0,76		0,577	0,665
Cm	0,818	0,68	0,91	0,92	0,8	0,82		0,761	0,772
Lw/Bw	2,79	3,74	2,57	2,79	3,3	3,55	3,92	3,177	3,02
Lw/T	5,88	9,72	10,25	12,69	8,9	10,62	4,25	8,83	
Lw ² /(Bw*T)	16,38	36	26	35	29	38	65,88	28,07	
Bw/T	2,11	2,6	3,98	4,55	2,69	2,99	4,25	3,318	2,45
Cws=Ws/√Lw*Vol	2,57	2,54	2,81	2,78	2,7	2,61	2,97	2,94	
Cv = volumen de carena/Lw ³ (10 ⁻³)	29,96	14,24	21,43	17,69	18,94	16,70	6,42	13,1	
Circ M (L/vol ^{1/3})	3,22	4,13	3,60	3,84	3,75	3,91	5,38	4,24	

	García de Palacio	Nossa Senhora dos Martires	Lavanha	Batavia	Ansterdam	Bellona	Victory	Greyhound	Hebe
	1587	1606	1608	1628	1750	1778	1778	1780	1782
Calado (m)	4,18	5		4,66	4,45	5,17	6,40	4,19	5,69
Loa = Eslora total (m)	28,23	49,2	39,27			53,25			52,6
Lw = Eslora en flotación (m)	24,84	38,1		44,01	42,67	45,24	56,69	52,57	45,94
Bw = Manga en flotación)	8,92	13		10,45	11,49	11,88	15,97	10,12	12
Volumen sumergido (m ³)	459,02	1298		1.198,05	1.170,73	1178	3.404,88	1.132,68	1350
Cb	0,496	0,52	0,501	0,56	0,54	0,475	0,59	0,51	0,486
Cp	0,606		0,642	0,709	0,754	0,653	0,6	0,65	0,636
Cm	0,818		0,781	0,815	0,741	0,727	0,81	0,79	0,764
Lw/Bw	2,79	2,93	2,72	4,21	3,71	3,938	3,55	5,20	3,898
Lw/T	5,88	7,62		9,44	9,59	8,75	8,86	12,55	8,07
Lw ² /(Bw*T)	16,38	22,33		39,73	35,61	33,32	31,44	65,18	30,91
Bw/T	2,11	2,6	2,773	2,24	2,58	2,664	2,50	2,41	2,424
Cws	2,57	2,54		2,83	2,72	3,02	-	-	2,96
Cv = volumen de carena/Lw ³ (10 ⁻³)	29,96	23,47		14,06	15,07	11,5	18,69	7,80	13,9
Circ M (L/vol ^{1/3})	3,22	3,49		4,12	4,02	4,28	3,75	5,01	4,16

Ilustración 11. Tabla comparativa de coeficientes de forma de la nao de 400 toneladas con diversas embarcaciones del siglo VII al XVIII. Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de otros estudios

El coeficiente prismático de la nao de Palacio resulta ser el más bajo (0,576) a excepción de el de la coca de Lübeck del siglo XV, lo que nos da a entender que las formas de la nao de 400 toneladas se regían todavía por la regla As, Dos, Tres, del siglo anterior. Si lo comparamos con el obtenido por E. Rieth en el estudio anteriormente citado⁶⁶ (Cp=0,621) éste último es algo mayor dado que Rieth situó los redeles en el extremo de la quilla lo que genera unas formas más llenas. También hay que tener en cuenta que nosotros hemos generado la superficie de la carena a partir de superficies NURBs mientras que Rieth lo hizo mediante un modelo a escala fabricado en bloques de madera.

⁶⁵ (Fernández, 1616)

⁶⁶ Rieth, Essai de restitution d'un bâtiment de 400 toneladas, d'après Diego García de Palacio (1587), 1988, pág. 482

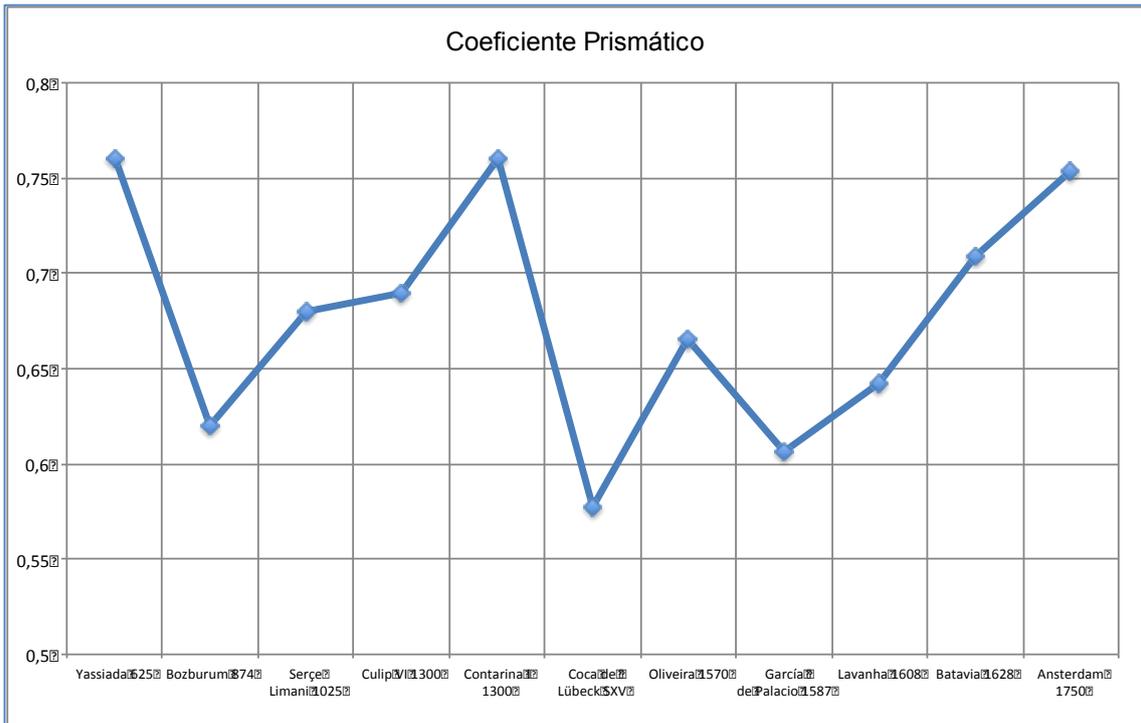


Ilustración 12. Evolución de los coeficientes prismáticos. Fuente: elaboración propia

Sin embargo el coeficiente de la maestra se mantiene en el rango de 0,75-0,85 que se corresponde con las embarcaciones de los siglos XIV al XVII. (Ilustración 13).

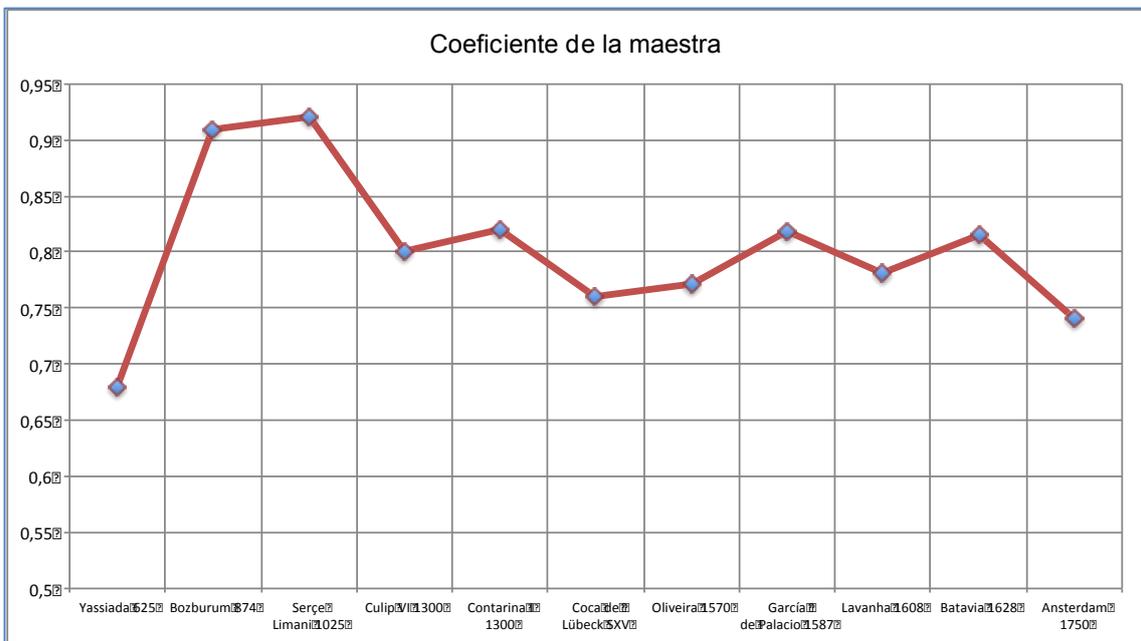


Ilustración 13. Evolución del coeficiente de la maestra. Fuente: elaboración propia

Analizando la curva de áreas se observa un ligero desplazamiento del volumen sumergido hacia el extremo de popa, manteniendo la manga máxima situada en el centro de la flotación coincidiendo con la posición de la cuaderna maestra. (Ilustración 14)

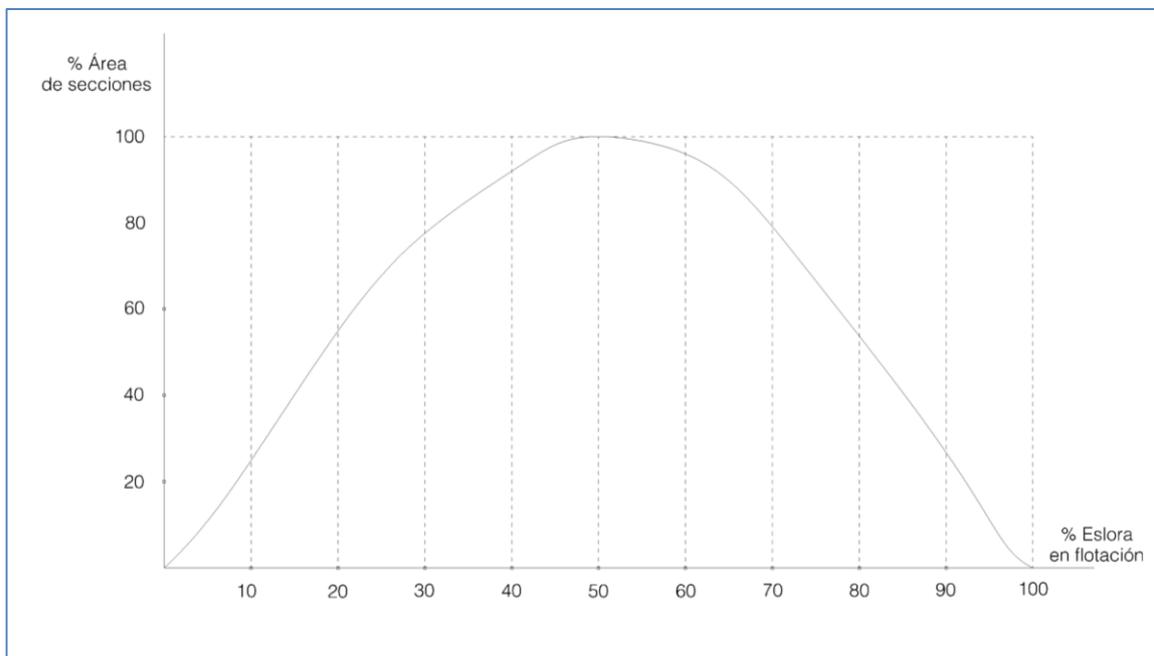


Ilustración 14. Curva de áreas de la nao de 400 toneladas. Fuente: elaboración propia

Finalmente se presenta una gráfica de la evolución de las proporciones Lw/Bw y Bw/t a lo largo de los años en la que se ha incluido los datos obtenidos para la nao de la Instrucción náutica.

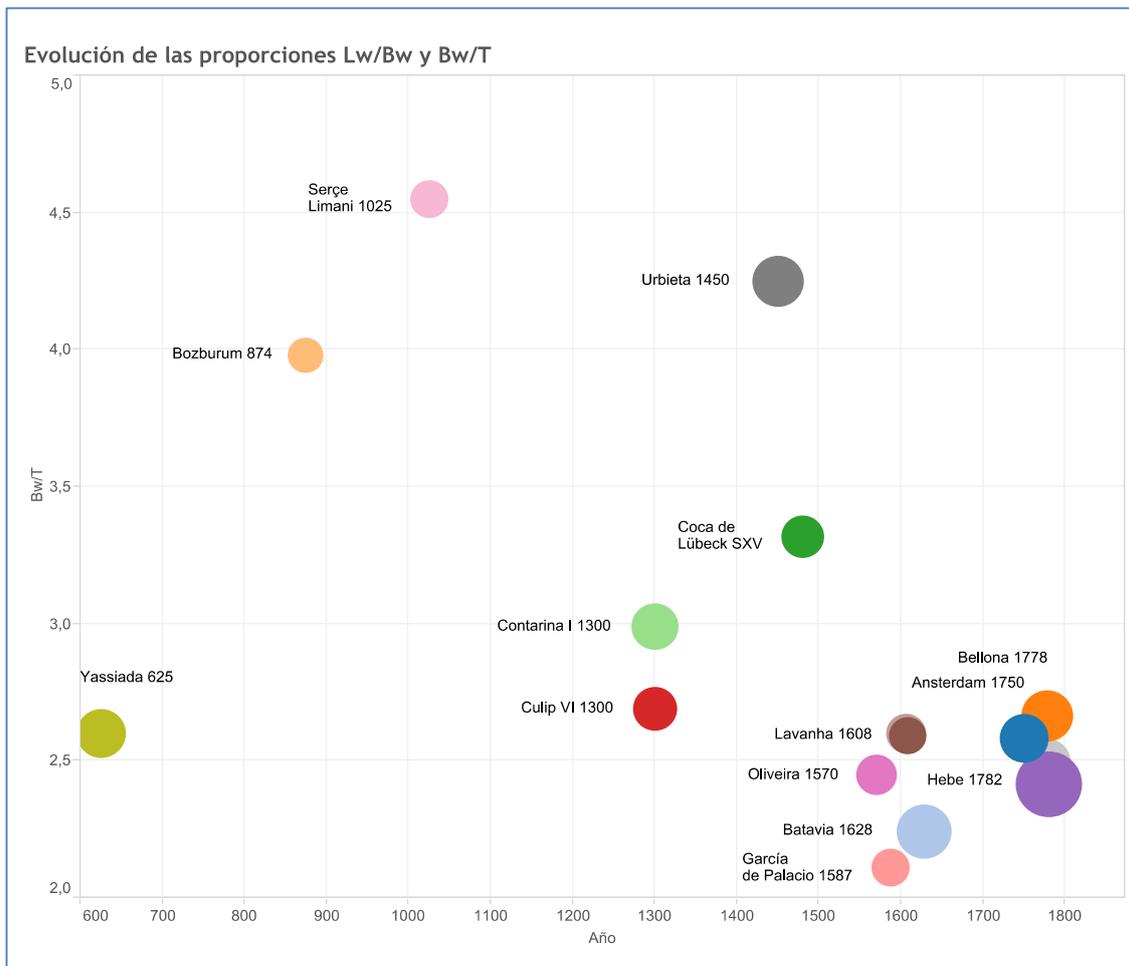


Ilustración 15. Evolución de B_w/T y L_w/B_w . Las dimensiones de los círculos son proporcionales a L_w/B_w . Fuente: elaboración propia

En ella se aprecia que la nao de García de Palacio se encuentra en el valor más bajo de relación B_w/T debido a sus proporciones. Los buques correspondientes al siglo XVI y XVII están situados en la parte más baja de B_w/T mientras que la relación L_w/B_w aumenta a medida que nos desplazamos en el tiempo al hacerse más esbeltos.

7. Comprobación del arqueo

Desde un principio, García de Palacio, establece la capacidad de carga de la nao en 400 toneladas. Cabría preguntarse si la nao que describe se corresponde realmente con ese tonelaje, para lo cual el modelo construido nos será de gran ayuda.

Como hemos visto en el texto, el autor determina las toneladas con las que mide la capacidad de carga de la nao identificándolas como el doble de la pipa de vino. La pipa de vino de 27,5 arrobas medía 2,5 codos de alto y 1,5 codos en lo más ancho (ver nota 32). La tonelada de carga andaluza equivalía a 8 codos cúbicos, es decir, a $1,38446 \text{ m}^3$ (ver nota 25), que, a su vez, tal como dice el mismo García de Palacio, equivalía a 2 pipas de vino.

Dibujando un modelo en 3D de la pipa, trazando el perfil mediante una curva b-spline que simula el comportamiento de un junquillo y, mediante aproximaciones sucesivas, obtenemos que con un diámetro de las bases de 1,32 codos, un diámetro en lo más ancho de 1,5 codos y

una altura de 2,5 codos el volumen encerrado 4 codos cúbicos (media tonelada de carga)⁶⁷. (ver Ilustración 16)

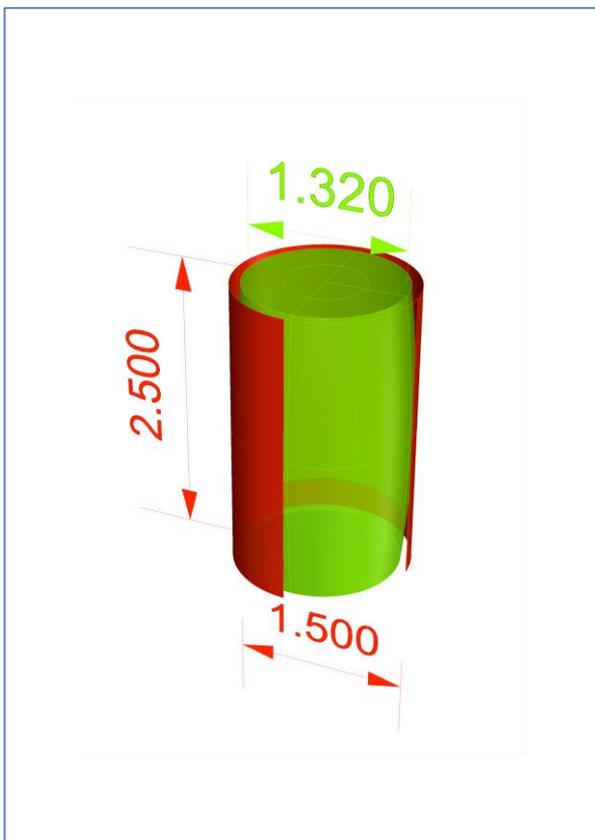


Ilustración 16. Aproximación a la figura de la pipa de vino de 4 codos cúbicos (en color verde). En rojo se representa el cilindro circunscrito de 1,5 x 2,5 codos. Fuente: elaboración propia.

Hasta la entrada en vigor de los reglamentos de arqueo éste consistía en medir físicamente el la capacidad de carga del navío viendo las pipas que cabían en cada una de las andanas y cubiertas. Este menester correspondía en la Casa de Contratación de las Indias a los visitantes o arruinadores, que eran los encargados con ello de evitar que se produjesen fraudes.⁶⁸

En los registros de AGI de visitas hechas a naos que partían para Indias en 1523 se cita que:

«(...) en la nao Santa María de la Insula, surta en el puerto de Muelas (...) entraron dentro en la nao y en presencia de mi, Juan de Heguivar, escribano de S.M. los sobredichos arquearon la dicha nao con arcos⁶⁹ de toneles e pipas». (Ms.1764 AMN)

, anotando en cada rumbo los toneles enteros y cuartos.⁷⁰ Por tanto el sistema originario era medir físicamente las pipas que cabían dentro del espacio reservado para ello en la nave.

⁶⁷ F. Castro propone una medida de la pipa de Castilla de 436 litros, lo que conduce a un tonel de 872 litros (Castro F. , 2013)

⁶⁸ Dueñas Fontán, 1996, p.16

⁶⁹ Un posible origen, no demostrado, de la palabra *arqueo* proviene del empleo de *arcos* por parte de los visitantes.

⁷⁰ F. Fernández González (comunicación personal)

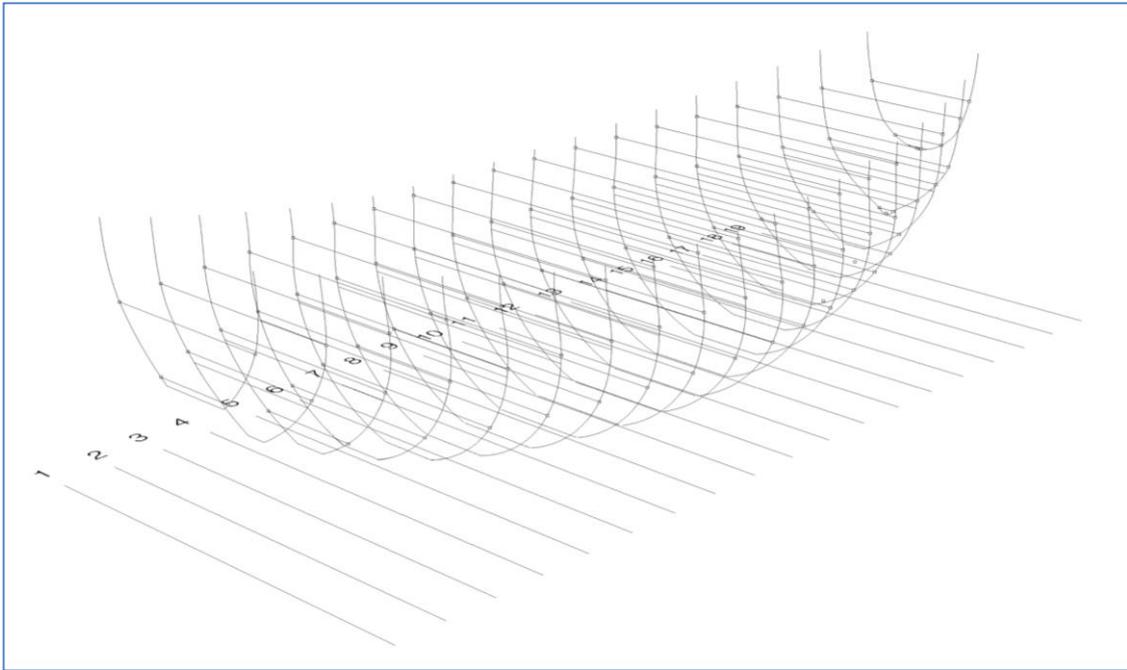


Ilustración 17. Secciones de arque separadas 2,5 codos. Fuente: elaboración propia

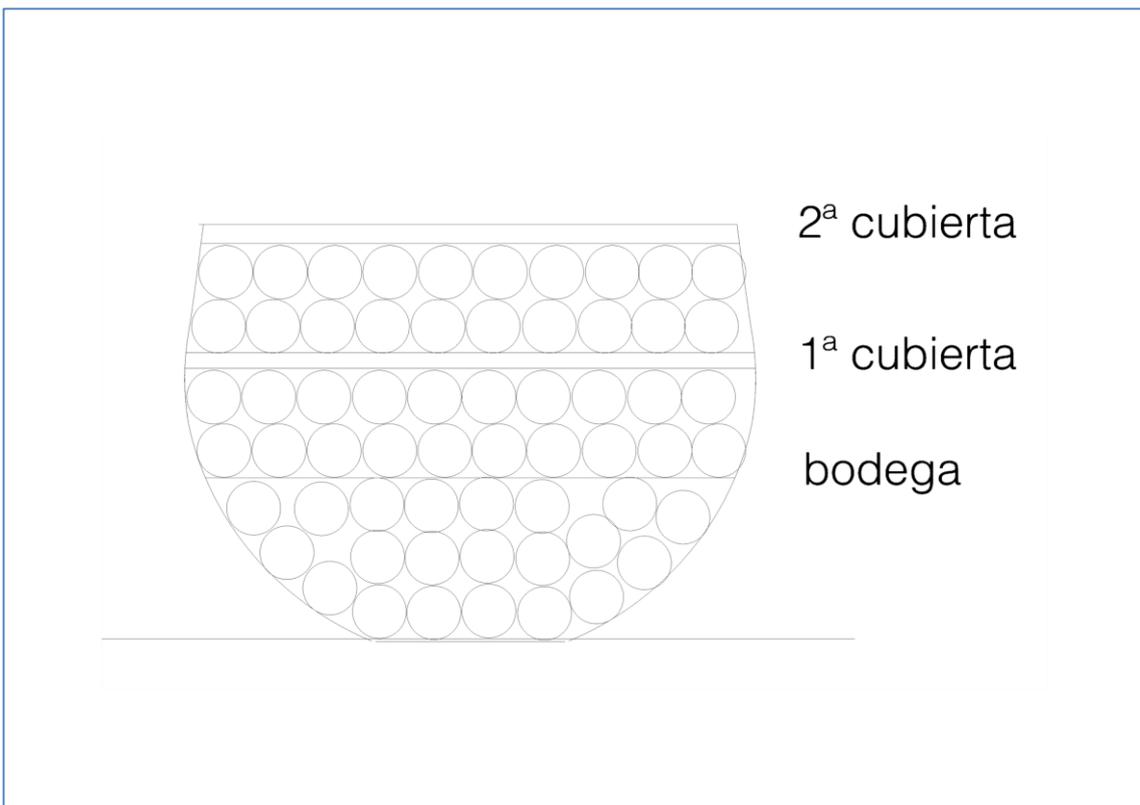


Ilustración 18. Sección media mostrando la disposición de pipas. Fuente: elaboración propia

El modelo de la superficie de la carena nos permite llevar a cabo una comprobación aproximada de las toneladas de flete reales de la nao. Para ello trazamos secciones de la carena separadas 2,5 codos (longitud de la pipa) (Ilustración 17) en las que hemos dibujado las

cubiertas y sobre cada una de ellas colocamos las pipas de radio 1,5 codos (Ilustración 18)⁷¹. A continuación, contamos el número de pipas por cada sección obteniendo los resultados que se muestran en la Ilustración 19. Si calculamos la mitad del número total de pipas obtenido (693) llegamos a una cifra de arqueo teórico de 346 toneladas de carga. Este procedimiento pretende simular las condiciones mediante las que los *arrumadores* realizaban la medición del arqueo, la cifra obtenida maximiza la real, puesto que no se han considerado los espesores de la estructura interna del navío.

NÚMERO DE PIPAS POR SECCIÓN Y CUBIERTA				
Sección	Bodega (baos vacíos)	1º cubierta	2º cubierta	Total
1			7	7
2		3	11	14
3		9	13	22
4	3	11	14	28
5	7	15	16	38
6	11	16	17	44
7	12	19	18	49
8	15	18	19	52
9	19	19	19	57
10	19	20	20	59
11	21	20	20	61
12	19	19	18	56
13	16	18	18	52
14	11	16	16	43
15	8	14	18	40
16	3	13	14	30
17	1	9	12	22
18		4	10	14
19			5	5
Total pipas	165	243	285	693

Ilustración 19. Tabla de capacidad de pipas por secciones. Fuente: elaboración propia

La fórmula de arqueo vigente en 1587 era la propuesta por Cristóbal de Barros según la cual las toneladas de arqueo se obtenían mediante la fórmula⁷²:

$$\text{Arqueo (toneles)} = \frac{E \times \frac{M}{2} \times P - 5\%}{8}$$

Todas las medidas, en codos, se toman en la misma cubierta:

E= eslora

M= Manga

P= Puntal medido en lo más ancho

⁷¹ Dado que García de Palacio considera hasta la segunda cubierta para la medición del puntal (11,5 codos) entendemos que la carga se estibaba en el espacio situado debajo de ella.

⁷² (Casado Soto, 1988, pág. 78). La disposición de 1590 inspirada por C. de Barros no daba la fórmula, citamos una de las dos versiones de la misma.

El factor de reducción del 5% equivale a la disminución por los finos de proa y popa y el divisor de 8 convierte los codos cúbicos en toneladas de carga.

Aplicando esta fórmula a la nao de Palacio con las medidas que hemos empleado para su trazado, es decir:

E= 51 codos

M= 16 codos

P= 7,5 codos,

obtenemos un arqueo de 363 toneladas⁷³, próximo al calculado colocando las pipas sobre las cubiertas, si bien hay que tener en cuenta que la fórmula utiliza un puntal de 7,5 codos mientras que nosotros hemos colocado pipas hasta un nivel de 11 codos (parte baja de la cubierta superior). La fórmula de arqueo a pesar de considerar el puntal en la cubierta inferior tiene en cuenta el espacio cerrado bajo la cubierta superior tal como hemos comprobado.

Sección	Bodega (baos vacíos)	1º cubierta	2º cubierta	Total
Volumen debajo (m ³)	205	263	377	845
Ratio pipas/m ³	0,805	0,924	0,756	0,820
% ocupación	86%	75%	92%	84%
Área (m ²)	134	175	185	
Ratio pipas/m ²	1,81	1,63	no soporta carga	

Ilustración 20. Tabla de ratio de ocupación de espacios. Fuente: elaboración propia.

Por otra parte calculamos los volúmenes comprendidos entre las cubiertas lo que nos permite obtener el ratio de ocupación de cada uno de los espacios tal como se muestra en la siguiente tabla (ver Ilustración 20) y observamos que hemos alcanzado un ratio medio del 84% de ocupación del espacio, a pesar de lo cual el número total de pipas de vino que, como máximo, podría cargar la nao es de algo menos de 700, lo que supone un arqueo (dos pipas de vino son una tonelada de carga) de menos de 350 toneladas y no las 400 que menciona Palacio en el texto.

8. Conclusiones

La nao de la *Instrucción náutica* de García de Palacio es un claro ejemplo de los navíos de finales del siglo XVI en los que se mantenían las proporciones de la regla del as, dos, tres. La falta de datos precisos a la hora del trazado de las secciones, la roda y la forma en que se disminuye el plan y se aumenta la astilla en las cuadernas de cuenta, hacen de su reconstrucción un ejercicio no solo de comprensión del texto, sino de conocimiento de las técnicas de construcción naval de finales del siglo XVI.

⁷³ Rubio Serrano realiza el mismo cálculo con un puntal de 8,5 codos y obtiene 435 toneladas. Más adelante aplicando la regla de arqueo de 1613 consigue las 400 toneladas. (Rubio Serrano, 1991, Vol 1, pág. 173)

Las herramientas de diseño mediante NURBs hacen posible elucidar las formas de la nao que García de Palacio representa en las figuras de su libro, permitiéndonos generar la carena, no sin ciertas licencias a la hora de trazar los extremos de proa y popa. Esto nos permite llevar a cabo un estudio comparativo con otros buques de épocas precedentes y posteriores evaluando la influencia de los parámetros constructivos en los coeficientes de forma así como la validez de las fórmulas de arqueo vigentes en esa época.

La riqueza de documentos de construcción naval correspondientes a las cinco décadas comprendidas entre 1570 y 1620 nos permiten, mediante el proceso empleado con la *Instrucción náutica*, conocer mejor las formas de las naos que permitieron la expansión oceánica de la Península Ibérica, objeto de mi tesis doctoral en preparación.

9. Bibliografía

- Brown, D. (1998). The form and speed of sailing warships. *Mariner's Mirror* (84:3), 298-307.
- Cano, T. (1611). *Arte para fabricar, fortificar, y parejar naos de guerra y merchante* (Edición facsímil. FEIN. 2004 ed.).
- Casado Soto, J. L. (1988). *Los barcos españoles del siglo XVI y la gran armada de 1588*. Madrid: Editorial San Martín.
- Castro, F. (2013). Tonnages and displacements in the 16th century. *Journal of Archaeological Science* (40), 1136 - 1143.
- Castro, F., Fonseca, N., Santos, T., & Vacas, T. (2010). Reconstructing the nao from Lavanha's manuscript. *ACUA Underwater archaeology*. Advisory Council of Underwater Archaeology.
- Dueñas Fontán, M. (1996). Medidas de los navíos de la jornada de Inglaterra. *Cuadernos monográficos del Instituto de Historia y Cultura Naval* (27).
- Fernández Duro, C. (1881). *Disquisiciones náuticas. Volumen VI. Arca de Noé*. (Ministerio de Defensa. Instituto de Historia y Cultura Naval. Madrid. 1996 ed.).
- Fernández González, F., Apestegui, C., & Miguelez García, F. (1992). *Arte de Fabricar Reales. Edición comentada del manuscrito de Dn. Antonio de Gaztañeta*. Barcelona: Lunweg.
- Fernández Navarrete, M. (2003). *Diseertación sobre la historia de la náutica y de las ciencias matemáticas*. Biblioteca Virtual UNiversal.
- Fernández, M. (1616). *Livro de traças de carpintaria*. Lisboa: Academia de Marinha de Lisboa (1989).
- Fonseca, N. V. (2006). Análise das características náuticas de embarcações latinas medievais. *Actas das X Jornadas Técnicas de Eng. Naval (Inovação e Desenvolvimento nas Actividades Marítimas)*. Lisboa.
- Fonseca, N., & Santos, T. Previsão do diagrama polar de velocidades de uma nau da índia quinhentista. *Encontro de Engenharia Naval. 2009*.
- García de Palacio, D. (1587). *Instrucción náutica para el buen uso y regimiento de las naos, su traza y gobierno conforme a la altura de Mexico* (Edición facsímil. Editorial MAXTOR. 2007 ed.). Mexico: Pedro Ocharte.
- Harries, S., Böndel, D., Geistert, K., & Hochkirch, K. (2000). Systematic Analysis of the Hydrodynamics of Historical Sailing Vessels. *Obtenido de <http://www.futureship.net>*.
- Hormaechea, C., Rivera, I., & Derqui, M. (2012). *Los galeones españoles del siglo XVII*. Barcelona: Associacio de Amics del Museu maritim de Barcelona.
- Laanela, E. (2008). *Instrucción Náutica (1587) by Diego García de Palacio: an early nautical handbook from Mexico*. Tesis doctoral, Texas A&M University, Anthropology.
- Lavanha, J. (1608). *Livro primeiro de arquitectura naval* (1996 ed.). Lisboa: Academia de Marinha.
- Loewen, B. L'archeologie d'un baleiner basque du XVIe siècle, concepts et questions. En *L'archeologie subaquatique de Red Bay* (Vol. III, pág. 7).

- Lorenzo, J., Murga, G., & Ferreiro, M. (1865). *Diccionario Marítimo Español*. Madrid.
- Oliveira, F. (1570-1580). *Livro da fabrica das naos*.
- Pimentel Barata, J. (1989). *Estudos de arqueologia naval*. Imprensa Nacional Casa da Moeda.
- Rieth, E. (1988). Essai de restitution d'un bâtiment de 400 toneladas, d'après Diego García de Palacio (1587). *Histoire & mesure*, 3 (4), 463-489.
- Rieth, E. (2006). L'epave d'Urbieta une embarcation a clin du millie du XV siecle. *Itsas Memoria. Revista de Estudios Marítimos del País Vasco*. (V), 603-616.
- Rubio Serrano, J. (1991). *Arquitectura de las Naos y galeones de las flotas de Indias (1492-1590)*. Málaga: Ediciones Seyer.

10. Ilustraciones

Ilustración 1. Perfil, cuaderna maestra y almogamas de nao de cuatro cubiertas. Fuente: "Livro de traças de carpintaria" (1616)

Ilustración 2. Portada del libro "Instrucción náutica" (1587)

Ilustración 3. Propuesta de sección de maestra de la nao de 400 toneladas. Fuente: elaboración propia. Medidas en codos castellanos

Ilustración 4. Trazado de redeles. Fuente: elaboración propia

Ilustración 5. Nao de 400 toneladas. Fuente: "Instrucción náutica" (1587)

Ilustración 6. Líneas de definición de la carena de la nao de 400 toneladas. Fuente: elaboración propia

Ilustración 7. Imagen 3D de la carena generada. Fuente: elaboración propia

Ilustración 8. Imagen 3D de la carena generada. Fuente: elaboración propia

Ilustración 9. Captura de pantalla del programa de cálculo hidrostático donde se muestra la flotación a 7,5 codos. Fuente: elaboración propia

Ilustración 10. Cálculos hidrostáticos de la nao de 400 toneladas. Fuente: elaboración propia

Ilustración 11. Tabla comparativa de coeficientes de forma de la nao de 400 toneladas con diversas embarcaciones del siglo VII al XVIII. Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de otros estudios

Ilustración 12. Evolución de los coeficientes prismáticos. Fuente: elaboración propia

Ilustración 13. Evolución del coeficiente de la maestra. Fuente: elaboración propia

Ilustración 14. Curva de áreas de la nao de 400 toneladas. Fuente: elaboración propia

Ilustración 15. Evolución de B_w/T y L_w/B_w . Las dimensiones de los círculos son proporcionales a L_w/B_w . Fuente: elaboración propia

Ilustración 16. Aproximación a la figura de la pipa de vino de 4 codos cúbicos (en color verde).

En rojo se representa el cilindro circunscrito de 1,5 x 2,5 codos. Fuente: elaboración propia

Ilustración 17. Secciones de arqueo separadas 2,5 codos. Fuente: elaboración propia

Ilustración 18. Sección media mostrando la disposición de pipas. Fuente: elaboración propia

Ilustración 19. Tabla de capacidad de pipas por secciones. Fuente: elaboración propia

Ilustración 20. Tabla de ratio de ocupación de espacios. Fuente: elaboración propia