



Instituto Panamericano de Ingeniería Naval

Instituto Pan-americano de Engenharia Naval
Pan-american Institute of Naval Engineering

XI CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL, TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA.

PROJETO DO CASCO RESISTENTE DE SUBMARINOS

PAPER N° **29**

MIGUEL ANGEL BUELTA MARTINEZ

Profesor EPUSP, Centro de Pesquisas em Engenharia Naval e Oceanica
BRASIL

PROJETO DO CASCO RESISTENTE DE SUBMARINOS

Buelta, M.A.M. (*)

RESUMO

Neste trabalho são aplicados três critérios para o projeto do casco cilíndrico resistente de submarinos, baseados nas especificações DDS 9110-8, BS 5500 e BV 1041-2. Os critérios são utilizados na execução do projeto de cascos para uma família de submarinos, e, da análise e comparação entre os resultados de cada critério, define-se qual deles é mais apropriado, estabelecem-se condições para a escolha da resistência do aço a ser utilizado e respondem-se outras questões que, naturalmente, surgem quando se executa o projeto estrutural do casco resistente de submarinos.

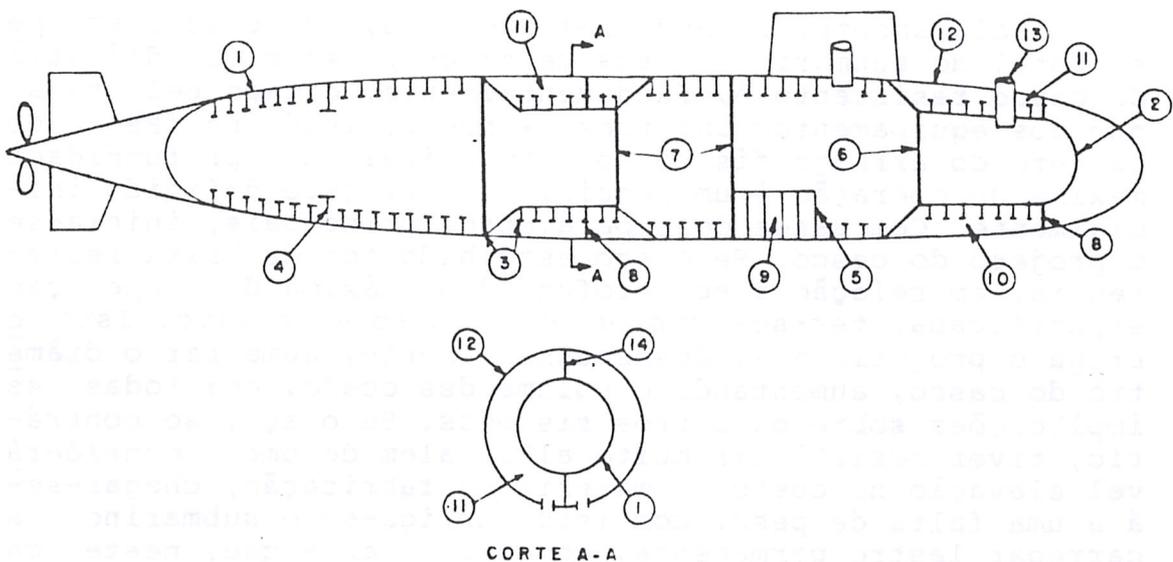
ABSTRACT

Three design criterias of the submarines cylindrical pressure hull, from DDS 9110-8, BS 5500 and BV 1041-2 specifications, are used and tested in the designing tack for an adequate series of submarines. From the analysis of results, a design criteria is selected and conditions for appropriate choice of the hull are established. Further information, including other appurtenant details which normally must be considered in the design of such kind of structure, are also provide.

(*) Miguel Angel Buelta Martinez, Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Centro de Pesquisas em Engenharia Naval e Oceânica.

1. INTRODUÇÃO

A estrutura típica de um submarino é constituída de um casco resistente, cilíndrico, reforçado interna ou externamente por cavernas circulares, e completada através das anteparas, cavernas gigantes, troncos cônicos e calotas de proa e popa, conforme a figura 1. Deve, fundamentalmente, resistir à pressão hidrostática à qual estará submetida durante a operação em imersão.



- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. CASCO RESISTENTE E CAVERNAS | 8. HASTILHAS |
| 2. CALOTA DE PROA | 9. TANQUE DE LASTRO INTERNO |
| 3. INTERSECÇÃO CONE-CILINDRO | 10. TANQUE DE LASTRO EXTERNO |
| 4. ANEL GIGANTE | 11. TANQUE DE LASTRO PRINCIPAL |
| 5. ANTEPARA ESTANQUE | 12. CASCO NÃO RESISTENTE |
| 6. ANTEPARA DE SEGURANÇA | 13. ESCOTILHA |
| 7. ANTEPARA DE SUBDIVISÃO | 14. DIVISÃO DE TANQUE |

Figura 1 - Estrutura Típica de um Submarino

A distância entre anteparas ou gigantes é um fator fundamental na determinação da pressão máxima de operação do submersível, pois dela resulta a extensão entre apoios transversais para o casco resistente.

No caso da necessidade de mudança de diâmetro ao lon

go do comprimento do casco resistente, recorre-se à regiões de transição do tipo tronco de cone, reforçados por cavernas.

No projeto estrutural, o casco externo resistente é, de longe, o que possui a maior importância, pela responsabilidade deste na segurança do veículo. Seu dimensionamento vai depender de três parâmetros principais: o seu diâmetro, resistência do aço utilizado, principalmente pela sua tensão de escoamento, e a profundidade máxima de operação do submersível. Entender como essas variáveis se relacionam e como elas influenciam no dimensionamento é o primeiro, e principal, objetivo deste trabalho. Para tanto, vai-se lançar mão dos critérios de projeto das Marinhas dos países mais avançados, elaborados ao longo de muitos anos de pesquisas teóricas e experimentais.

Isoladamente, o casco resistente é, em relação ao peso total do submarino, a sua maior componente. O diâmetro do casco resistente é, fundamentalmente, ditado pelo tamanho dos equipamentos internos, sendo definido na fase do projeto do arranjo físico do submersível. A profundidade máxima de operação é um requisito de projeto definido inicialmente. Com esses dois parâmetros principais, inicia-se o projeto do casco. Se o aço escolhido for de baixa resistência, em relação à sua profundidade máxima de operação especificada, ter-se-á o problema de peso excessivo. Isto obriga o projetista a, desnecessariamente, aumentar o diâmetro do casco, aumentando o volume deslocado, com todas as implicações sobre os outros sistemas. Se o aço, ao contrário, tiver resistência muito alta, além de uma considerável elevação no custo do material e fabricação, chegar-se-á a uma falta de peso. Com isto, obriga-se o submarino a carregar lastro permanente, com o agravante que, neste caso, passa-se a utilizar uma casca muito fina. Isto faz com que a flambagem elástica comande os mecanismos de falha estrutural, não se utilizando toda a capacidade de resistência do material. O início de escoamento não é atingido e a estrutura já está em processo de falha. Percebe-se, daí, que deve existir, em cada caso, um grau de resistência do aço, que mais se adapte. Determinar esse aço é uma das principais questões a serem solucionadas no projeto.

2. FALHAS ESTRUTURAIS DO CASCO RESISTENTE

Os principais tipos de falhas do casco resistente, com menor ou maior comprometimento estrutural, que devem ser alvo de atenção por parte do engenheiro, são descritos a seguir. O cálculo das profundidades do submersível em que essas falhas vão ocorrer, depende de cada critério de projeto. A denominação, não ortodoxa, aqui empregada, para cada tipo de falha, é aquela tradicionalmente usada na literatura sobre o assunto. Elas são classificadas em função da extensão do submersível que abrangem.

- Colapso do casco entre cavernas: esta falha pode ocorrer por flambagem elástica, flambagem inelástica ou escoamento. Depende do espaçamento entre cavernas, diâmetro do cilindro, espessura do casco, módulo de elasticidade e tensão do escoamento do material. A ocorrência primeira de um dos três tipos vai depender das relações entre estes parâmetros, podendo acontecer com ou sem a formação de lóbulos ao longo da circunferência, como na figura 2.
- Flambagem das cavernas e gigantes: esta pode ocorrer de forma elástica ou inelástica no próprio plano da caverna (figura 3.a) ou fora de seu plano (flambagem lateral, figura 3.b). Em ambos os casos, ocorre com a formação de lóbulos circunferenciais.

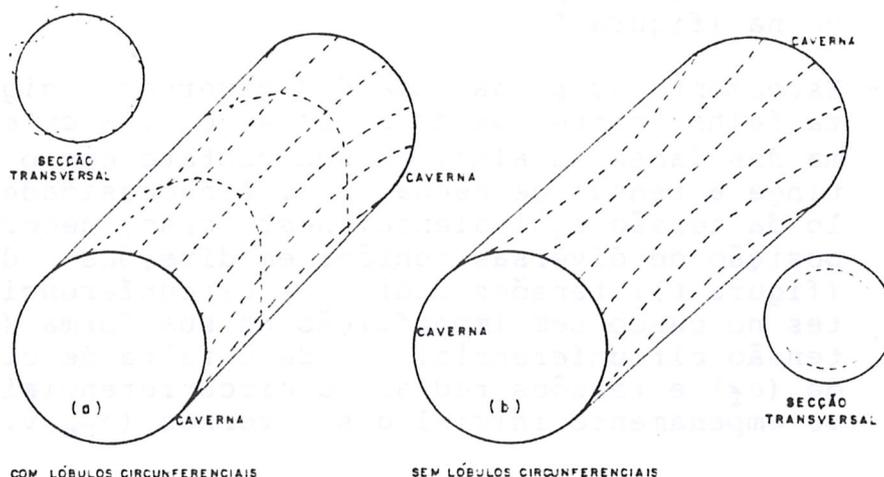


Figura 2 - Colapso do Casco entre Cavernas

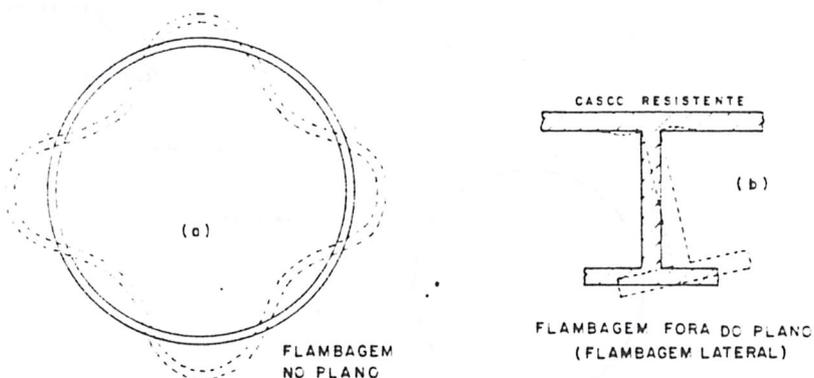


Figura 3 - Flambagem das Cavernas

- Flambagem global: ocorre com a formação de ondulações circunferenciais e longitudinais entre anteparas ou gigantes, no casco, vindo a "carregar" também as cavernas (figura 4).
- Escoamento do flange das cavernas e gigantes: se o casco fosse perfeitamente circular, esta falha seria alcançada quando a tensão normal, praticamente uniforme, de compressão, agente na secção da caverna e ao longo de toda a circunferência, atingisse a tensão de escoamento. Porém, este fato seria antecedido pela falha do casco resistente através de uma das formas já vistas. Ocorre que, os processos de fabricação tendem a induzir imperfeições que afastam o casco resistente de sua forma perfeitamente circular (falta de circularidade). Nestas condições, a tensão normal de compressão constante adiciona-se à tensão normal de flexão local, fazendo com que se atinja o escoamento em pontos isolados do flange livre da caverna (figura 5).
- Escoamento do pé da alma das cavernas e gigantes: esta falha ocorre quando a tensão equivalente (σ_{eq}) numa das faces da alma, em seu contato com o casco atinge a tensão de escoamento. A necessidade do cálculo da tensão equivalente, neste caso, decorre da composição de diversas tensões em direções diferentes (figura 6): tensões radiais e circunferenciais agentes no casco sem imperfeição na sua forma (σ_r ; σ_c); tensão circunferencial devida à falta de circularidade (σ_f) e tensões radiais e circunferenciais devido ao empenamento inicial das cavernas (σ_{re} ; $v \cdot \sigma_{re}$).

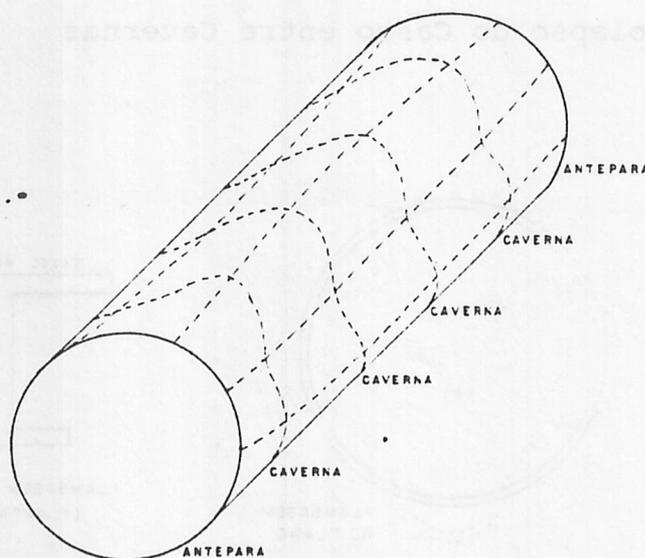


Figura 4 - Flambagem Global

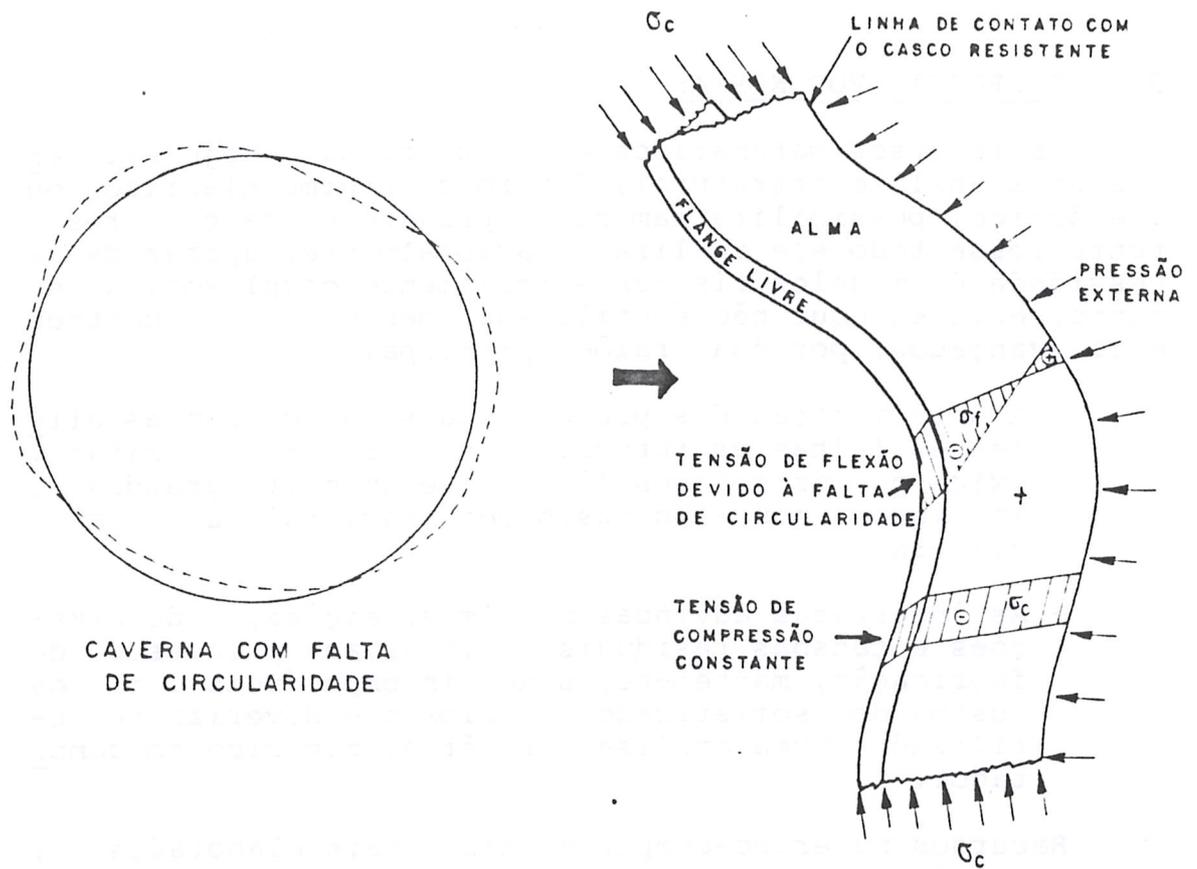


Figura 5 - Escoamento de Pontos do Flange das Cavernas
(Tensão Total = $\sigma_c + \sigma_f$)

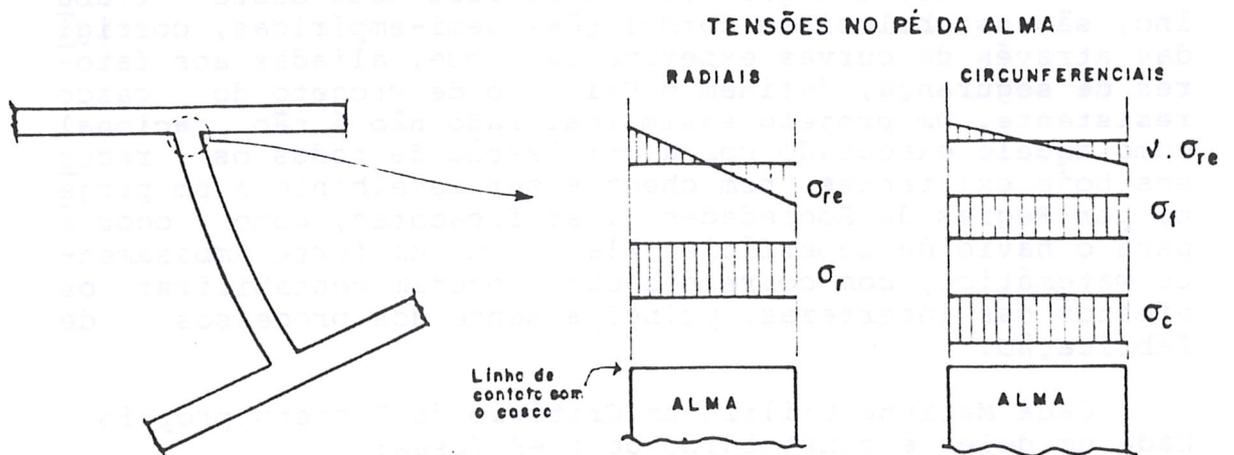


Figura 6 - Tensões no Pé da Alma de uma Caverna Empenada

3. O PROJETO POR NORMAS

Os recursos matemáticos e computacionais hoje existentes para análise estrutural, dentro do regime elástico ou inelástico, possibilitariam que o projeto do casco resistente fosse todo ele realizado racionalmente, apesar da necessidade de modelos físicos extremamente complexos. No entanto, este enfoque não é utilizado, mesmo, nos centros mais avançados, por duas razões principais:

- A determinação das profundidades que causam as diferentes falhas estruturais anteriormente descritas, exige que os modelos físicos sejam muito grandes, implicando num alto custo computacional e de mão-de-obra.
- As incertezas advindas das imperfeições, deformações e tensões residuais, devidas aos processos de fabricação, mantêm-se, sendo incompatíveis com os custos dos sofisticados modelos que deveriam ser utilizados numa análise por método numérico em computador.

Recursos numérico-computacionais, mais elaborados, por conseguinte, costumam ser empregados somente na fase final do projeto, de modo a trazer segurança e confiança adicionais aos resultados obtidos pelo projetista.

O que se utiliza, mais assiduamente, no desenrolar do projeto, são as Normas de Projeto ou Critérios de Projeto, desenvolvidos ao longo de muitos anos de pesquisas e trabalhos. As formulações analíticas, reunidas nas normas, são estabelecidas a partir de modelos matemáticos, aferidos através de uma série de ensaios estruturais em modelos reduzidos e em verdadeira grandeza. Como resultado deste trabalho, são estabelecidas formulações semi-empíricas, corrigidas através de curvas experimentais que, aliadas aos fatores de segurança, definem o Critério de Projeto do casco resistente. Um projeto assim realizado não é tão racional como aquele executado com a utilização de todos os recursos hoje existentes, nem chega a ser semelhante a um projeto por Regras de Sociedades Classificadoras, como ocorre para o navio de superfície. Ele possui um forte embasamento matemático, com correções que procuram contabilizar os efeitos das incertezas, principalmente dos processos de fabricação.

Cada Marinha utiliza um Critério de Projeto próprio. Cada um deles é constituído de três fases:

- Hierarquia das Falhas Estruturais:

Cada critério considera algumas das falhas anteriormente citadas. Impõe que essas falhas ocorram numa certa ordem, conforme a pressão externa, sobre o casco resistente, vá aumentando. A primeira das falhas a ocorrer vai de

finir a profundidade máxima de operação.

- Modelo de Análise Estrutural:

Cada critério tem seus próprios modelos físicos e matemáticos, analítico-experimentais, para determinação das profundidades de ocorrências das falhas estruturais consideradas.

- Fator de Segurança:

A profundidade em que ocorre a primeira falha estrutural é, convencionalmente, chamada de profundidade de colapso (H_{CO1}). A pressão correspondente (P_{CO1}) é utilizada no cálculo de resistência estrutural. Por sua vez o submersível possui, como requisito de projeto, uma profundidade máxima de operação (H_{Op}), com a respectiva pressão (P_{Op}). Cada critério define um fator de segurança (FS), dado pela relação entre essas profundidades (H_{CO1}/H_{Op}).

Evidentemente, estas três fases são inseparáveis. A hierarquia das falhas estruturais de um critério não pode ser utilizada com o modelo de análise estrutural de outro critério. Nem este com o fator de segurança de um terceiro.

O casco resistente de um submarino, projetado por um critério, via de regra, não é aprovado por outro critério. Isto não significa que, a priori, um ou outro critério seja melhor ou pior. Todos eles estão sendo utilizados, pelas respectivas Marinhas. Significa apenas que o enfoque é diferente. Um critério de projeto já estabelecido, só pode ser avaliado após muito tempo de utilização e operação dos submarinos projetados segundo seus procedimentos.

Três diferentes Critérios de Projeto foram exaustivamente estudados, analisados e interpretados, a saber:

- Critério Americano:

Cujo Modelo de Análise Estrutural está explicitado na especificação americana DDS 9110-8 [1]. As fases referentes à Hierarquia das Falhas Estruturais e Fator de Segurança foram conseguidas a partir da análise de submarinos sabidamente projetados por este critério.

- Critério Inglês:

As três fases do critério estão explicitadas na especificação inglesa BS 5500 [2].

- Critério Alemão:

Cujo Modelo de Análise Estrutural está explicitado na especificação alemã BV 1041-2 [3]. Também aqui, as duas outras fases foram obtidas da análise de projetos anteriores,

sabidamente realizados segundo este critério.

4. O PROJETO DE UMA FAMÍLIA DE CASCOS RESISTENTES

Parte-se agora para o projeto estrutural de cascos cilíndricos resistentes, utilizando os três critérios selecionados. Da análise dos resultados, procurar-se-á entender como se relacionam o diâmetro do casco, a resistência do aço e a profundidade de operação do submarino, fornecer condições para escolha da resistência do aço a ser utilizado, dar indicações da melhor forma de utilização desses critérios, enfim, procurar atingir os objetivos deste trabalho.

Para o projeto de um casco específico, os seguintes dados de entrada são necessários:

- Arranjo físico: raio interno do casco (R_i), distância entre gigantes (L_g) e distância entre anteparas ou seções transversais rígidas (L_b).
- Aço: tensão de escoamento (σ_v ou $\sigma_{0,2}$), módulo de elasticidade (E), limite de proporcionalidade (σ_p).
- Profundidade máxima de operação (H_{op}).

Um arranjo estrutural é definido pelo conjunto das variáveis (figura 7).

- Casco: espessura (t), espaçamento de cavernas (L_c).
- Cavernas: altura da alma (d), espessura da alma (e_w), largura do flange (f) e espessura do flange (e_f).
- Gigantes: idem às cavernas.

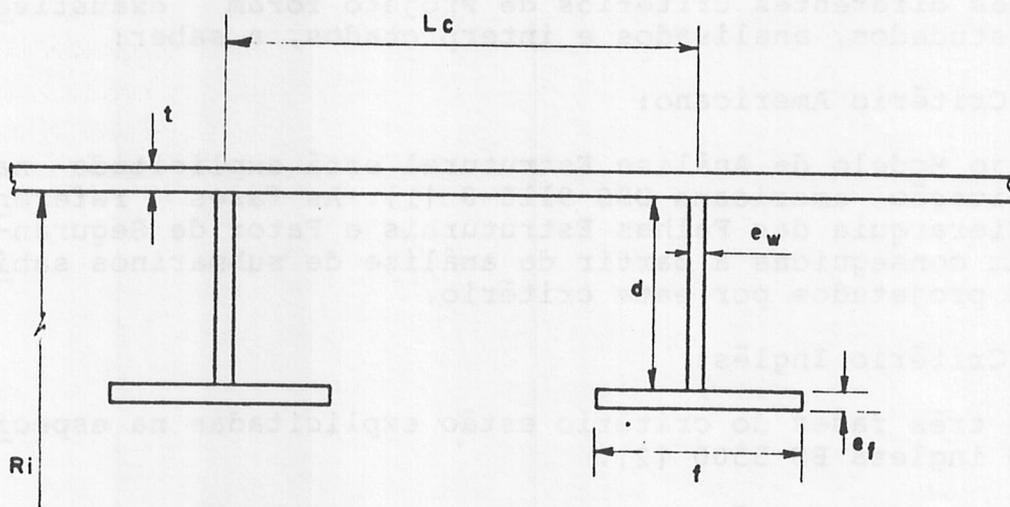


Figura 7 - Arranjo estrutural típico

De modo a obter as informações necessárias para atingir os objetivos deste trabalho, uma família de cascos é projetada, variando-se os dados de entrada mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Variação dos dados de entrada para a família de cascos cilíndricos

RAIO INTERNO (R_i - mm)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (σ_y - N/mm ²)	PROFUNDIDADE MÁXIMA DE OPERAÇÃO (H_{op} - m)
2500	322 (HTS)	200
3500	599 (HY 80)	350
4500	895 (HY 130)	500

Para cada caso, as faltas de circularidade máximas estipuladas em projeto ($B_{o_{proj}}$) são dadas na tabela 2.

Tabela 2 - Faltas de circularidade máximas utilizadas

CRITÉRIO	$B_{o_{proj}}$
Americano	$t/2$ (*)
	$0,5\%R$ (**)
Inglês	$0,5\%R$ (*)
Alemão	$0,3\%R$ (*)
	$0,5\%R$ (**)

(*) Os primeiros valores correspondem aos utilizados, neste trabalho, para os critérios de projeto.

(**) O valor $0,5\%R$ é utilizado para que, tomando uma mesma base, os três critérios possam ter comparados o peso estrutural resultante.

É feita a combinação de todos estes dados. Desta forma, para o critério americano são projetados 54 cascos (3 raios x 3 tensões de escoamento x 3 profundidades x 2 faltas de circularidade), o mesmo ocorrendo para o critério alemão. Para o critério inglês são projetados 27 cascos (somente 1 falta de circularidade).

Alguns dos dados de entrada não são alterados para toda a família de cascos, a saber:

- Distância entre gigantes (L_g): é tomado um valor fixo, igual a $3 * R_i$ (ver figura 8), que corresponde a um comprimento tipicamente utilizado.
- Distância entre anteparas (L_b): tomado um valor correspondente a três compartimentos ($9 * R_i$), como mostrado na figura 8.
- Módulo de elasticidade (E): tomado o valor de 206000 N/mm^2 , para todos os aços.

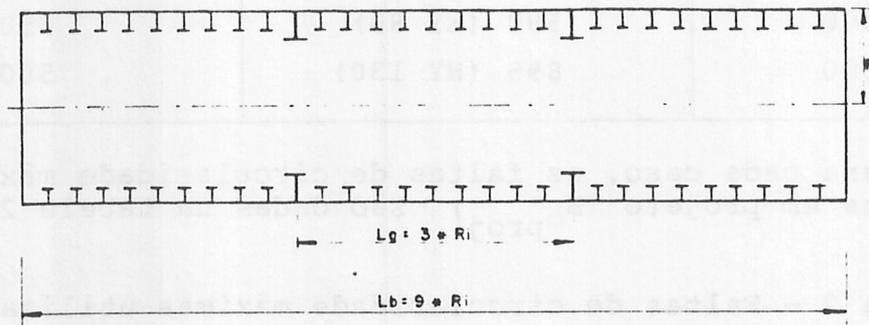


Figura 8 - Valores Fixos para os Compartimentos

Todos os cascos são projetados com cavernas internas tipo T. De modo a que o espaço interno não seja prejudicado, procura-se fazer com que as cavernas não possuam uma altura excessiva. Sempre que possível, a sua altura total (altura da alma + espessura do flange) é mantida abaixo de 7,5% do raio interno, que é um valor típico obtido de levantamentos efetuados.

Procura-se, ainda, que o arranjo estrutural tenha, sempre que possível, características que facilitem sua fabricação, tais como:

- Espessura do flange igual à espessura do casco, facilitando a aquisição de material.
- Distância entre cavernas não muito pequena, principalmente o vão livre deixado entre flanges, de modo a facilitar a soldagem casco-cavernas e a prover espaço suficiente, entre elas, para acomodação de pequenos equipamentos e passagem de cabos e tubulações. Um vão livre entre flanges menor que 290mm já será considerado desvantajoso, neste trabalho.

Além do mais, quando possível, busca-se uma solução em que o colapso do casco entre cavernas não seja por flambagem.

bagem elástica e sim por flambagem inelástica ou escoamento. Só desta forma estar-se-á utilizando toda a capacidade de resistência do aço em questão. Uma solução é obtida quando um arranjo estrutural satisfaz todos os requisitos do critério de projeto, sob o qual está sendo projetado o casco. A partir dos dados de entrada, são estimadas as variáveis correspondentes ao casco, cavernas e gigantes e, analisando o arranjo estrutural resultante, verifica-se se a hierarquia das falhas e o fator de segurança estão de acordo com o critério de projeto. Assim é que uma alteração em qualquer das variáveis implica em modificações nas diversas profundidades da falha. Isto faz com que outra, ou outras variáveis devam ser mudadas e assim sucessivamente, até a obtenção de uma solução estrutural.

O cálculo das soluções estruturais foi executado com a utilização dos programas desenvolvidos, respectivamente, para cada critério: DDS 9110-8 (critério americano), BS 5500 (critério inglês) e BV 1041-2 (critério alemão).

Estes programas, fornecidos os dados de entrada (R_i , L_g , ... σ_y , H_{op}) e o arranjo estrutural (t , L_c , d ...) calculam as várias profundidades de falha do casco resistente ou as imperfeições admissíveis.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Evidentemente, para um certo conjunto de dados de entrada, existem várias soluções estruturais. Procurou-se sempre escolher, entre as obtidas, as de menor peso, desde que aceitáveis do ponto de vista de fabricação.

Os arranjos estruturais obtidos podem ser colocados na forma exemplificada na tabela 3, para alguns casos do critério americano. Em alguns casos, estão sendo usadas espessuras exageradamente altas. Correspondem a soluções fora da faixa normal de projeto do casco cilíndrico e estão sendo mantidas, a fim de que possam ser completadas as curvas de peso estrutural que serão traçadas.

A grandeza P/Δ corresponde à relação entre o peso do compartimento estrutural, de comprimento $3 \cdot R_i$ (com ρ aço = 7,85 ton/m³), e o peso do volume da água deslocada pelo casco (com $\rho_{\text{água}}$ = 1,03 ton/m³). Levantamentos efetuados em submarinos de projeto recente, mostraram que essa relação varia entre $P/\Delta = 0,17$ e $0,22$, com grande número de casos em $0,20$.

Nas figuras 9 a 11 mostram-se os resultados de P/Δ em função H_{op} e σ_y , para os três critérios, conjuntamente, e para uma mesma falta de circularidade de projeto ($B_{o\text{proj}} = 0,5\%R$).

FIGURA 9 - R_i = 2500 T

P/Δ A FUNDAÇÃO DE σ_y ,
PARA OS TRÊS CRITÉRIOS
COM $B_{proj} = 0,5 \% R$

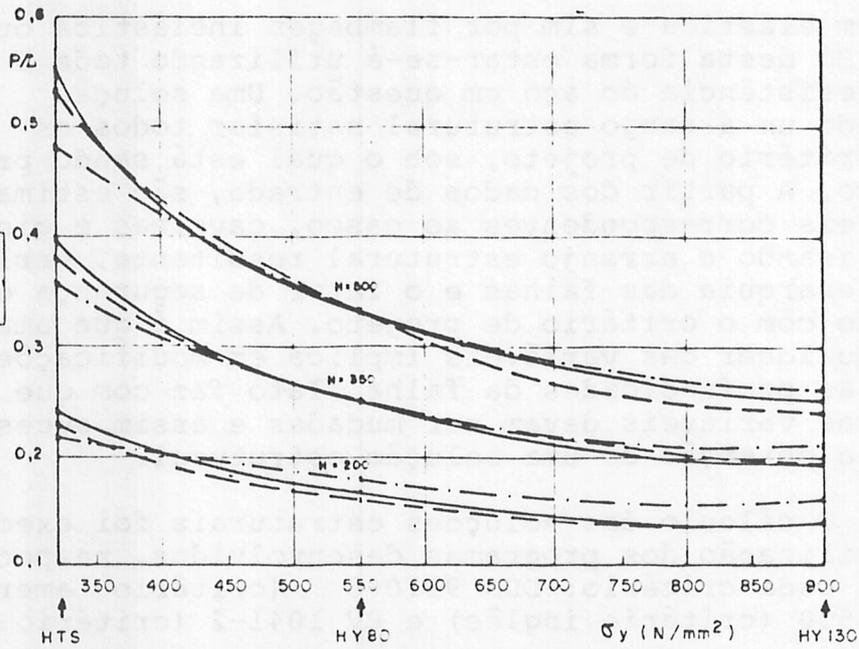


FIGURA 10 - R_i = 3500 m

— AMERICANO
- - - ALEMÃO
- · - INGLÊS

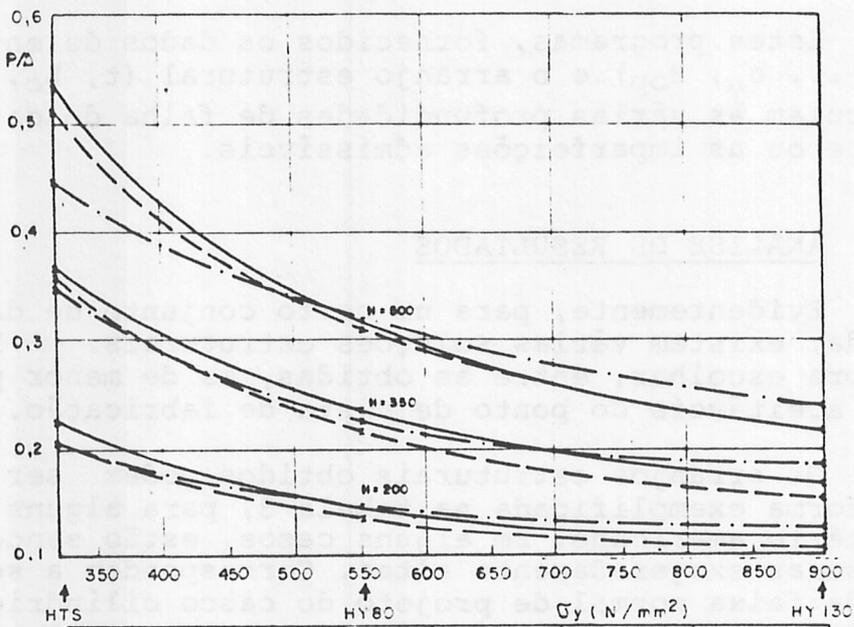


FIGURA 11 - R_i = 4500 m

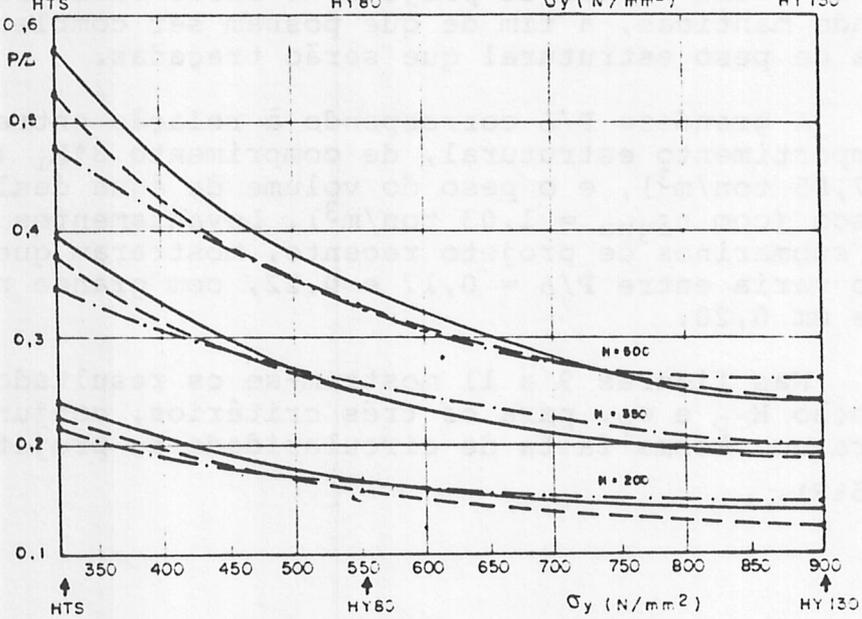


Tabela 3 - Soluções para o critério americano

Raio interno - $R_i = 2500 \text{ mm}$

Falta de circularidade = $t/2$

		Resultados (mm e ton)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (N/mm^2)			
			322	551	895	
PROFUNDIDADE MÁXIMA DE OPERAÇÃO (m)	200	t	25	16	13	
		L_c	350	355	350	
		Cavernas	dx_{ew}	105x15	88x15	84x8
			fx_{ef}	75x25	63x16	65x13
		Gigantes	dx_{ew}	358x25	358x21	321x28
			fx_{ef}	268x38	268x26	240x40
		P	36,22	23,93	20,07	
		P/Δ	0,23	0,16	0,13	
		t	44	27	19	
		L_c	460	370	400	
	350	Cavernas	dx_{ew}	145x28	119x10	105x12
			fx_{ef}	105x44	80x27	80x19
		Gigantes	dx_{ew}	420x44	392,27	368x28
			fx_{ef}	315x66	294x41	276x40
		P	66,02	38,01	28,50	
		P/Δ	0,42	0,25	0,19	
	500	t	55	37	24	
		L_c	340	400	391	
		Cavernas	dx_{ew}	170x37	135x10	118x16
			fx_{ef}	90x55	105x37	90x24
Gigantes		dx_{ew}	494x54	427x37	412x28	
		fx_{ef}	370x82	320x55	310x42	
P		92,16	53,05	36,77		
P/Δ		0,58	0,34	0,24		

Da análise dos resultados obtidos, e desses gráficos, pode-se concluir:

- O critério alemão é o que, na faixa usual de utilização ($P/\Delta \approx 0,20$), via de regra, leva às soluções estruturais mais leves.
- Entre o critério americano e inglês, o primeiro leva a soluções mais leves para aços com resistência superior à faixa de HY80 e mais pesadas, para aços menos resistentes.
- Na faixa usual de utilização, o critério alemão é o que leva a cavernas de maior altura, seguido do inglês, com a desvantagem de propiciar menor espaço interno.
- Nessa mesma faixa, o critério alemão apresenta as soluções com maior espaçamento de cavernas, facilitando a fabricação, vindo a seguir o critério americano.
- Ainda nessa faixa, o critério americano apresenta algumas soluções em que o colapso do casco, entre cavernas, ocorre por flambagem elástica, caracterizando uma má utilização do material.

Na tabela 4, estas conclusões são apresentadas de forma resumida. Ela serve para que o projetista possa, em cada caso, optar por um ou outro critério.

Tabela 4 - Comparação entre as soluções estruturais dos três critérios

PARÂMETRO DE COMPARAÇÃO	CRITÉRIO		
	AMERICANO	INGLÊS	ALEMÃO
PESO ESTRUTURAL	MAIOR P/AÇO COM RESISTÊNCIA MENOR QUE HY80	MAIOR P/AÇO COM RESISTÊNCIA MAIOR QUE HY80	MENOR
ALTURA DAS CAVERNAS	MENOR	MÉDIO	MAIOR
ESPAÇAMENTO DE CAVERNAS	MÉDIO	MENOR	MAIOR

Tanto pela observação das curvas P/Δ , como das tabelas de resultados, verifica-se que o valor de P/Δ independe do raio do casco resistente, mantidos os outros dados de entrada. As diferenças de um para outro raio ($R_i = 2500; 3500; 4500$) são devidas ao próprio arredondamento dos valores a-

presentados, principalmente na faixa usual de utilização. Apesar da solicitação estrutural completamente distinta, ocorre aqui o mesmo que acontece para um vaso de pressão interna, sem cavernas, onde P/Δ também independe do raio. Este fato faz com que as curvas de P/Δ em função de H_{op} ou σ_y possam ser obtidas, para uma faixa maior desses parâmetros, para um certo raio, podendo posteriormente serem usadas para qualquer outro raio. Isto é feito, projetando-se mais alguns cascos resistentes até $H_{op} = 650$ m e $\sigma_y = 1240$ N/mm², para $R_i = 3500$ mm. Os resultados obtidos constam das figuras 12 a 14.

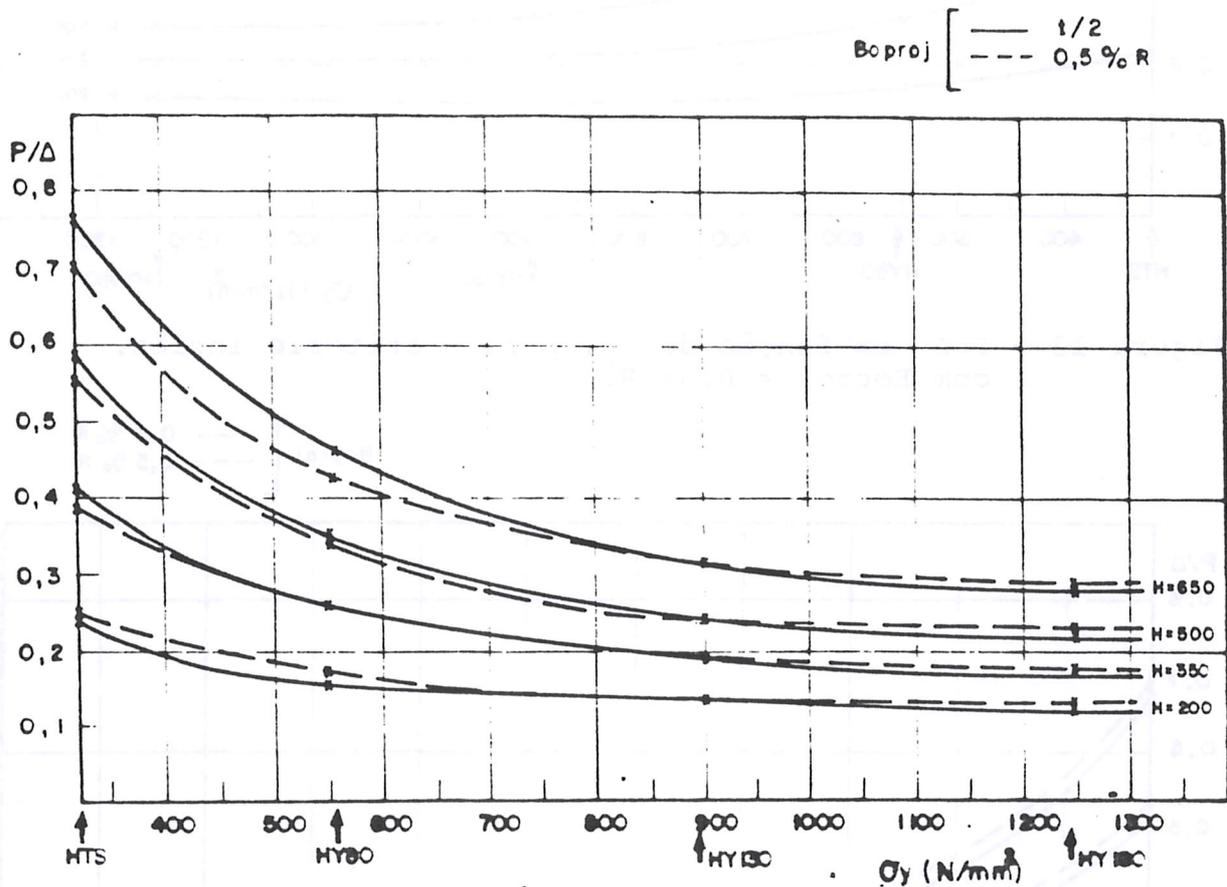


Figura 12 - P/Δ em Função de σ_y , para o Critério Americano

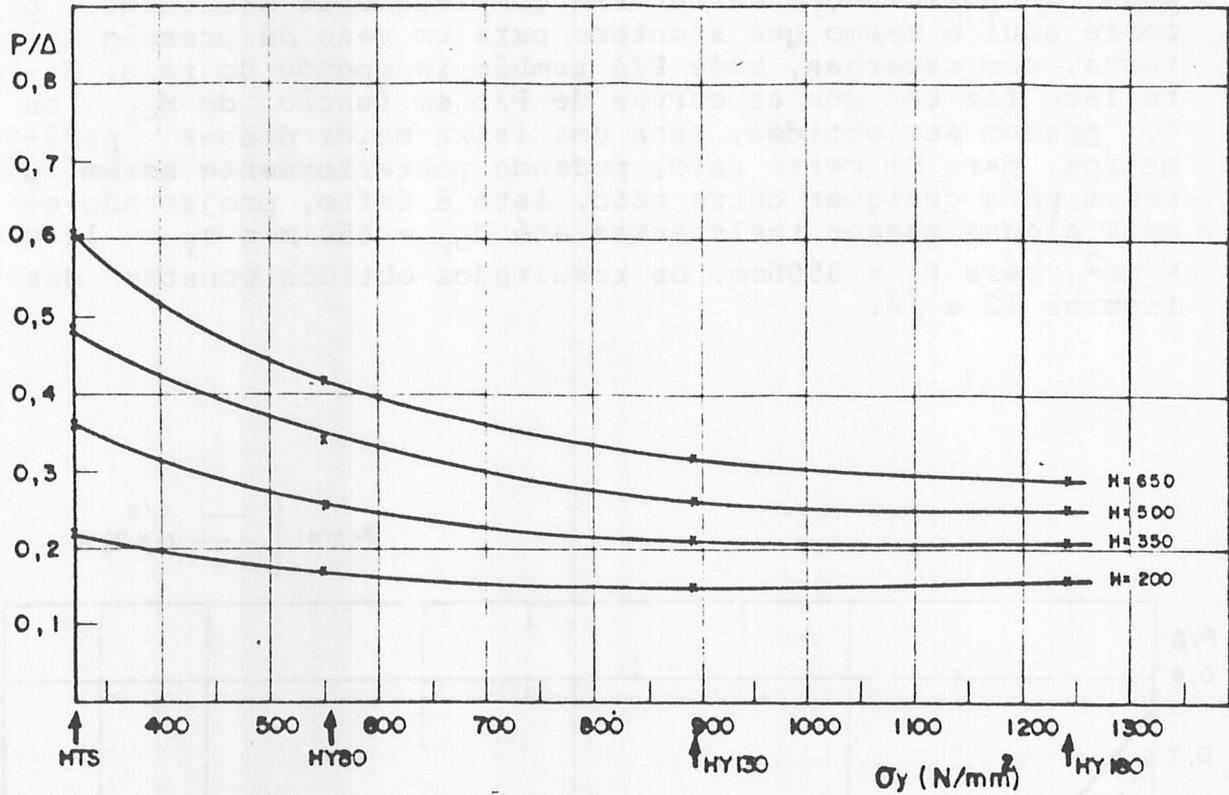


Figura 13 - P/Δ em função de σ_y , para o critério inglês.
com $Boproj = 0,5\% R$.

$Boproj$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{—} \quad 0,3\% R \\ \text{- - -} \quad 0,5\% R \end{array} \right.$

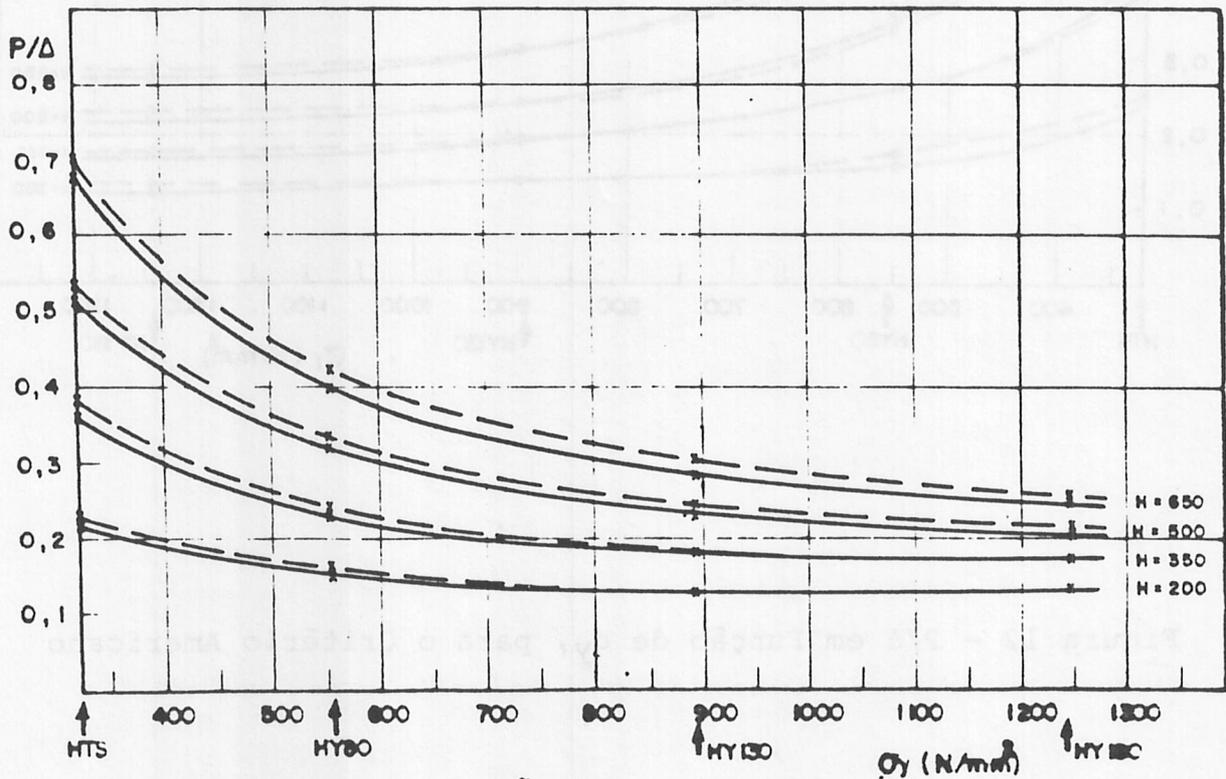


Figura 14 P/Δ em função de σ_y , para o critério alemão

As curvas de P/Δ x σ_y servem para a determinação da resistência do aço a ser utilizado num dado projeto, para qualquer H_{op} através de interpolações, já sendo conhecidos os outros pesos que compõem o submarino. As curvas também servem, mesmo antes de conhecer-se o peso de qualquer componente, para estimar qual aço deva ser usado, se considerarmos a faixa usual de utilização até, por exemplo, $P/\Delta=0,22$. Por exemplo, no critério alemão (figura 14) tem-se:

- Aço HTS ($\sigma_y = 322 \text{ N/mm}^2$) deve ser utilizado até 200m de profundidade máxima de operação.
- Aço HY 80 ($\sigma_y = 551 \text{ N/mm}^2$) até 330m.
- Aço HY 130 ($\sigma_y = 895 \text{ N/mm}^2$) até 480m.
- Aço HY 180 ($\sigma_y = 1240 \text{ N/mm}^2$) até 600m.

Isto pode, analogamente, ser levantado para os outros dois critérios.

A observação das curvas de P/Δ x σ_y revela, ainda, dois outros aspectos importantes:

- Para uma certa profundidade máxima de operação, existe uma resistência limite para o aço a ser utilizado. Ao escolher aços de maior resistência, nada se ganha em peso estrutural, pois o seu valor mínimo já foi atingido. É a faixa, a partir da qual, a flambagem elástica passa a comandar os mecanismos de falha. Aumentar a tensão de escoamento não altera esse comportamento, pois essa resistência já está sendo sub-utilizada. Assim é que, por exemplo, para o critério alemão, para $H_{op} = 200\text{m}$, um aço com resistência superior ao HY130, não altera em nada o peso estrutural.
- Se considerarmos que existe um limite superior para P/Δ , acima do qual o projeto é inviável, pode-se dizer que o material aço não poderá ser utilizado para grandes profundidades máximas de operação, mesmo que viesse a possuir uma altíssima resistência ao escoamento. Veja-se, por exemplo, a figura 12 do critério americano. Para $H_{op} = 650\text{m}$ o valor de P/Δ não será inferior a 0,28, qualquer que seja a resistência do aço. Para maiores profundidades, maiores serão os P/Δ mínimos a serem obtidas. Novamente se está trabalhando na faixa de flambagem elástica. Daí a tendência, há alguns anos existentes, da pesquisa e utilização de novos materiais, de menor densidade que o aço, sem uma perda considerável no módulo de elasticidade, o qual comanda a flambagem.

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são:

- a - Entre os critérios estudados o Alemão gera, via de regra, estruturas com o menor peso, maior espaçamento de cavernas e menor altura de gigantes. Foi verificado que seu Modelo de Análise Estrutural é o mais claro e completo. Em contrapartida, como desvantagem, gera cavernas com altura maior do que para os outros critérios, sem que, contudo, este fato elimine as vantagens já enumeradas.
- b - Entre o critério americano e inglês, o primeiro leva a soluções estruturais mais leves, quando se utilizam aços com resistência superior à faixa de HY80 e mais pesados para aços menos resistentes.
- c - Existem condições para, a priori, saber-se com boa precisão, qual deverá ser o peso do casco resistente. Pode-se, também, escolher a resistência do aço a ser utilizado, a fim de que o peso do casco seja aquele necessário à compatibilização do projeto do submarino com um todo, isto é, do peso total com o deslocamento.
- d - Como P/Δ é independente do raio do casco, é possível, conhecidos todos os pesos, exceto o do casco resistente, saber qual deva ser o raio desse casco para que haja compatibilização entre o peso total do submarino e seu deslocamento. Além do mais, isto faz com que as curvas de P/Δ , em função da profundidade máxima de operação (H_{Op}) ou da tensão de escoamento (σ_y), possam ser utilizadas para qualquer raio, com todas as vantagens que isto propicia.
- e - Para que o peso do casco resistente não seja excessivo e que, portanto, possua valores usuais (até, por exemplo, $P/\Delta = 0,22$), um aço de certa resistência só pode ser utilizado até determinada profundidade máxima de operação (H_{Op}). Para o critério alemão, por exemplo, tem-se:
 - Aço HTS até $H_{Op} = 200m$
 - Aço HY80 até $H_{Op} = 330m$
 - Aço HY 130 até $H_{Op} = 480m$
 - Aço HY 180 até $H_{Op} = 600m$
- f - Para certa profundidade máxima de operação, existe um limite na escolha do aço a ser usado, pois ao selecionar aços de maior resistência do que a necessária, não se ganha em peso estrutural.

- g - O aço como material para o casco resistente, não poderá ser utilizado para qualquer profundidade máxima de operação. Quando esta profundidade começa a crescer em demasia, o excessivo peso estrutural tornará inviável o projeto. Materiais de menor densidade, com resistência equivalente ao aço e sem perda considerável no módulo de elasticidade, devem ser usados nesses casos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) - DDS9110-8. Submarine structural design. Department of the Navy, Bureau of Ships, Washington D.C. , March, 1965.
- 2) - Specification for unfired fusion welded pressure vessels, British Standards Institution, BS 5500 , capítulo 3.6, London, 1982.
- 3) - BV 1041 - Part 2 - Submarines. Construction regulation for ships of the German Navy. 1975.

U-boat hulls were tested in a special test tank, and the results were compared with those obtained in the normal test tank. It was found that the hulls tested in the special test tank showed a higher resistance to buckling than those tested in the normal test tank. This was due to the fact that the hulls tested in the special test tank were subjected to a higher pressure than those tested in the normal test tank. The results of the tests are given in the following table:

RESISTANCE TO BUCKLING

- 1) - Report No. 8, Submarine Structural Design, Department of the Navy, Bureau of Ships, Washington, D.C., March, 1955.
- 2) - Specification for welded joints, British Standards Institution, BS 5800, London, 1957.
- 3) - Part 2 - Summary, Construction for ships of the German Navy, 1955.