

# ASPECTOS BÁSICOS DO PROJETO DE CASCOS PARA SUBMARINOS



Capitão-Tenente Marcos Roberto Superbi Albergaria

## 1 INTRODUÇÃO

De uma forma geral, os submarinos são formados por um casco resistente (interior) e um casco não resistente (exterior). O casco resistente deve suportar a pressão hidrostática e dispor de volume interno para abrigar os diversos sistemas. O casco não resistente abriga as áreas de livre alagamento e é projetado para prover ao submarino um melhor desempenho hidrodinâmico.

Existem diversos trabalhos científicos sobre a construção de cascos para submarinos, porém uma pequena parcela deles aborda os aspectos básicos do projeto. A maior parte conceitual do projeto é feita de forma confidencial e, portanto, não é tornada pública. Dentre todas as variáveis do projeto, é importante que o operador entenda quais são os requisitos, do ponto de vista hidrodinâmico, que o casco do submarino deve satisfazer, pois isso facilitará o entendimento de como o submarino se comporta no mar.

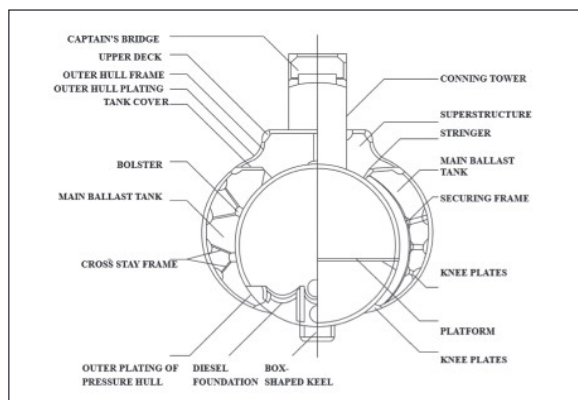


Figura 1: Casco resistente e casco não resistente.

## 2 VISÃO GERAL

As condições do projeto estrutural para o casco resistente e para o casco não resistente são, embora

eles sejam interligados, distintas. Isso porque os cascos cumprem funções diferentes e são submetidos a cargas de projeto desiguais, sendo o casco resistente tratado com prioridade.

A forma comum do casco resistente é a de um cilindro reforçado por cavernas circulares, fechado nos extremos por calotas hemisféricas, torisféricas ou elípticas. Alguns projetos apresentam seções de transição cônicas. Nessas seções de transição, é comum a presença de anéis externos de ligação. Além disso, pode haver tanques internos resistentes e anteparas estanques.

As técnicas de construção de cascos para submarinos só atingiram o estado da arte no final dos anos 1990. Com o passar dos anos, os engenheiros perceberam a importância da resistência, da propulsão e da assinatura acústica para os submarinos.

A previsão da performance hidrodinâmica dos submarinos, assim como para os navios de superfície, pode ser dividida nas seguintes áreas gerais:

- resistência apresentada pelo casco e propulsão;
- capacidade de suportar condições severas de mar; e
- manobrabilidade.

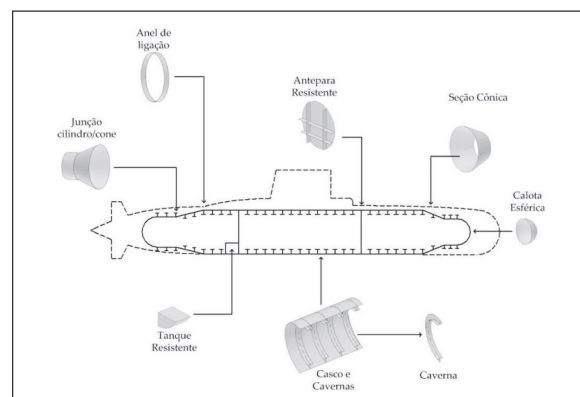


Figura 2: Elementos estruturais do casco.

### 3 DIRETRIZES GERAIS PARA PROJETO DE CASCOS PARA SUBMARINOS

Um dos aspectos mais importantes para um navio, neste caso para um submarino, é a velocidade que pode ser alcançada a partir de uma dada potência desenvolvida por suas máquinas. A potência necessária deve ser a mais baixa possível, isto é, a resistência do casco, incluindo apêndices e superfícies de controle (lemes e hidroplanos), deve ser minimizada e a eficiência propulsiva, maximizada. Esta última só pode ser alcançada pelo casamento adequado do casco e do propulsor. A otimização da resistência e da eficiência propulsiva é essencial, pois influencia diretamente nas velocidades de cruzeiro e máxima que o meio poderá desenvolver.

Na fase inicial do projeto, é preciso considerar, antes de tudo, as condições e os requisitos de operação do meio. Durante a maior parte do seu emprego, os submarinos modernos operam abaixo da superfície da água, exigindo que eles sejam projetados, principalmente, para um bom desempenho quando mergulhado. Como não há superfície livre em cota profunda, não ocorre a formação de ondas e, portanto, a resistência das ondas não é levada em consideração. Quando esnorqueando, a velocidades baixas ou moderadas, a resistência das ondas também acaba sendo insignificante. É comum se decompor a resistência do casco de um submarino submerso em duas componentes: resistência friccional e resistência de forma.

#### 3.1 Resistência Friccional

Essa resistência é da ordem de 60% a 70% da resistência total do casco. Ela ocorre devido ao cisalhamento viscoso da água que flui sobre ele. Está essencialmente relacionada à área da superfície exposta à água e às velocidades sobre o casco. Dessa forma, para redução desse tipo de resistência, é desejável diminuir-se a superfície molhada, para uma determinada velocidade. Além disso, é desejável reduzir a rugosidade da superfície e evitar descontinuidades geométricas pronunciadas. Busca-se, também, um carenamento adequado e a redução de aberturas no casco ao mínimo necessário.

Para um dado volume, um casco esférico apresenta a menor superfície e, portanto, uma menor resistência friccional. No entanto, também se faz necessária a otimização dos requisitos de energia, o que

torna obrigatória a consideração dos aspectos propulsivos e do segundo componente de resistência, a resistência de forma.

#### 3.2 Resistência de Forma (ou de Pressão Viscosa)

Devido à viscosidade da água, seu fluxo em torno do submarino cria um gradiente de pressão não nulo. Esse gradiente origina uma componente de resistência que se opõe ao movimento da embarcação.

O formato do submarino induz um fluxo local com velocidades algumas vezes mais altas e outras vezes inferiores à velocidade média, ao longo do casco. Dessa forma, a média das tensões de cisalhamento é maior. Além disso, as perdas de energia na camada-limite, nos vórtices e nos pontos de separação de fluxo impedem o aumento da pressão de estagnação no corpo de popa, como previsto na teoria dos fluidos ideais. Nessa teoria, um corpo profundamente submerso não apresenta resistência (paradoxo de D'Alembert).

Na verdade, a resistência de forma está relacionada à razão de finura ( $L/D$ :  $L$  – comprimento; e  $D$  – diâmetro) do submarino e pode ser minimizada com seções transversais que variam lentamente ao longo do corpo, o que levou os projetistas a concluir que um casco em forma de “agulha” nos daria uma baixa resistência de forma.

Ocorre, entretanto, que as soluções para a diminuição da resistência de atrito e da resistência de forma são conflitantes. À medida que se alonga e afina o casco (redução da forma), ocorre um incremento em sua área molhada (aumento do atrito). Assim, soluções de compromisso são buscadas.

#### 3.3 Resistência de Ondas

Um navio navegando na superfície (ou um submarino navegando próximo a ela) cria um sistema de ondas que contribui para a resistência total. No caso de um submarino em cota profunda, conforme mencionado anteriormente, essa resistência não é levada em consideração.

#### 3.4 Considerações Básicas do Projeto

Na verdade, o objetivo é projetar a potência propulsora onde o fluxo muda sua direção. Uma distribuição esquemática do coeficiente de pressão não dimensional de um submarino é mostrada na Figura 3.

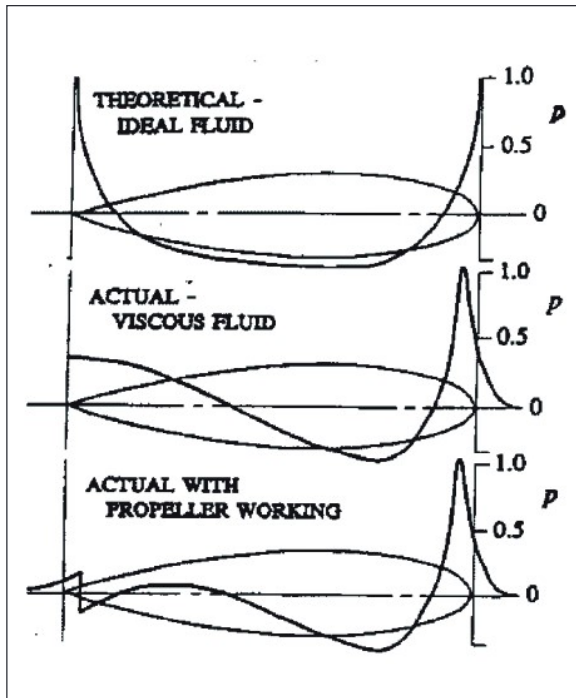


Figura 3: Coeficiente de pressão não dimensional.

Apesar de o projeto do casco ser sempre uma tarefa criativa que envolve muitas restrições e compromissos, é útil conhecer os seguintes fundamentos:

### 3.4.1 Fluxo Laminar

A resistência pode ser substancialmente reduzida se a camada-limite for mantida laminar ao longo da maior parte do casco. No final da década de 1960, os americanos realizaram testes com modelos que sugeriram reduções de arrasto em até 65%. Por um bom tempo, acreditava-se que os projetos de fluxo laminar poderiam desencadear uma revolução no projeto de submarinos. Porém, foi descoberto que o fluxo completamente laminar era impossível de ser conseguido devido às inúmeras impurezas presentes na água do mar e, portanto, as formas convencionais de casco continuaram a vigorar.

### 3.4.2 Influência de Alguns Parâmetros do Casco

Testes sistemáticos de modelos com  $L/D$  semelhantes aos dos submarinos foram realizados em 1950. As compensações dos modelos foram derivadas de um polinômio de grau 6. A investigação variou os seguintes parâmetros:

#### 3.4.2.1 Razão de finura ( $L/D$ )

A razão  $L/D$  exerce grande influência na resistência dos submarinos, uma vez que a superfície molhada depende muito dela para um determinado volume. Testes com modelos mostram que, com a razão  $L/D$  decrescente, a resistência friccional diminui linearmente, mas a resistência da forma aumenta mais rapidamente.

#### 3.4.2.2 Coeficiente Prismático ( $C_p$ )

O coeficiente prismático exerce uma influência significativa na resistência. A mudança na resistência é devido à mudança no arrasto residual, pois a superfície molhada quase não é afetada. O arrasto residual, relativamente alto, é causado pelo maior diâmetro e pela rápida mudança de inclinação no corpo de popa, que produz gradientes de pressão adversos e, consequentemente, o aumento da separação do fluxo na região.

Quando operando próximo à superfície, a resistência corresponde à de cota profunda. Assim, um casco com uma boa forma hidrodinâmica dificilmente aumentará a resistência na faixa de velocidades utilizadas durante o esnórquel. Contudo, neste caso, deve-se ter um cuidado especial com relação à resistência gerada pela vela, pois a resistência total pode ser aumentada em até 18%.

Um  $C_p$  maior e, consequentemente, um  $L/D$  mais favorável, sem aumento substancial da resistência, podem ser alcançados por meio da inserção de um corpo paralelo ao projeto (alongamento do casco). Um corpo paralelo intermediário (entre o corpo de proa e o corpo de popa) é desejável para aspectos de fabricação e reparo, pois uma forma de casco curvada exigiria um berço especial para docar o submarino.

#### 3.4.2.3 Corpo de Proa

Proas mais finas favorecem a baixa resistência e o baixo nível de ruído. Na literatura atual, não há consenso sobre a importância da forma da proa. Alguns autores afirmam que o formato da proa faz uma diferença substancial na resistência do casco e outros afirmam que uma proa projetada visando evitar a separação do fluxo contribuirá muito pouco para a resistência total do casco.

Na prática, o que se percebe nas medições em cascos em forma de gota é que há um pequeno aumento na resistência com o aumento do raio da proa, isto é,

construindo uma proa mais volumosa. Cabe ressaltar que as otimizações são limitadas por outras restrições de projeto, principalmente pelo número necessário de tubos de torpedo e pelo formato e posição dos sensores, os quais podem aumentar, significativamente, a resistência do submarino, caso não estejam adequadamente integrados à proa.

#### 3.4.2.4 Corpo de Popa

Sua forma não pode ser considerada isoladamente do hélice, pois este modifica, consideravelmente, o fluxo sobre o corpo de popa. Para um submarino, a aceleração do fluxo, devido ao funcionamento do hélice, impede a separação para grandes ângulos do cone de ré, em relação ao corpo paralelo. Um corpo de popa mais espesso é desejável por requisitos de espaço e distribuição de peso. Isso também contribui para uma menor resistência de atrito, pois apresentará uma menor superfície molhada e uma melhor razão  $L/D$ . Um cone de ré em formato de parábola atende a esses requisitos e proporciona um maior espaço para o compartimento de máquinas.

#### 3.4.2.5 Apêndices e Aberturas do Casco

Deve-se ter atenção para garantir uma curvatura suave do casco na direção das linhas de fluxo, bem como evitar apêndices o máximo possível.

Alguns apêndices (cabrestantes, cabeços, buzinas etc.) são absolutamente necessários, porém deverão ser bem hidrodinâmicos, removíveis ou projetados para serem rebatidos e nivelados à superfície do casco.

Certas aberturas (suspiros dos tanques de lastro, livre alagamento, alojamento de sensores etc.) não podem ser evitadas. Essas devem possuir o menor tamanho possível, uma vez que aumentam a resistência de atrito do casco. Em suma, apêndices, aberturas e a rugosidade da superfície do casco devem ser minimizados durante o projeto, pois podem contribuir negativamente para a resistência e cancelar os benefícios de uma operação mais silenciosa do submarino.

#### 3.4.2.6 Aspectos de Ruído e Reflexão SONAR

Embora a eficiência propulsiva e a resistência sejam os principais focos do projeto de cascos para submarinos, a baixa reflexão SONAR e o ruído, também, são características a serem consideradas.

No caso dos submarinos, diferentemente dos navios de superfície, as características de manobrabilidade podem ser consideradas como objetivos secundários do projeto. Um grande facilitador é que os requisitos de baixa resistência e baixo ruído hidrodinâmico não são conflitantes. Um formato hidrodinâmico de baixa resistência também atenderá às características de baixa emissão de ruídos.

A redução da reflexão SONAR através da forma do casco depende menos da resistência. Afirmações práticas e claras sobre esse assunto ainda não são possíveis na literatura atual. O melhor que há, nos dias de hoje, são algumas diretrizes básicas: superfícies e linhas côncavas devem ser evitadas, ou seja, a superfície externa do casco e dos apêndices deve ser convexa, em relação ao escoamento. A convexidade do casco e da vela são críticas neste ponto.

A força do contato no SONAR inimigo aumenta com o tamanho do nosso submarino. Um dado importante é que o aumento do comprimento do casco será mais relevante à força do contato SONAR do que o aumento do seu diâmetro. Ulrich Gabler, que foi um engenheiro de construção naval alemão, especializado no projeto e desenvolvimento de submarinos a diesel, desenvolveu uma fórmula simplificada que demonstra que a reflexão SONAR é proporcional ao quadrado do comprimento ( $L^2$ ) do submarino detectado. De acordo com os seus estudos, um submarino compacto e curto é preferível, quando olhamos por este ponto de vista.

#### 3.4.2.7 Vela

Diante de todos os requisitos hidrodinâmicos do casco, a existência da vela é totalmente indesejável. No entanto, todos os projetos exigem um apêndice grande e carenado acima do casco para abrigar o passadiço e os mastros.

Do ponto de vista hidrodinâmico, a vela deve ser tão fina quanto possível para minimizar a resistência e a assinatura acústica do submarino. Do ponto de vista prático, há uma limitação de quão estreita ela pode ser.

Um dos aspectos de projeto da vela diz respeito ao que acontece quando o submarino sai de uma cota profunda (no máximo 3 a 4 diâmetros abaixo da superfície e em velocidade moderada) e se aproxima da su-

perfície. O padrão de pressão ao redor do casco começará a criar ondas na superfície do mar antes mesmo de qualquer parte do submarino emergir. Naturalmente, quando operando na cota periscópica, a vela está mais próxima da superfície e as ondas geradas por ela podem interferir positivamente ou negativamente com as ondas geradas pelo casco.

Além da otimização do escoamento através do casco, a redução da detecção SONAR tem um grande impacto na geometria da vela. Com esse objetivo, alguns projetos visam inclinar a superfície da vela para ré e integrá-la o máximo possível ao casco. Isso diminui a formação de vórtices e reduz a detecção SONAR do meio pelo inimigo. A curvatura da parte de vante da vela (bordo de ataque) pode ser otimizada para reduzir a pressão de interferência, eliminando uma fonte potencial de perturbação hidrodinâmica.

#### 4 CONCLUSÃO

O casco de um submarino possui dois componentes principais, o casco resistente e o casco não resistente. O casco não resistente é o casco externo, não estanque, que fornece ao submarino um formato hidrodinâmico mais eficiente. O casco resistente é o casco interno de um submarino, o qual mantém a integridade estrutural com a diferença entre pressão externa e interna, quando mergulhado. O projeto desses dois cascos é distinto, mas juntos devem satisfazer a diversos requisitos e relações de compromisso entre eles.

Submarinos modernos são geralmente em forma de “charuto”. Esse formato já era observado em submarinos muito mais antigos. Ele possui a vantagem de reduzir, significativamente, o arrasto hidrodinâmico de um submarino mergulhado, à custa de menor manobrabilidade e menor capacidade de suportar condições severas de mar, quando na superfície. Vale ressaltar que esse formato aumenta o arrasto quando o meio não está mergulhado.

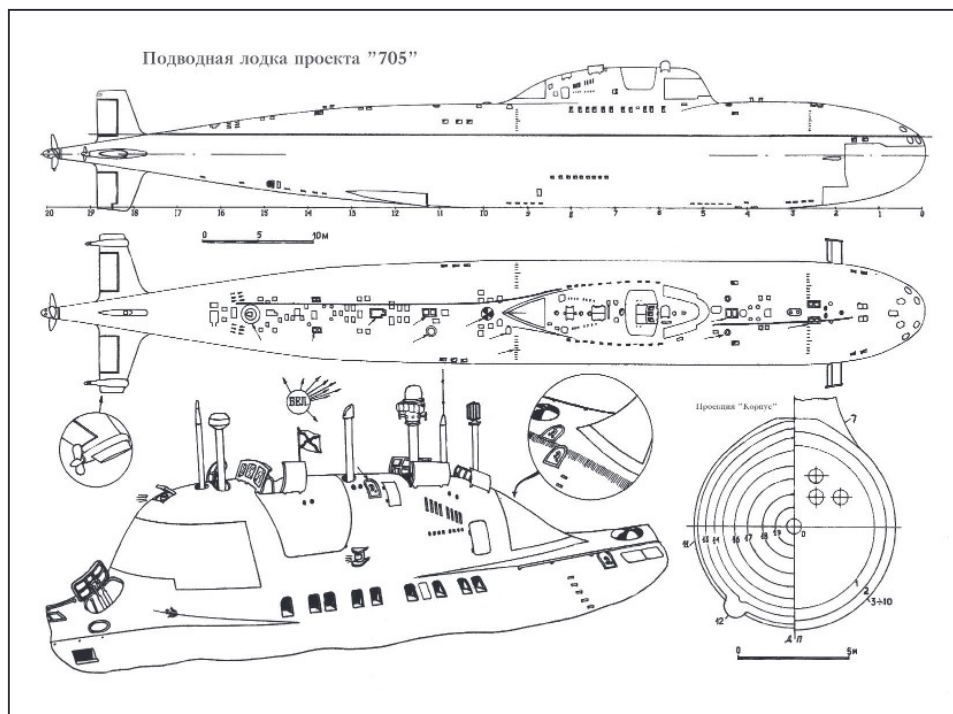


Figura 4: Projeto de uma vela menos saliente.

**REFERÊNCIAS**

BURCHER, Roy; RYDILL, Louis. Concepts in submarine design. Melbourne:Cambridge University Press, 1994.

GABLER, Ulrick. Submarine design. 4. ed. Munich: Bernard & Graefe Verlag, 2000.

PEREIRA, Michel Enrique. Modelo de otimização multiobjetivo aplicado ao projeto de concepção de submarinos convencionais. São Paulo: Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Mestre em Engenharia, 2016.

SUBMARINE hull. Wikipédia. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Submarine\\_hull](https://en.wikipedia.org/wiki/Submarine_hull). Acesso em: 20 jul. 2020.