
'MANCO CÁPAC', UN DISEÑO NAVAL REVOLUCIONARIO DEL

SIGLO XIX

Ernesto Ponce López y José de la Vega Bustamante

RESUMEN

El 'Manco Cápac', buque terminado en 1865 y diseñado para navegar a 13 nudos, en la práctica solo alcanzó la velocidad de cinco nudos. Otros de su clase fueron más veloces, por lo que se estudió el origen de esta diferencia. El navío participó en 1879 en la Guerra del Pacífico, de Chile contra Perú y Bolivia. Su diseño era de una avanzada generación de blindados de torre giratoria, basados en el 'Monitor' de Ericsson, de concepción revolucionaria: la tripulación permanecía bajo cubierta, protegida por la coraza; el casco presentaba poco blanco, sobresaliendo apenas del agua y su bajo calado le permitía remontar ríos y acercarse a la costa; la torre giraba 360° y sus dos cañones lanzaban proyectiles de 500 libras, los mayores embarcados en ambas armadas. Estas virtudes bélicas fue-

ron menoscabadas por su poca velocidad. Mediante elementos finitos se analizaron sus características. Un modelo matemático del mar, planos de construcción del casco y mediciones realizadas en el buque hundido, permitieron determinar que al incrementar su calado para darle más capacidad en viajes largos, sin aumentar la potencia, su velocidad se redujo, lo que pudo haber cambiado el curso de esa guerra al restar a Perú dos buques poderosamente artillados y blindados, que constituían la mitad de su fuerza naval acorazada. La relevancia del estudio radica en el modelado del mar en cuatro capas de agua, simulando la estela impregnada de burbujas. Para validar el modelo se compararon las velocidades obtenidas por elementos finitos con pruebas de la época.

Introducción

Para ganar la Guerra de Secesión norteamericana, los estados del Norte hicieron grandes esfuerzos técnicos. Encargaron al diseñador naval John Ericsson la construcción de un buque capaz de enfrentarse al 'Virginia', construida por los confederados del Sur a partir de una nave de madera cubierta con blindaje, cuya superestructura fue modificada para presentar superficies inclinadas a los tiros de cañón. Frente a ella se opuso un revolucionario diseño: el 'Monitor', una embarcación acorazada en hierro que apenas sobresalía de la superficie del agua, presentando un mínimo blanco a los contrarios (Enciclopedia Espasa, 1930). Debido al éxito del buque, el proyectista Ericsson recibió el encargo de la marina estadounidense para programar

la construcción de seis unidades mejoradas. El 'Manco Cápac' (Figura 1) perteneció a una tercera generación más evolucionada, siendo de la clase 'Canonicus', de la cual se construyeron nueve unidades (Canney, 1993). Casi al término de la guerra con España, el gobierno del Perú compró, en 1968, dos unidades navales nuevas, que fueron bautizadas como 'Manco Cápac' y 'Atahualpa' (Vegas, 1929; Canney, 1993). Como eran acorazados de río, debieron hacerse modificaciones para el viaje en alta mar hasta el Perú: rompeolas, protección en la base de las torres, incremento de la capacidad de carboneras y altas brazadas en las escotillas. En caso de temporales éstas se cerraban completamente, manteniéndose abiertos solo los ventiladores.

Los cambios fueron visionarios, porque los navíos debie-

ron soportar en su viaje olas de tres metros de altura que barrían sus cubiertas. Los blindados soportaron furiosos temporales en el Caribe, Atlántico, cruce del Estrecho de Magallanes, Golfo de Penas y Corcovado. Se compraron tres vapores para remolcarlos y abastecerlos. El viaje duró 15 meses, siendo el remolque más largo que se hubiese hecho hasta la fecha, efectuando 24 escalas desde su salida hasta su destino en El Callao (Vegas, 1929).

Requerimientos del Diseño

Los requisitos de combate implicaban invulnerabilidad a la artillería de tiro horizontal, para lo cual se les dotó de una coraza vertical de 5 pulgadas (127mm) que cubría el casco. Además, intencionalmente se le dio un bajo perfil sobre la lí-

nea de flotación: sobresalía un pie fuera del agua (Figura 2). Las torres tenían tal espesor que ningún proyectil de la época podía dañarles (10 pulgadas, 254mm). Tanto el casco como la torre tenían un blindaje formado por planchas de hierro laminado en caliente de espesor 1 pulgada (realmente es un acero de bajo contenido en carbono, pero eran llamados buques *iron side*), unidades con remaches. Con el objeto de remontar ríos y maniobrar en aguas poco profundas, el barco debía tener poco calado, ser 'maniobrero' y estar dotado de un fuerte timón, cualidad que no compartía ninguna fragata oceánica acorazada fabricada en Europa. Para disparar en cualquier posición se le dotó de una torre que portaba dos cañones (Figura 3) y era capaz de girar horizontalmente 360°, aunque tenía 10°

PALABRAS CLAVE / Artes Navales / Buque Blindado / Guerra del Monitor / Modelaje Computacional /

Recibido: 11/10/2016. Modificado: 30/06/2017. Aceptado: 05/07/2017.

Ernesto Ponce López. Ingeniero Civil Mecánico, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. Ms.C. en Ciencias Ambientales, Universidad de Tarapacá, Chile. Doctor Ingeniero

Industrial, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España. Ph.D. en Ciencias del Medio Ambiente (Programa UPM-UTA). Profesor-Investigador, Universidad de Tarapacá, Chile.

Dirección: Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá. 18 de Septiembre 2222, Arica, Chile. email: eponce@uta.cl
José de la Vega Bustamante. Ingeniero Civil Mecánico,

Universidad de Tarapacá, Candidato a doctor UPM. Chile.

THE 'MANCO CÁPAC', A REVOLUTIONARY NAVAL DESIGN OF THE 19TH CENTURY

Ernesto Ponce López and José de la Vega Bustamante

SUMMARY

The 'Manco Cápac' warship, completed in 1865, was designed to sail at 13 knots, but in practice it only reached five. Other ships of the same class were faster, and this paper studies the origin of this difference. In 1879, the ship participated in the War of the Pacific of Chile against Peru and Bolivia. The design belonged to an advanced generation of revolving-turret battleships, based on Ericsson's 'Monitor'. Its conception was revolutionary: the crew remained under deck, protected by the armored hull, which was a difficult target, scarcely visible over water level, and its low draft made it apt for upriver travel and for getting close to the coast. The turret rotated 360 degrees and the two cannons could shoot 500-pound projectiles, the biggest ever loaded

on either fleet. Such military advantages were countered by speed limitations. The ship's characteristics were analyzed by finite elements. By means of a mathematical model of the sea, ship's hull construction drawings, and measurements taken on the sunken ship it was determined that speed was reduced by increasing the ship's draft to permit long travel while failing to increase engine power. This fact might have changed the course of the war by rendering two powerful armored vessels (half of Peru's armored naval force) useless. The relevance of the work lies in the fact that the sea was modeled in four layers, simulating an air impregnated wake. To validate the model, the finite element speed results were compared to data of the time.

O NAVIO 'MANCO CÁPAC', UM PROJETO NAVAL REVOLUCIONÁRIO DO SÉCULO XIX

Ernesto Ponce López e José de la Vega Bustamante

RESUMO

O navio Manco Cápac foi finalizado em 1865 e projetado para navegar a 13 nós, mas na prática somente atingiu os cinco. Outros da sua mesma classe foram mais velozes, por isso se tem estudado a origem de esta diferença. Participou em 1879 na Guerra do Pacífico, entre Chile contra Peru e Bolívia. O projeto era de uma avançada geração de blindados de torre giratória, baseados no 'Monitor' de Ericsson. Sua concepção era revolucionária: a tripulação permanecia baixo a cobertura do navio, ficando protegidos pela couraça, e o casco apresentava um alvo mínimo, apenas sobressaindo da água. Seu baixo calado o tornava apto para incursionar em rios e aproximar-se à costa. A torre girava em 360 graus e seus dois canhões lançavam projéteis de 500 libras, os maiores embarcados em ambas armadas. Estas virtudes

bélicas se viram enfraquecidas pela baixa velocidade. Suas características foram analisadas pelo método dos elementos finitos. Mediante um modelo matemático do mar, do casco e medições realizadas no navio afundado, foi determinado que ao incrementar o calado para aumentar a capacidade em viagens longas sem aumentar a potência motriz, a velocidade diminuiu. Isto poderia ter mudado o curso dessa guerra ao restar ao Peru dois monitores poderosamente artilhados e blindados, a metade da sua força naval blindada. A relevância do trabalho reside em que o mar foi modelado em quatro capas de água, simulando o rastro impregnado de borbulhas. Para validar o modelo foram comparados os resultados da velocidade obtida por elementos finitos com provas da época.

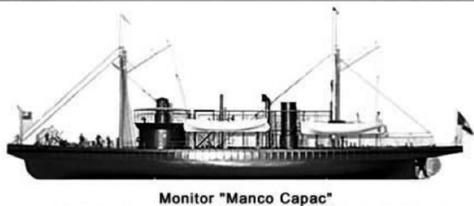
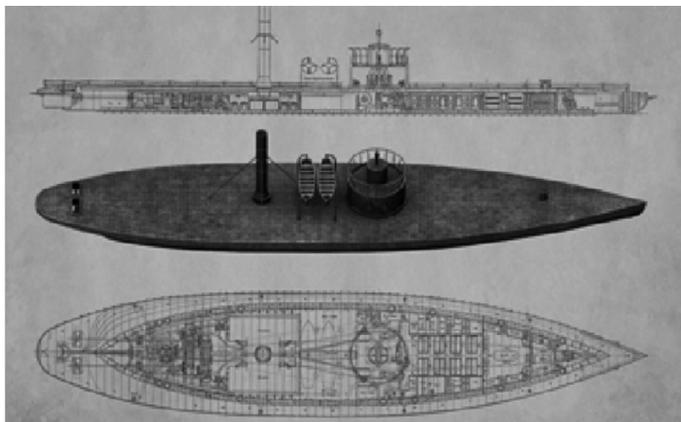


Figura 1. Monitor clase Canonicus.

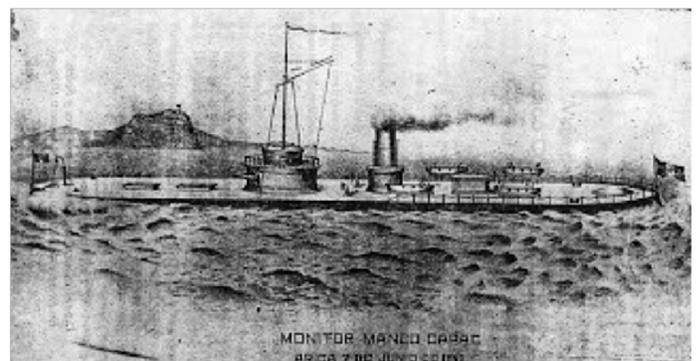


Figura 2. El Manco, imagen de la época.

de zona muerta hacia la popa (USS Monitor Center, 2008). Según CDR (1970) y Canney (1993), montaba dos cañones del modelo 'Dahlgreen' (Figuras 3 y 4), que tenían configuración de 'botella de soda' y

siendo de ánima lisa, disparaban principalmente municiones esféricas, macizas o bien huecas rellenas de explosivo. Su calibre nominal era de 15 pulgadas.

Estudios posteriores indican que su fabricante fue el capitán

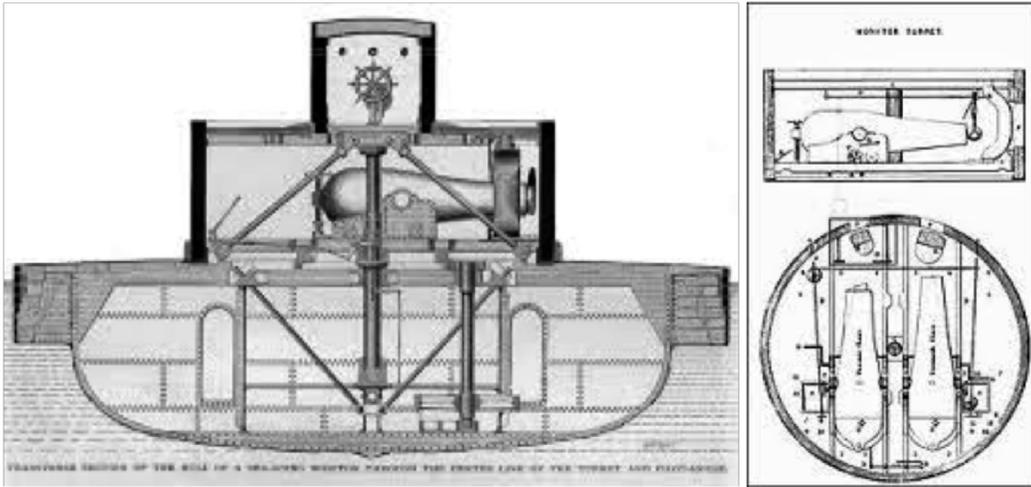


Figura 3. Sección transversal y horizontal de la torre.

(luego *Lieutenant-General*), Thomas Jackson Rodman (1815-1871) y algunos fueron diseñados por el almirante Adolf Dahlgreen, siendo ambos modelos muy parecidos. Uno de los biógrafos de Rodman (Johnson, 1990) establece que los cañones fabricados por él fueron instalados en los monitores de la marina durante la Guerra Civil norteamericana. Estos cañones eran superiores a los desarrollados en la época, por ser fundidos de una sola vez con la perforación interna. El interior del tubo, al momento de recibir el hierro fundido, era enfriado por un alma de arcilla que contenía tubos con agua fría circulante. El efecto del enfriamiento hacía que el metal mejorase sus propiedades mecánicas, alargando la vida del arma sin romperse a unos 2500 disparos, cifra que sus competidores no alcanzaron, ya que el más cercano duró sólo 399 tiros (Johnson, 1990). La munición sólida contra blindados nominalmente era llamada de 500 libras (realmente pesaban 453 libras) y la munición contra buques de madera eran granadas de 300 libras con explosivo (Canney, 1993). El alcance efectivo para perforar un blindaje de cuatro pulgadas era de 2000 yardas, según un reporte del comandante peruano Sánchez Lagomarsino (Machuca, 1926).

Las dimensiones del 'Manco Cápac' (ex USS 'Oneota') eran

de 225 pies (68,6m) de eslora, 43 pies 3 pulgadas (13,2m) de manga y 13 pies 3 pulgadas (3,96m) de calado. La velocidad de diseño fue de 13 nudos; sin embargo, permanece como incógnita la lentitud de este barco frente a sus iguales. La velocidad máxima reportada en el servicio de la Marina peruana fue de cinco nudos (USS Monitor Center, 2008). Una velocidad inferior a la de los demás no permite acompañar al resto de la escuadra en viajes largos ni hacer maniobras conjuntas en combate (Thorndike, 1979).

La Guerra Civil norteamericana había causado tales bajas que el ingeniero Ericsson decidió proteger a la tripulación, que permanecía bajo la cubierta acorazada y además bajo la línea de flotación. Los artilleros quedaban en la torre de pared gruesa de hierro y el capitán con sus oficiales cercanos, en la torre de combate, montada sobre la primera y tan

segura como ésta. Nadie quedaba expuesto, con lo cual se dio un ejemplo loable a los futuros diseñadores navales, en una época en que la vida de los marinos tenía un valor relativo. Como la tripulación permanecía bajo el nivel de agua se instalaron ventiladores reforzados para airear las cubiertas interiores y calderas. La tripulación era de unos 100 hombres, incluyendo oficiales (McPherson, 2012).

El desplazamiento del diseño inicial era de 2100ton, sin carga, y entre sus especificaciones y características estaban las siguientes. Máquinas: dos maquinarias de nivel oscilante, patente Ericsson, fabricadas por Alex. Swift & Co and Niles Works. Potencia indicada: 320 caballos. Calderas: dos, modelo Stimers. Capacidad de las carboneras: 150ton de ladrillos de carbón. Depósito de municiones con capacidad para 100 tiros. Hélice: una sola de cuatro palas. Timón compensado, muy

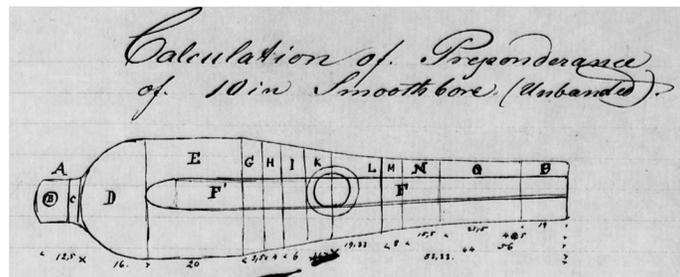


Figura 4. Esquema de diseño del "Dahlgreen".

sólido y sobredimensionado para maniobras rápidas en los ríos. Radio de acción: para viajar ~5 días sin detenerse y a plena velocidad. Precio de contrato para fabricación: US\$ 460 000. Fecha del contrato: 10/09/1862. Botadura: 21/05/1864. Completada su construcción: 10/06/1885. Comisiones de guerra: ninguna, jamás entró en servicio para la marina de EEUU. Constructor: Alexander Swift & Co y Niles Works, Cincinnati, Ohio (USS Monitor Center, 2008).

Otros barcos clase *Canonicus*

Nueve barcos fueron construidos, cuyas velocidades medidas fueron: *Canonicus* 9 nudos; *Catwaba* (luego 'Atahualpa') 5 nudos; *Mahopac* 6,3 nudos a 5/8 potencia máx.; *Manayunk* 4,5 nudos en contracorriente al río Ohío; *Manhattan* 8 nudos; *Oneota* (luego 'Manco Cápac') 5 nudos; *Saugus* 8 nudos; *Tecumseh* 8 nudos; *Tippecanoe*, velocidad no encontrada (USS Monitor Center, 2008).

El que se vendieran dos monitores nuevos, pero de la mitad de andar que sus pares, constituye una gran duda. Los nueve buques clase *Canonicus* fueron fabricados según licitación del gobierno de la Unión. Todos tenían iguales planos, dimensiones, tonelajes, artillería y maquinaria. Algunos que no se vendieron fueron modernizados y participaron en la Guerra Hispano-Norteamericana, a fines del siglo XIX.

Actuación en la Guerra del Pacífico

En la guerra de 1879 el *Manco Cápac* fue destinado a la base naval de Arica. Se mejoró su poder ofensivo al incorporarle una ametralladora y dos lanchas torpedo que podían ser lanzadas rápidamente al agua desde su cubierta (Grieve, 1983). A las 7:15 del 27/02/1880 se inició la primera batalla naval de Arica entre los buques chilenos monitor *Huáscar* (capturado al Perú) y la cañonera *Magallanes*, contra

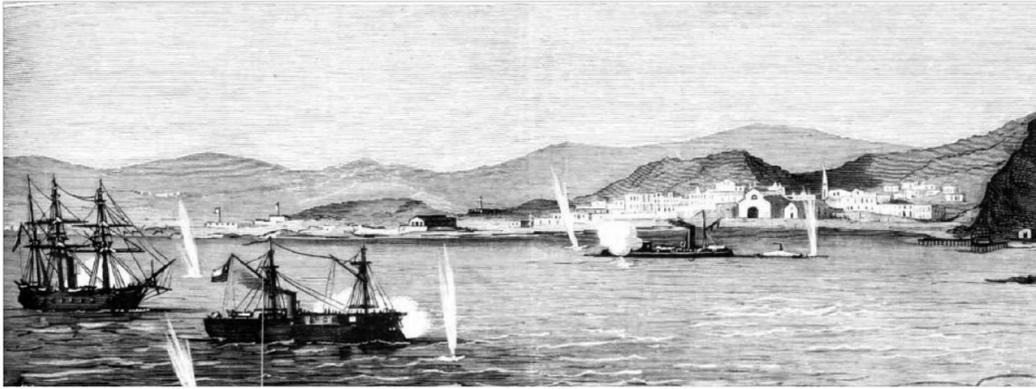


Figura 5. Combate naval de Arica entre el Huáscar y el Manco Cápac. Inicio del encuentro

el Manco Cápac (Figura 5) y las cuatro baterías de la costa, armadas de cañones Vavausser de 250 libras y Voruz de 6 pulgadas. A las 11:00, al aproximarse desde el norte hacia la ciudad un tren peruano con tropas, se reinició el combate. El convoy ferroviario regresó a Tacna, pero debido a una granada del Manco Cápac hubo siete muertos y nueve heridos en el Huáscar (Barros Arana, 1980). Uno de los tiros dio en el casco y aunque el impacto no lo perforó, hizo soltar remaches y soltó incrustaciones calcáreas del interior del condensador, lo que taponó el flujo de agua a las calderas. A las 14:10, estando este buque reparando sus máquinas se acercó el blindado peruano. El comandante del Huáscar, don Manuel Thompson, ordenó acercarse para atacar con el espolón, en ese momento única forma de hundir un barco de esas características. A 200 metros de distancia desde el Manco Cápac iniciaron el lanzamiento de una lancha torpedo, acción que se vio abortada por las ametralladoras chilenas que provocaron la huida de su tripulación. La lancha quedó conectada al flanco y para evitar su detonación el Huáscar maniobró para embestir por el otro costado (Figura 6). La maniobra era temeraria y pudo resultar si las calderas del navío chileno no hubiesen fallado y le restasen velocidad. Los buques se cruzaron, el Manco Cápac, al mando del comandante José Sánchez Lagomarsino evolucionó y disparó

sobre la popa llevándose el palo de mesana y dando muerte al comandante Thompson. Este oficial prefirió dirigir el combate desde la toldilla en vez de hacerlo desde la torre de mando blindada. Sobre él escribió el almirante peruano Lizardo Montero: “El comandante del Huáscar ha muerto. Lamento su pérdida. Era un valiente” (Urzúa, 1957).

La segunda batalla naval de Arica fue al amanecer del 06/06/1880. El blindado chileno Cochrane y la goleta Covadonga inician un bombardeo contra los fuertes y el Manco Cápac, que esta vez no salió de su fondeadero protegido por las baterías de tierra. El Cochrane perdió a la mitad de sus artilleros por una granada disparada desde uno de los fuertes. Al día siguiente, el 7 de junio, un ataque por tierra terminó con las defensas terrestres peruanas de la playa. El blindado del Perú abandonó su protección en la isla del Alacrán y acercándose a la costa descargó sus cañones sobre las columnas chilenas. Pero también cayeron los fuertes del peñón llamado ‘El Morro’ y cuando las banderas enemigas flamearon en las posiciones antes ocupadas por los peruanos, se alejó lentamente de tierra. Luego sus tripulantes descendieron sobre las dos lanchas torpedo que remolcaron algunos botes, se abrieron las válvulas y el buque abandonado terminó de hundirse en 45 minutos, a las 8:00 (Urzúa, 1957). Posteriormente los marinos peruanos se

acercaron a los buques neutrales a pedir asilo, el que les fue negado. Entre ellos estaba la fragata de guerra alemana ‘Hansa’. Antes de que llegara el blindado Cochrane los fugitivos se rindieron a los buques de transporte chilenos, que se acercaban a la plaza derrotada. Solo una lancha torpedera decidió evadirse con gran velocidad. Sin embargo, la hundió su tripulación, en las cercanías de Ilo y se entregaron a un alférez chileno de 19 años que se encontraba en la costa (Machuca, 1926; Arancibia, 1988).

Conclusiones sobre el fin del blindado

Desde el aspecto militar y económico la historia del Manco Cápac es la de un gran esfuerzo técnico y monetario

con un largo y angustioso viaje sin precedentes, para llegar a destino después de un año y tres meses, sorteando tempestades, accidentes y cambios de mando (Vegas, 1929). Finalmente, cuando pudo combatir fue hundido por sus tripulantes. No se obtuvo beneficios de su diseño y poderosas armas, incluyendo torpedos. Sin embargo, si se analizan las posibilidades del buque ese día 7 de junio, pudo tomar algunos caminos alternativos: 1) Luchar, atacando al único blindado chileno que bloqueaba el puerto. Éste, el Cochrane, había perdido la mitad de los artilleros del reducto central, por lo que no estaba en condiciones óptimas para un combate. Ya el Manco Cápac se había probado en la batalla contra el Huáscar que era difícil acertarle a su torre, porque presentaba poco blanco. Más complicado era darle al casco que apenas sobresalía un pie del agua. Sus cañones habían demostrado ser mortíferos y sus veloces lanchas torpedos estaban preparadas. 2) Huir al norte, rumbo al Callao, forzando el bloqueo. Por su bajo calado pudo irse orillando a la costa y así eludiría cualquier posible embestida con espolón del Cochrane. De los cañones contrarios había poco que temer, ya que la torre tenía 10 pulgadas de blindaje. Su maquinaria estaba operativa, así lo prueba el informe de

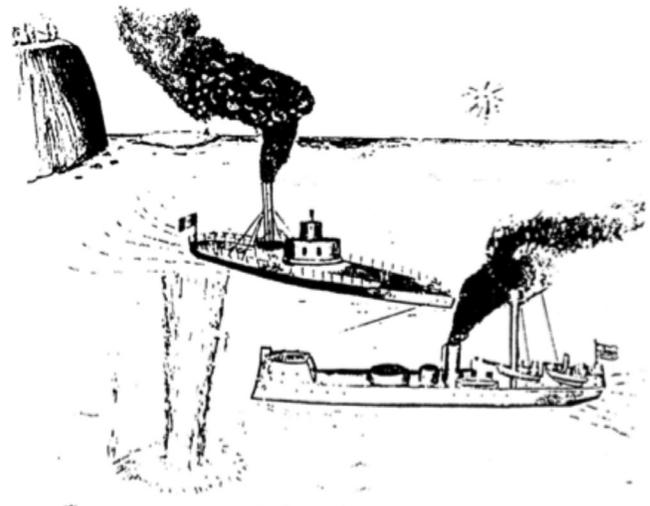


Figura 6. Combate del 27 de febrero de 1880, instante en que se cruzan los navíos.

su comandante (Barros Arana, 1980). La goleta Covadonga no presentaba peligro por tener un solo cañón de bajo calibre y carecer de blindaje.

Descubrimiento del Manco Cápac

A comienzos de la década de 1960, buscando un ancla perdida mediante un sistema de garra, ésta se enganchó en el fondo. Bajaron buzos y encontraron al buque hundido de costado. El peso de su gran torre lo volteó, quedando apoyado en ella. Al poco tiempo los buzos descubrieron que sus carboneras estaban llenas, procediendo a retirar las 150 toneladas de ladrillos de carbón de piedra aglomerado con asfalto. Igualmente encontraron llenos los depósitos para municiones y pólvora. Esto corrobora la hipótesis que pudo luchar o bien huir hasta el Callao, porque con ese combustible tenía más que suficiente para esa travesía. El pecio está a unos 12m de profundidad frente a la desembocadura del río San José, a 1km de la costa, señalado por tres boyas.

Duración de los buques

En una fotografía de la Reserva Naval Norteamericana, de fecha cercana a la primera guerra mundial, aparecen dos monitores. Esto indicaría una vida activa superior a 50 años, lo que es una prueba de la calidad de estos buques. Uno de los últimos viajó a una ceremonia en Hampton Roads a mediados de 1907 y luego, el 19/02/1908, fue vendido como chatarra (Canonicus, 2010; Fox, 2014).

De las condiciones de vida a bordo

Debe destacarse algunos aspectos del buque que habrían influenciado finalmente en la moral de la tripulación y oficiales. En aquella época y en excepciones hasta nuestros días, los diseñadores se preocupaban más de la efectividad del barco, que del confort y salud mental de los tripulantes. Eran naves estrechas, incómodas, con mu-

cho ruido y calurosas debido a las calderas a carbón. Al no estar el personal en cubierta, permanecían meses bajo ella, sin luz natural ni aire puro, pese a los potentes ventiladores que tenía. Si se analiza el bravo comportamiento de oficiales y marinería, el 27 de febrero en el combate contra el ‘Huáscar’, se ve un cambio al 7 de junio del mismo año, en que buscaron asilo en los barcos neutrales sin presentar batalla. Un cuadro de la época muestra el navío en estado de alerta con sus fuegos encendidos y preparado para la acción, situación que duró largo tiempo. En tres meses de bloqueo el espíritu de lucha ya no era el mismo. “Los peligrosos efectos psicológicos de hombres encerrados en incómodas cuadras, en barcos mecidos por las olas, de marineros sin oportunidad de ir con licencia a la costa, con pocas cartas de la patria y sin interrupción de la rutina diaria, tales hombres estaban listos a cualquier acto que les permitiera salir de su incomodidad y cautiverio” (Singer y Sherrad, 1960). Esta lección es válida en cualquier época para los diseñadores de buques: la comodidad de la tripulación influye en el desempeño de la unidad hombre-máquina. Las naves no son buenas o malas por sí mismas, sino además por la tripulación que las dirige.

Proyecciones históricas

El concepto de diseño perduró en la construcción de ‘monitores’ utilizados en la primera y segunda guerras mundiales y en Vietnam (Grieve, 1983). La torre giratoria con artillería pesada, el concepto de ‘todos protegidos’ bajo cubierta, la subdivisión del casco en compartimentos separados, la distribución eficiente de cargas y el timón compensado, entre otros, se aplicaron a otras naves de construcción más moderna.

Desarrollo por Elementos Finitos

El método de elementos finitos (MEF) se basa en el sistema de ecuaciones lineales (Zienkiewicz, 2000): el medio

continuo se considera elástico y se subdivide en muchos pequeños elementos que componen en conjunto un modelo de buque flotando en el océano. En este estudio se han considerado cinco materiales diferentes: acero de bajo carbono, agua de mar del contorno del buque; agua de mar de la estela interna; agua de mar de la estela externa y agua de mar oceánica. En elementos finitos se puede modelar el rozamiento del agua con el casco aplicando cargas tangenciales de fricción en forma directa (teoría de Coulomb). Otro camino es la teoría que consiste en modelar la fricción mediante elementos de diferente módulo de elasticidad (Hartley *et al.*, 1979), la que se aplicó en este caso porque tiene predicciones más cercanas a resultados experimentales (Ponce, 1986). El agua en contacto con el casco tiene más burbujas de aire que el agua oceánica, debido al corte del líquido con la proa y mezcla con el aire de la superficie, dichas burbujas se arrastran hacia la popa debido al avance del buque. Se modelaron cuatro capas de agua de mar desde mínima elasticidad por las burbujas cerca del casco, hasta la máxima para el agua oceánica. Para cada capa de agua se consideró la misma temperatura, debido a que no hay un gran cambio en ella por el corto tiempo del evento, lo que no da lugar a una transferencia de calor significativa.

Cada material tiene diferentes características y geometrías. En términos matemáticos cada uno se modela con una matriz de rigidez diferente. De acuerdo a esto se puede escribir

$$F = (K_{\text{acero}} + K_{\text{agua-contorno}} + K_{\text{estela1}} + K_{\text{estela2}} + K_{\text{agua-océano}}) D \quad (1)$$

donde F: vector de fuerzas, K: matriz de rigidez de cada material, D: vector del desplazamiento nodal. Para el cálculo debe incluirse como datos de entrada para el programa: γ = densidad; E= módulo de elasticidad del material; μ = módulo de Poisson y G= módulo de rigidez o de cortadura; siendo

$$\mu = E / (2G-1) \quad (2)$$

En la Tabla I se presentan los datos de ingreso de cada material utilizados para los cálculos por elementos finitos.

El modelo fue construido a partir de los planos del navío (Figura 7), que fueron transferidos al programa ALGOR (actual Autodesk). Se emplearon unos 20000 elementos tipo ladrillo, de 8 nodos. Se generó el casco (Figura 8) y el agua de mar (Figura 9) con los cuatro tipos de fluidos: agua oceánica, agua de la estela 2, agua de la estela 1 y agua del contorno del casco. Luego se ensambló el agua con el casco (Figura 10) y, finalmente, el sistema fue resuelto.

Resultados por elementos finitos

En este método las incógnitas son las fuerzas si se da un movimiento impuesto (Ec. 1). Se dio al casco un desplazamiento horizontal de 3,0m (Figura 11) con lo que resultó una fuerza total de 52569N. Conocida la potencia nominal de 320HP y el factor de conversión de $75\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ por cada HP, se obtuvo la velocidad, que hechas las correspondientes transformaciones de $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ resultó ser de 5,57 nudos (De la Vega, 2001).

Conclusiones

La velocidad del blindado obtenida por elementos finitos fue de 5,57 nudos. La mejor velocidad obtenida por la Marina peruana en condiciones óptimas de mar y barco fue de 5 nudos, siendo la velocidad de diseño de 13 nudos. La diferencia ha de estar en los trabajos realizados en astilleros norteamericanos antes de enviarlo al Perú: se aumentó la capacidad de almacenaje de las carboneras y bodegas, para lo cual necesariamente debió modificarse el calado a más de 13 pies con 3 pulgadas (4,0m), y según mediciones de buzos de la Armada de Chile tendría 4,4m. Esto concuerda con las modificaciones realizadas a otros monitores para mejorar

su flotabilidad: 15 pulgadas de aumento del calado (Canney, 1993). Al parecer no se incrementó la potencia de las máquinas, lo que explicaría su lento andar. Esto llevó a usar este buque como batería flotante. Esta alteración sin duda cambió el curso de la guerra al privar a Perú de dos monitores poderosamente artillados y blindados, que constituían la mitad de su fuerza naval acorazada.

Es notoria la racional distribución de los compartimentos, ubicación de las cargas, centro de gravedad y estabilidad, lo que se visualiza en los planos de las Figuras 7 y 8. El centro de gravedad estaba en la mitad del buque, lo que mantenía el equilibrio longitudinal. Mamparos de colisión evitarían que se inundara si se rompía la proa. Otros mamparos de aislación separaban la sala de máquinas de la torre artillada, con lo cual un accidente o incendio en un sector no pasaba al otro. Lo mismo puede decirse de la santabárbara respecto a los otros compartimentos. El peso de la torre y su sistema giratorio estaban apoyados en la quilla, lo que en diseño naval se usa hasta nuestros días (Figura 3). En el casco inferior un recubrimiento de plomo protegía de la corrosión. El problema de la estabilidad por el hecho de mantener una torre artillada de más de 100ton sobre cubierta estaba garantizado por la amplia manga del navío y por guardar el carbón y municiones bajo el 'centro de empuje', lo que reducía el riesgo de volcamiento. Detalles constructivos tales como caja de ancla, timón compensado para facilitar las maniobras y los otros ya mencionados se han mantenido hasta nuestros tiempos.

La incertidumbre (u) del cálculo involucra: u_1 del estado friccional del casco debido a incrustaciones marinas, se considera $u_1=0$ porque el casco estaba recubierto con una capa de plomo, que es tóxico para la vida marina; u_2 del mallado de elementos finitos: al emplear 20000 elementos en el programa ALGOR se tenía la mejor resolución (la diferencia con

18000 elementos era de un 2,5% en resultados) por lo que el máximo de incertidumbre en este caso sería $u_2= 2,5$; u_3 debido al modelo de 4 capas: anteriormente con una capa (en vidrio líquido) se había determinado una discrepancia de 2% en el modelo de Hartley respecto a los resultados experimentales (Ponce,1986), por lo que empleando 4 capas de agua la incertidumbre debe ser menor, luego el valor máximo solo alcanzaría a $u_3= 2$. Incertidumbre dimensional u_4 : si se estima una diferencia de 1%, en las dimensiones de los planos respecto a las dimensiones del buque construido, $u_4= 1$. La incertidumbre total alcanzaría $u= u_1 + u_2 + u_3 + u_4 = 5,5$ en el peor caso, que es menor a la cifra exigida en ingeniería, de $u= 7$. Respecto a las condiciones de borde, el casco fue fijado para luego darle un movimiento impuesto de 3m; la respuesta del programa son fuerzas, como indica la Ec. 1. Las condiciones de borde para fijación del agua oceánica se estimaron en base al principio de atenuación de cargas de Saint Venant por el efecto de distancia.

El principal objetivo fue determinar la lentitud del buque frente a sus pares de EEUU, lo que se logró mediante el modelo matemático: con la potencia descrita en la base histórica y el calado real del barco, la velocidad se redujo, existiendo una diferencia entre los 5,57 nudos calculados y los 5 nudos indicados por la Marina Peruana (10,23%). Puede haber diferencias en la potencia debido al carbón empleado en EEUU frente al usado en Perú; tampoco se sabe si la prueba fue realizada en contra o a favor de la Corriente de Humboldt; se desconoce el estado de las calderas y condensador durante la prueba, datos inalcanzables para los autores. Para el problema planteado el método resultó adecuado y se puede aplicar en casos equivalentes. Las limitaciones serían para casos diferentes con otras dimensiones de buques, presencia de olas que afectan el rozamiento del casco, diferencias

TABLA I
DATOS DE INGRESO PARA CÁLCULOS
POR ELEMENTOS FINITOS

Unidades	γ	E	μ	G
	$g \cdot cm^{-3}$	$kg \cdot cm^{-2}$		$kg \cdot cm^{-2}$
Agua oceánica	1,025	25500	0,4	0,0002
Agua del contorno del casco	1,002	23000	0,4	0,0002
Agua de estela 1	1,005	24000	0,4	0,0002
Agua de estela 2	1,010	24500	0,4	0,0002
Acero	7,85	2100000	0,3	800000

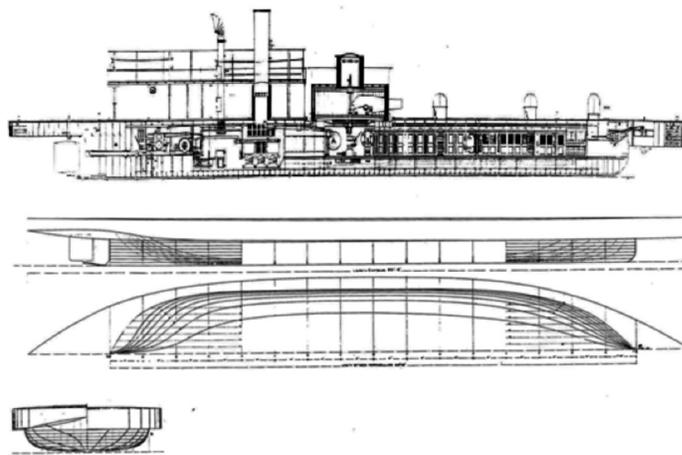


Figura 7. Planos del buque.

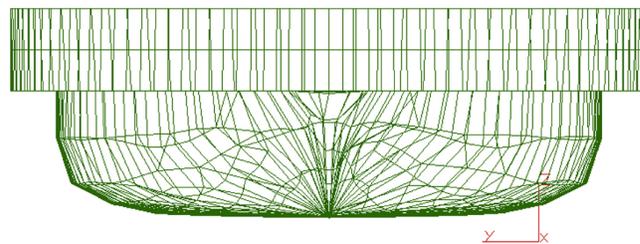


Figura 8. Vista de la proa.

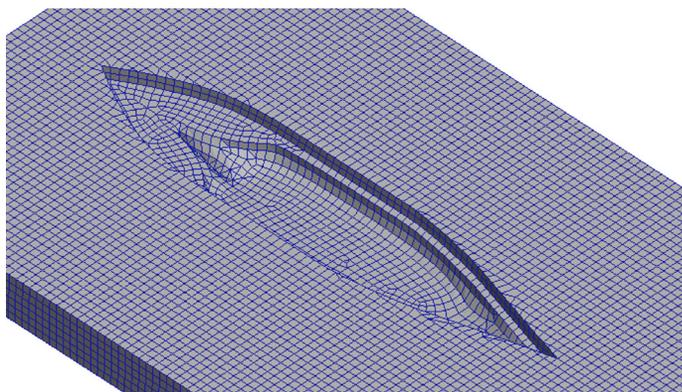


Figura 9. Modelado del mar por el método de elementos finitos.

en la proa (uso de bulbo eliminador de olas, sistemas generadores de micro burbujas y otros avances).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Tarapacá por el

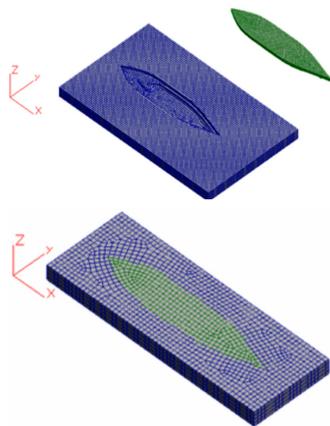


Figura 10. (a) El mar y el barco se generan separados. (b) Unidos los dos grupos se procesa el sistema.

financiamiento a través del proyecto de Metalurgia Antigua, al Ejército de Chile por la documentación histórica y a la Armada de Chile por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

Arancibia R (1988) *Breve historia militar de Arica*. Olimpo. Santiago, Chile. pp. 214-215.

Barros Arana D (1980) *Historia de la Guerra del Pacífico*. Parte II, Cap. XIII. Servat. Santiago, Chile. pp. 388-391.

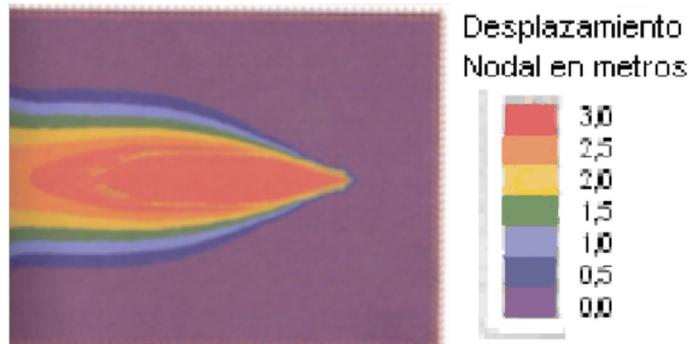


Figura 11. Desplazamiento en rojo: el buque en movimiento. Desplazamientos hasta 0,5m (otros colores excepto el océano): las distintas capas de la estela.

Bulnes G (1981) *La Guerra del Pacífico*. 3ª ed. Ed. del Pacífico. Santiago, Chile. pp. 74-78, 196.

Canney D (1993) *The Old Steam Navy. The Ironclads 1842-1885*. 1ª ed. Vol.2. Naval Institute Press. Annapolis, MD, EEUU. pp. 75-93, 131-136.

Canonicus (s/f) En *Dictionary of American Naval Fighting Ships*. Naval History & Heritage Command. www.history.navy.mil/research/histories/ship-histories/danfs.html (Cons. 15/09/2010).

CDR (1970) *American Dictionary of Biography*. 1ª ed. Vol. III. Scribner. Nueva York, EEUU. 80 pp.

De la Vega J (2001) *Determinación de la Carga de Arrastre de un Ironclad, Mediante Elementos Finitos*. Tesis. Universidad de Tarapacá. Chile. pp. 216-218.

Enciclopedia Espasa Calpe (1930). *Monitor*. Espasa. Madrid, España. pp. 168-169.

Fox A (2014) *Post-War Lives of the Civil War Monitors* www.fantasticalandrewfox.com/ 2014/06/10/post-war-lives-of-the-civil-war-monitors/ (Cons. 11/10/2016).

Grieve J (1983) *Historia de la Artillería y de la Marina de Guerra en la Contienda de 1879*. Editorial Lima. Lima, Perú. pp. 112, 122-124.

Johnson W (1990) T.J. Rodman: Mid-19th century barrel research and design for the U.S. Army. *Int. J. Impact Eng.* 9: 127-159.

Hartley P, Sturges C, Rowe G (1979) Friction in finite element analyses of metalforming processes. *Int. J. Mech.* 21: 301-311.

Machuca F (1926) *Las Cuatro Campanas de la Guerra del Pacífico*. Tomo I. Victoria. Valparaíso, Chile. pp. 80-86, 302-316.

McPherson J (2012) *War on the Waters: The Union and Confederate Navies, 1861-1865*. University of North Carolina Press. Chapel Hill, NC, EEUU. pp. 73.

Ponce E, Sánchez Pérez A (1986) Comparación de teorías de rozamiento en el conformado de metales. *An. Ing. Mec.* 4: 225-230.

Singer K, Sherrad J (1960) *Great Adventures of the Sea*. Roa. NY, EEUU. pp. 85-99.

Urzúa L (1957) *Arica Puerta Nueva*. Andrés Bello. Santiago, Chile. pp. 51-56.

USS Monitor Center (2008) EEUU www.monitorcenter.org/ (Cons. 15/09/2008).

Vegas G (1929) *Historia de la Marina de Guerra del Perú, 1821-1924*. Tomo II. Lux. Lima, Perú. pp. 57-70.

Trotter WR (1989) *Ironclads and Columbiads. The Civil War in North Carolina. The Coast*. Blair. Winston-Salem, NC, EEUU. pp. 441-415.

Zienkiewicz OC, Taylor RL (2000) *The Finite Element Method*. 5ª ed. Vol. I. Butterworth. Oxford, RU. pp. 45-47.