

## **DESEMPENHO ESTRUTURAL DO CASCO RESISTENTE DE UM SUBMARINO QUANDO SUJEITO A DEFEITOS GEOMÉTRICOS**

Edgar Francisco Guimarães de Oliveira E-mail: edgar.engnaval@gmail.com

**Resumo:** Estruturas de parede fina, como os cilindros que formam o casco de submarinos, são utilizadas em diversas situações e aplicações de engenharia por proporcionar uma elevada resistência aliada a um baixo peso. Representando um grande poder de dissuasão, os submarinos militares são considerados o meio de ataque e defesa com melhor relação custo/benefício. Por operarem em altas profundidades, estando sujeitos à altíssimas pressões hidrostáticas, o casco de um submarino necessita de adequada resistência estrutural para suportar o carregamento ao qual é submetido. Em cilindros, muitas vezes, a flambagem é o principal modo de falha atuante, fazendo com que a estrutura perca sua estabilidade sem necessariamente ter atingido a tensão de escoamento do material. A sensibilidade causada por imperfeições geométricas pode ser preponderante para o colapso da estrutura, limitando, dessa forma, o potencial de operação do submarino. Os processos de fabricação de cascos resistente de submarinos representam, apesar de toda a tecnologia existente, uma possível forma de inclusão de imperfeições ou erros geométricos. A compreensão dos efeitos causados por tais imperfeições é fundamental para uma correta caracterização dos parâmetros de projeto de cascos resistentes. Dessa forma, pretende-se analisar as pressões de colapso da estrutura quando sujeitas a carregamentos de compressão. Para tal, faz-se uso de simulação computacional através do programa Ansys Workbench. Ao fim do estudo foi possível verificar que a presença das imperfeições geométricas reduz drasticamente a pressão de colapso do casco, tendo seu efeito potencializado pela presença simultânea das imperfeições geométricas de excentricidade e ovalização.

**Palavras-chave:** Submarino, flambagem, casco resistente, defeitos.

## **STRUCTURAL PERFORMANCE OF THE RESISTANT HULL OF A SUBMARINE WHEN SUBJECTED TO GEOMETRIC DEFECTS**

**Abstract:** Thin-walled structures, such as the cylinders that make up the submarine hull, are used in various situations and engineering applications because they provide high resistance combined with low weight. Representing a great power of dissuasion, military submarines are considered the most cost-effective means of attack and defense. Because they operate at high depths, being subject to very high hydrostatic pressures, the hull of a submarine needs adequate structural strength to withstand the load to which it is subjected. In cylinders, buckling is often the main mode of failure, causing the structure to lose its stability without necessarily having reached the material flow stress. The sensitivity caused by geometric imperfections may be preponderant to the collapse of the structure, thereby limiting the submarine's potential for operation. The processes of manufacture of resistant hulls of submarines represent, despite all the existent technology, a possible form of inclusion of imperfections or geometric errors. The understanding of the effects caused by such imperfections is fundamental for a correct characterization of the design parameters of resistant hulls. In this way, it is intended to analyze the collapse pressures of the structure when subjected to compression loads. For this, computational simulation is done through the Ansys Workbench program. At the end of the study it was possible to verify that the presence of the geometric imperfections reduces drastically the pressure of collapse of the hull, having its effect enhanced by the simultaneous presence of geometric imperfections of eccentricity and ovalization.

**Keywords:** Submarine, buckling, resistant hull, defects.

### **1. INTRODUÇÃO**

Um submarino é, por definição, uma embarcação de dissuasão que opera na maior parte do tempo submerso. Nessa condição o casco está sujeito a uma pressão hidrostática externa, que depende da profundidade na qual está operando (OLIVEIRA, 2015).

Os primeiros submarinos surgiram a partir dos anos de 1800, chamando atenção das principais potências militares da época por representarem uma potencial arma de guerra a ser utilizada em grandes conflitos. Porém, foi somente durante o período da Primeira Guerra

Mundial e, especialmente na Segunda Guerra Mundial, que experimentaram um grande desenvolvimento tecnológico, propiciando uma intensa transformação que proporcionou um ganho enorme na eficiência ofensiva de combate armado.

Tipicamente os submarinos são formados por dois cascos, um externo ao outro, como representado na Figura 1. O casco externo ou casco hidrodinâmico, é o responsável por garantir a eficiência operacional, ou seja, reduzir ao máximo o arrasto e, conseqüentemente, a resistência ao avanço do submarino. Além disso, ajuda na questão de camuflagem do submarino aos radares inimigos, já que muitas vezes são utilizadas camadas de materiais compósitos com capacidade absorvedora de radiação eletromagnética, que atenuam a energia utilizada para detecção de objetos, dissipando-as em energia térmica.

Já o casco interno, chamado de casco resistente ou casco de pressão, é o responsável por garantir a integridade estrutural do submarino, resistindo às altíssimas pressões hidrostática impostas pelo ambiente de operação. Possui sua estrutura formada pela união de cilindros, cones e calotas de proa e popa, sendo estes reforçados por anéis e anteparas transversais instalados por todo o comprimento do casco.

Segundo Franquetto (2015, apud Banks e Kugles, 1986), devido à sua importância, o dimensionamento do casco resistente é conservador e baseado em critérios de projeto validados por meio de testes em modelos e protótipos, e também por simulações numéricas.

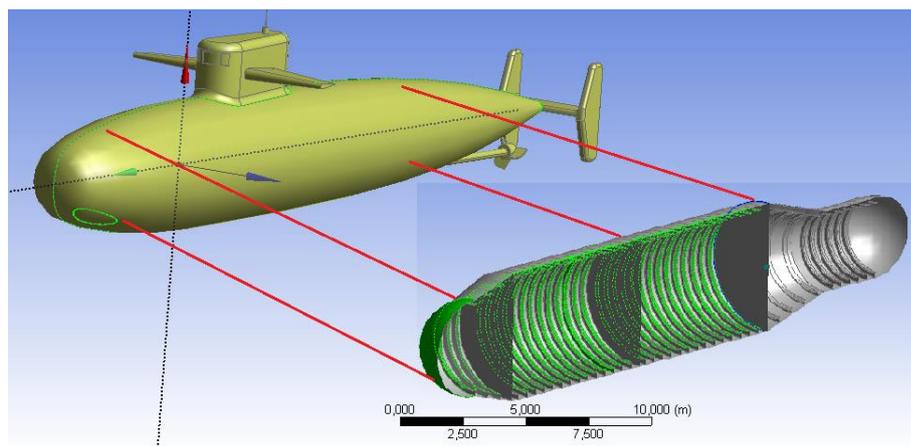


Figura 1 – Casco externo (hidrodinâmico) e casco interno (resistente) de um submarino.

Em estruturas de paredes finas, denominação utilizada para aquelas que apresentam um comprimento muito maior que a sua espessura de parede, como no caso dos submarinos, muitas vezes, a flambagem é o principal modo de falha atuante. A estrutura do casco resistente de um submarino é projetada para, de forma primária, suportar cargas de compressão associadas à pressão hidrostática durante a operação em imersão. As altas pressões ao qual o casco é submetido geram tensões, que por sua vez, eventualmente, induzem a ocorrência da flambagem OLIVEIRA (2015).

Outro ponto importante a ser observado é a falha por fadiga. Os submarinos durante sua operação navegam em diferentes profundidades, estando seu casco sujeito a variações de tensão. Essas alterações dos níveis de tensão podem ser consideradas como esforços cíclicos que, eventualmente, causam o surgimento e a propagação de trincas, levando às falhas estruturais causadas pela fadiga do material.

Da mesma forma, os processos de fabricação também carecem de uma atenção especial, pois podem introduzir defeitos que comprometam o correto funcionamento do submarino, levando ao colapso da estrutura. Segundo Mackay (2007), um exemplo são as técnicas de soldagem, que induzem uma mudança nas características dos materiais devido ao alto gradiente de temperatura aos quais os aços são submetidos, bem como pela adição de elementos de liga.

Durante os processos de fabricação também podem surgir descontinuidades na estrutura do casco cilíndrico resistente, como a excentricidade e a ovalização da circunferência. Essas descontinuidades ou erros geométricos são preponderantes para uma drástica redução na capacidade de operação do submarino, foco de estudo no presente artigo.

Atualmente, devido às limitações dos processos de fabricação, os defeitos produzidos durante a construção não podem ser eliminados. Tais defeitos devem ser considerados no projeto e controlados durante a construção já que reduzem a capacidade do casco resistente em resistir à pressão hidrostática FRANQUETTO (2015, apud Martinez, 1987; Massaroti, 1991).

Segundo Tomasin (2014) e Sreelatha (2010), que estudaram a influência dos defeitos geométricos de fabricação aplicados de forma isolada numa única seção do casco, estes foram responsáveis por reduzir significativamente a pressão de colapso do casco, levando em consideração a falha por flambagem.

Oliveira (2015) aplicou e simulou o efeito dos defeitos geométricos de fabricação em toda a extensão do casco resistente do submarino, também de forma isolada. Constatou-se que a redução na pressão de colapso ocasionada por cada defeito ficou em torno de 40%, ou seja, o submarino perdeu grande parte da sua capacidade operacional - a profundidade máxima de mergulho em que poderia operar.

No presente artigo, sendo este uma continuidade e evolução dos conceitos analisados no trabalho acima citado, o objetivo é investigar, através do uso de simulação computacional, a influência dos defeitos geométricos no casco resistente do submarino quando incorporados de forma simultânea e aplicados no ponto crítico de instabilidade da estrutura da seção circular.

## **2. METODOLOGIA**

Para investigar a influência de defeitos geométricos aplicados simultaneamente no casco resistente de um submarino foram utilizadas ferramentas de Métodos Computacionais, prevendo, assim, a pressão crítica de flambagem, ou seja, a máxima pressão hidrostática que o casco resistente poderia suportar.

O software utilizado para desenvolvimento da análise computacional foi o ANSYS WORKBENCH®, versão 16.0. É um programa comercial de simulação de engenharia que se baseia em elementos finitos para representar os fenômenos de diversas aplicações.

### **2.1 Método dos Elementos Finitos – MEF**

O método dos elementos finitos (MEF) ou finite element method (FEM) é uma técnica de discretização de um determinado modelo em componentes de geometria simples, designados assim como elementos finitos. A resposta de cada elemento é expressa em termos de um número finito de graus de liberdade caracterizados como o valor de uma função desconhecida a um conjunto de pontos nodais. A resposta do modelo matemático é considerada como sendo

aproximadamente a resposta do modelo discreto obtida pela ligação do conjunto de todos os elementos.

Segundo Rade e Reis (2011), o método consiste em dividir o domínio sobre o qual o problema é estudado em várias regiões interconectadas, denominadas elementos. A resposta de cada elemento é expressa em termos de um número finito de graus de liberdade caracterizados como o valor de uma função desconhecida a um conjunto de pontos nodais. A resposta do modelo matemático é considerada como sendo aproximadamente a resposta do modelo discreto obtida pela contabilização do conjunto de todos os elementos.

## **2.2 Desenvolvimento do modelo no software de análise**

Para que se tivesse um parâmetro dos resultados obtidos nesse trabalho, foi modelada uma seção do casco resistente utilizando-se como base as mesmas dimensões da seção analisada por Sreelatha (2010). O referido estudo de Sreelatha buscava analisar a influência de cada defeito geométrico quando aplicado de forma isolada na estrutura, diferentemente do objetivo desta análise, que busca caracterizar a influência dos defeitos quando aplicados de forma simultânea e dispostos nos locais preferenciais de origem da falha na seção circular do casco.

O modelo, como representado na Figura 2, é de aço com coeficiente de Poisson de 0.3 e com reforçadores em perfil *T*. As dimensões do casco são mostradas abaixo.

- Distância entre anteparas 10 m
- Raio interno do casco 4 m
- Espessura de parede do casco 0.034 m
- Altura da alma do reforçador 0.308 m
- Espessura da alma do reforçador 0.018 m
- Altura do flange do reforçador 0.028 m
- Largura do flange do reforçador 0.2505 m
- Distância entre reforçadores 0.664 m

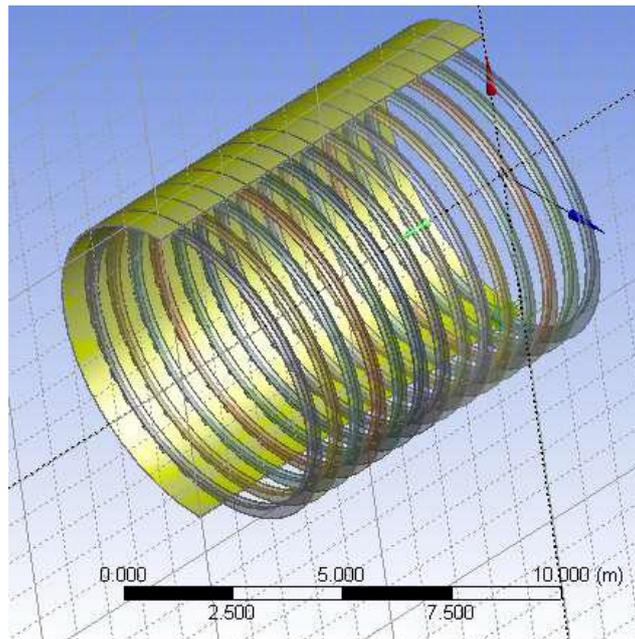


Figura 2: Modelagem da geometria de uma seção do casco resistente e dos reforçadores

Após a modelagem da seção do casco resistente do submarino, seguida pela preparação do software quanto às configurações de pré-processamento e pela discretização da geometria, foi realizada, então, a análise do comportamento da estrutura quanto ao modo de falha por flambagem quando da aplicação de uma pressão externa, simulando o ambiente operacional.

Como condição de contorno para o experimento, foi adotada a situação em que as extremidades da seção do casco resistente estivessem bi-engastadas, simulando, desta forma, a continuidade do casco.

### 3. FLAMBAGEM DO CASCO RESISTENTE DE SUBMARINOS

Tubos e cascas, sendo estes caracterizados, respectivamente, por uma baixa e uma alta relação entre diâmetro e espessura de parede, estão sujeitos à compressão axial, flexão, torção ou ainda pressões internas ou externas, as quais podem provocar falhas e levar ao colapso da estrutura.

Segundo Chang (2012), um dos problemas recorrentes nessas estruturas é a falha por flambagem, fenômeno que ocorre em peças esbeltas quando submetidas a um carregamento de compressão, sendo considerado um fenômeno de instabilidade. Deste modo, a estrutura pode perder sua estabilidade sem mesmo ter atingido a tensão de escoamento do material.

No modo de falha por flambagem, a tensão em que ocorre o colapso da estrutura pode ser significativamente menor à correspondente tensão de escoamento do material, podendo ser ocasionado pela sensibilidade às imperfeições geométricas. Muitas vezes, a pressão necessária para causar essa instabilidade (levar à flambagem) de uma estrutura de parede fina é apenas uma fração da pressão necessária para alcançar o limite de escoamento do material.

Alguns dos fatores que induzem a flambagem podem ser identificados como deformações pré-existentes, imperfeições geométricas e cargas excêntricas. Segundo Mackay (2007), a falha por flambagem em cada modo é dependente da relação entre raio e espessura

do casco, pela relação raio do casco e espaçamento entre reforçadores, pela relação entre área transversal do reforçador e área transversal do casco, além da relação tensão deformação dos materiais envolvidos.

Existem inúmeras combinações de modos de flambagem circunferenciais e longitudinais para uma dada geometria de cilindro, com uma pressão de deformação associada a cada combinação de  $n$  e  $m$ , onde o número de lóbulos circunferenciais originados após a ocorrência da falha é denotado  $n$ , enquanto na direção longitudinal do cilindro são denotados por  $m$ . Para pequenos valores de  $n$  (aproximadamente 2 a 4), o modo de colapso tende a ser global, com deflexão entre as anteparas. Para grandes valores de  $n$  ( $n \geq 10$ ), a deflexão tende a ocorrer entre os anéis reforçadores. Os modos de flambagem global e entre reforçadores para um cilindro são representados na Figura 3.

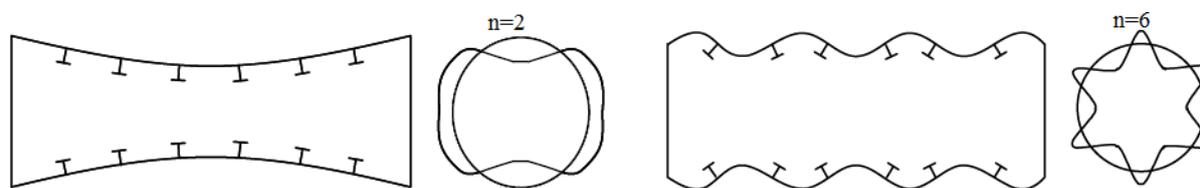


Figura 3: Flambagem global e entre reforçadores, respectivamente

Diferentemente do escoamento, a flambagem não apresenta sinais estruturais na iminência de sua ocorrência, tornando-a uma falha estrutural que exige uma atenção especial. Para evitar a ocorrência desses fenômenos na estrutura de um submarino, torna-se necessário a utilização de anéis reforçadores transversais espaçados longitudinalmente ao longo do casco. O espaçamento crítico dos anéis reforçadores para casos de carregamentos hidrostáticos pode ser obtido pela relação de  $L/D = 2.1 \sqrt{D/t}$ , onde  $L$  representa o comprimento da seção,  $D$  representa o diâmetro e  $t$  a espessura de parede.

#### 4. DEFEITOS GEOMÉTRICOS PRESENTES NA SEÇÃO CIRCULAR DO CASCO

As diversas e complexas etapas do processo de fabricação dos cascos resistentes podem, eventualmente, ocasionar certos defeitos geométricos na estrutura final do submarino. Tais defeitos, se presentes no casco, contribuirão substancialmente para a redução da capacidade de submersão que, por conseguinte, acaba afetando diretamente num dos seus principais atributos operacionais - a capacidade do submarino de se camuflar dos radares inimigos quando em elevadas profundidades.

##### 4.1 Excentricidade da seção circular

Uma das imperfeições geométricas de um casco resistente de submarino que pode ser resultante dos processos de fabricação é a excentricidade da seção circular. Esse erro geométrico nada mais é do que a redução na espessura de parede em um dos bordos com relação a região oposta, localizada na mesma seção circular (Figura 4). Dependendo da sua magnitude e formato, a excentricidade pode ser determinante para o modo de colapso da estrutura.

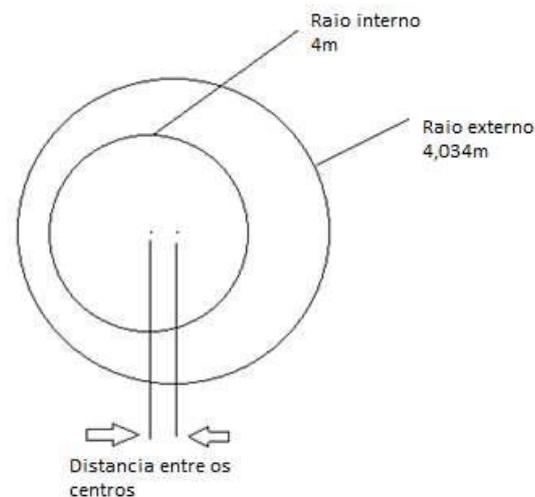


Figura 4: Circunferências Excêntricas

Uma descrição escalar da magnitude dessa excentricidade é tomado com relação ao desvio máximo a partir do raio médio do cilindro perfeito. Segundo Mackay (2007), cascos de pressão são tipicamente projetados para apresentar uma excentricidade máxima de 0,5% do raio médio do casco e são construídos com uma tolerância de até um terço deste valor.

#### 4.2 Ovalização

A falta de circularidade ou a ovalização do casco, como mostra a figura 5, tem sua origem, da mesma forma como a excentricidade, nos processos de fabricação da seção circular e também pode representar considerável parcela na redução da pressão crítica de flambagem.

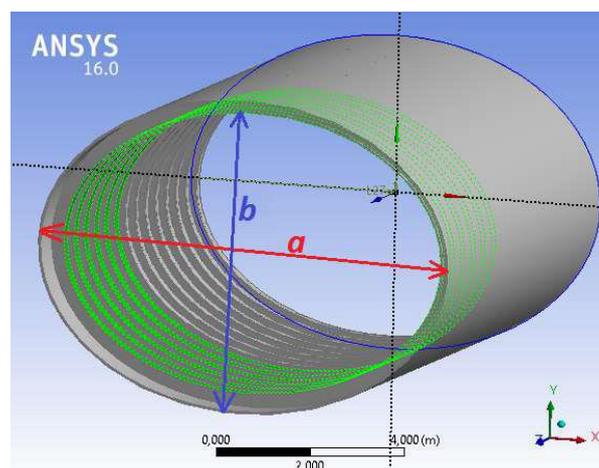


Figura 5: Seção docasco resistente apresentando ovalização

De acordo com o livro “*Principles of Naval Architecture*”, em uma geometria circular perfeita e com reforçadores uniformes, a única força atuante no casco é a compressão. Se, porém, existirem desvios da circularidade, surge então um estresse adicional resultante dos momentos fletores induzidos (Figura 6). Esse estresse, quando sobreposto à tensão de compressão imposta pela pressão hidrostática, pode causar a falha prematura da estrutura.

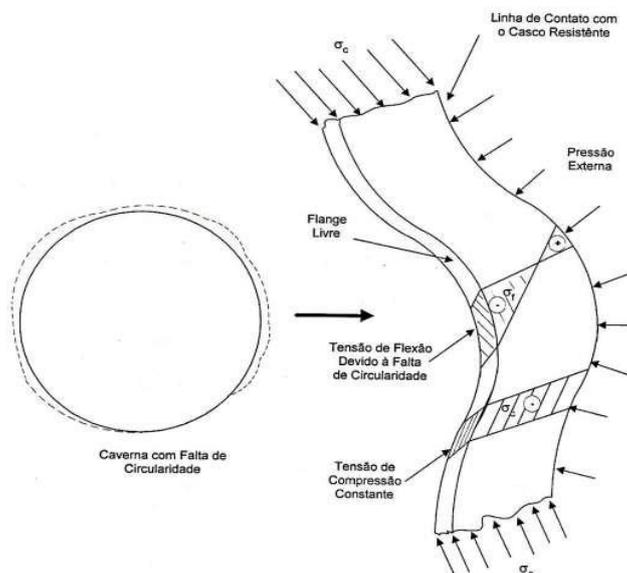


Figura 6: Efeito da falta de circularidade na caverna ou seção do casco resistente.

### 4.3 Sobreposição dos defeitos

Até então, foram apresentadas quais as origens e os possíveis efeitos causados no casco resistente devido aos defeitos impostos pelos processos de fabricação – Excentricidade e Ovalização, ambos tratados de forma desacoplada.

As análises realizadas nas seções do casco resistente por Oliveira (2015) não levaram em consideração a aplicação dos defeitos geométricos nos pontos críticos à ocorrência da flambagem, Figura 7. De acordo com o referido autor, se os erros geométricos fossem adicionados ao casco em certas regiões de forma a combinar os locais preferenciais para a ocorrência e surgimento da falha, as reduções nas pressões críticas à flambagem poderiam, eventualmente, apresentar uma amplificação do fenômeno em questão, reduzindo ainda mais a pressão crítica para ocorrência da flambagem.

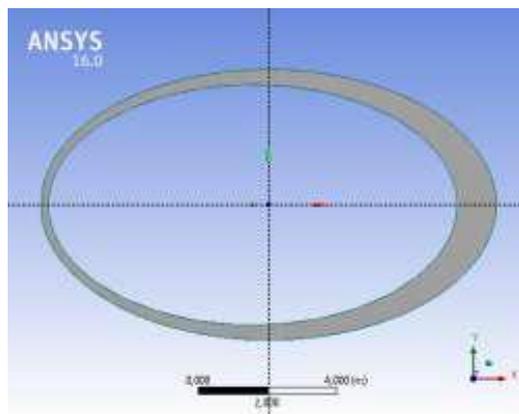


Figura 7: Seção circular apresentando excentricidade e ovalização, porém com os erros geométricos introduzidos fora do ponto crítico de início da flambagem

A ideia central do presente estudo é analisar a influência de tais defeitos geométricos (excentricidade e ovalização) quando sobrepostos e aplicados simultaneamente nos pontos críticos de início da falha por flambagem na seção circular do casco, como mostra a Figura 8 e como prôpos Oliveira (2015) em suas sugestões para trabalhos futuros, aprimorando, desta forma, os resultados de estudos contidos na bibliografia disponível.

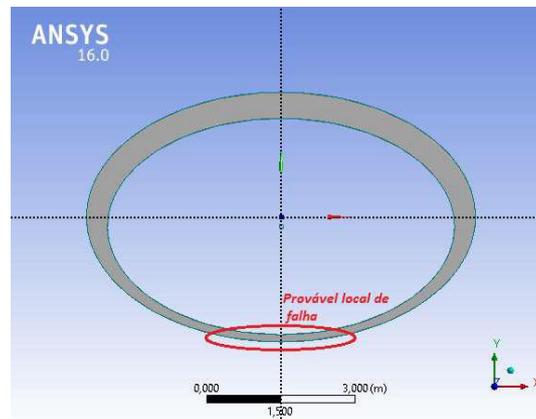


Figura 8: Seção circular apresentando excentricidade e ovalização com os erros geométricos introduzidos no ponto crítico de início da flambagem

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui são apresentados os resultados das simulações realizadas. As simulações dos dois principais erros geométricos considerados neste estudo, sendo eles a excentricidade e a ovalização da seção são, primeiramente, analisados de forma isolada com intuito de se obter os resultados de estudos constantes na literatura disponível, validando, assim, os valores aqui alcançados.

Posteriormente, considerando o pior cenário para ocorrência da falha por flambagem, são apresentados os resultados referentes ao acoplamento dos dois erros geométricos quando aplicados no ponto crítico de início da falha, aperfeiçoando, dessa forma, o entendimento dos efeitos adversos por eles causados na seção circular do casco resistente.

### 5.1 Seção do casco resistente com geometria perfeitamente circular

Primeiramente, uma seção do casco apresentando geometria perfeitamente circular foi analisada com intuito de prever qual a pressão de colapso associada ao ambiente operacional simulado.

Conforme Mackay (2007), o número de lóbulos circunferenciais originados após a ocorrência da falha para o caso de flambagem global tende a ser entre  $2 \leq n \leq 4$ . A figura 9 apresenta o primeiro modo de flambagem da seção juntamente com seu respectivo valor da pressão de colapso. Nota-se a existência de três lóbulos circunferenciais originados no primeiro modo da flambagem, corroborando a afirmação do autor acima mencionado. Nesse caso, a menor pressão hidrostática (1º modo de flambagem) que levaria ao colapso da estrutura seria equivalente a 32.93 MPa.

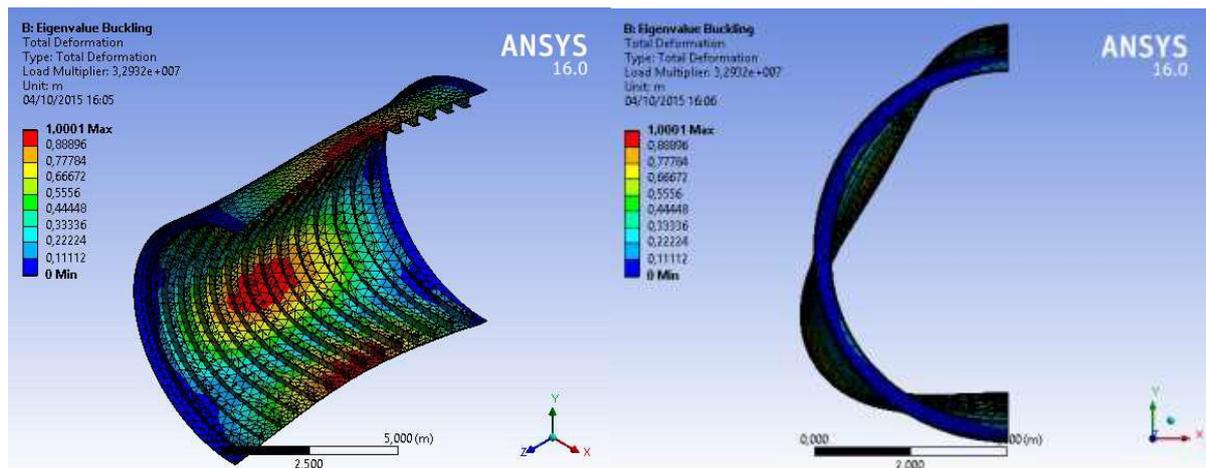


Figura 9: Primeiro modo de flambagem da seção geometricamente perfeita e o valor da pressão crítica

Já a Figura 10 representa o 4º modo de ocorrência da flambagem na estrutura. A pressão de colapso, nesse caso, sofre um grande incremento, passando para 43.78 MPa com a formação de quatro lóbulos transversais no casco.

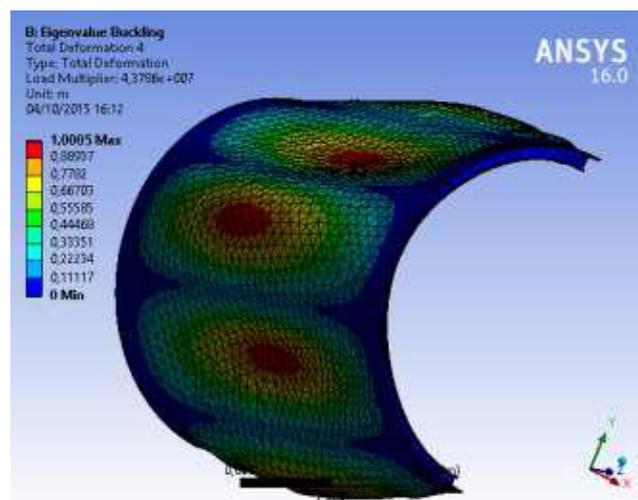


Figura 10: Quarto modo de flambagem da seção

## 5.2 Seção do casco não concêntrica - Excentricidade

A excentricidade causada por imperfeições geométricas foi modelada e analisada na seção do casco resistente através do software ANSYS e foi implementada com gradativa redução na espessura de parede da seção em um dos bordos do casco, variando-se desde a forma circular perfeita até uma distância equivalente a 0,167% ou  $1/3 \cdot 0,5\%$  do raio médio do cilindro perfeito (4,017 m), OLIVEIRA (2015).

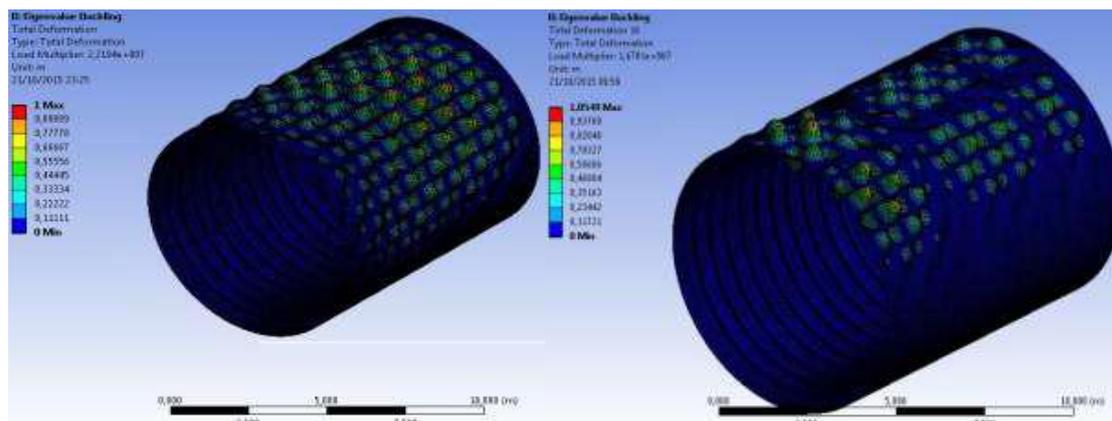


Figura 11: Resultado das simulações para uma excentricidade de 1,34 mm e 6,7 mm, respectivamente

Amplitude da Falha [mm]	Pressão de Colapso - [Mpa]	Redução da P <sub>Colapso</sub> %	Redução da Profundidade Máxima de Operação - [m]
0	27,08	0	2683,0
1,34	22,19	18,06 %	2196,7
2,68	19,47	28,10 %	1926,2
4,02	18,83	30,47 %	1862,6
5,36	15,26	43,65 %	1507,5
6,7	14,98	44,68 %	1479,7

Tabela 1: Pressão crítica de flambagem conforme amplitude da falha geométrica



Figura 12: Redução da profundidade máxima de operação conforme amplitude da falha geométrica

Conforme Oliveira (2015), é possível notar a grande influência que um pequeno desvio da forma perfeita, nesse caso como separação dos centros dos anéis (circunferências excêntricas) e, conseqüente redução na espessura de parede de um dos bordos, causa à resistência estrutural do casco de um submarino. A pressão crítica à flambagem, ou seja, a máxima profundidade de submersão do submarino é reduzida em mais de 12 MPa.

Durante a perda de estabilidade da estrutura, a região do casco que tende a flambar primeiro é, justamente, o bordo em que teve a diminuição da espessura de parede devido à

excentricidade, evidenciando, assim, a grande sensibilidade aos desvios da forma geométrica perfeita.

### 5.3 Seção do casco com falta de circularidade – Ovalização

Como já discutido anteriormente, a ovalização da seção pode ter origem nos processos de fabricação e representa um desvio da geometria perfeita do cilindro, o que pode vir a reduzir a capacidade da estrutura em resistir aos esforços advindos do ambiente operacional.

A falta de circularidade produzida durante a fabricação é um defeito importante a ser considerado no projeto do casco resistente, pois, introduz momentos de flexão no casco, facilitando o colapso, FRANQUETTO (2015, apud Mackay, Keulen e Smith, 2011).

Conforme Oliveira (2015), devido às dificuldades impostas pelos processos de fabricação utilizados na construção dos cascos, torna-se evidente a possibilidade de que haja algum desvio da geometria perfeita.

Nesse caso, diferentemente da seção anterior que tratava da excentricidade, a espessura de chapa do casco é mantida constante em toda a geometria, variando-se apenas os parâmetros  $a$  e  $b$ , conforme representados na Figura 13.

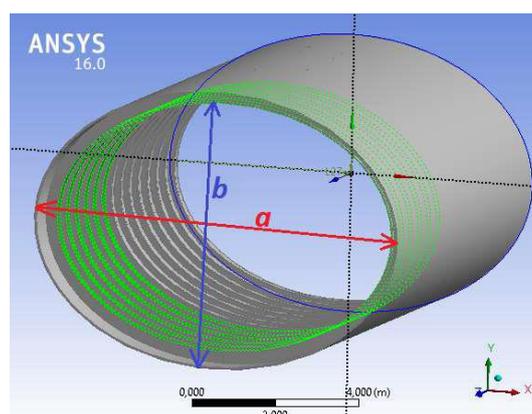


Figura 13: Seção transversal do casco resistente de submarino com conformação oval

No estudo de Oliveira (2015) a ovalização foi implementada na seção do casco através do incremento gradativo da relação  $a/b$ . A tabela 2 mostra os valores obtidos da pressão crítica de flambagem conforme a variação dos parâmetros citados.

a [m]	b [m]	a/b	Pressão Crítica à Flambagem – [Mpa]	Redução da Pressão	Redução na Profundidade de Operação – [m]
4	4	1,000	27,08	-	2683,0
4,01	3,99	1,005	21,98	18,8%	2175,8
4,04	3,96	1,020	20,13	25,7%	1991,9
4,06	3,94	1,030	18,72	30,9%	1851,6
4,1	3,9	1,0513	16,18	40,3%	1599,0

Tabela 2: Pressão crítica de flambagem conforme amplitude da falha geométrica

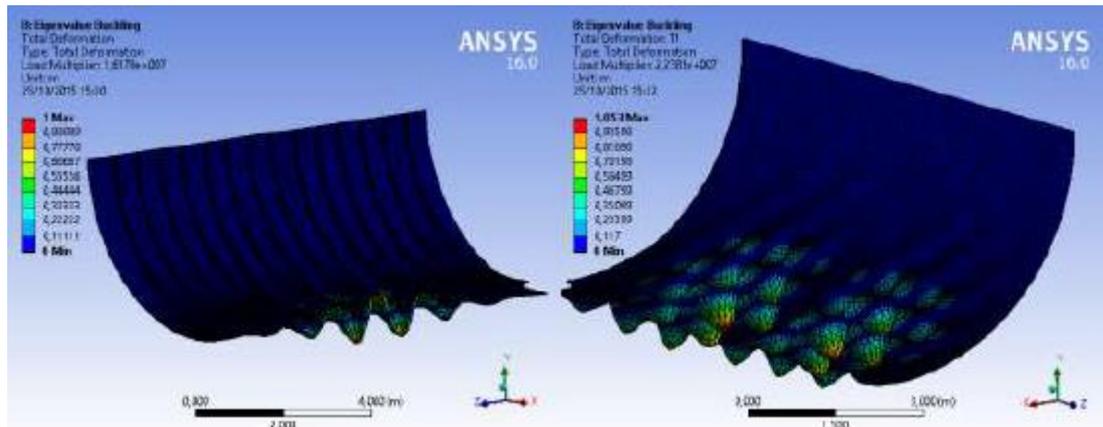


Figura 14: Flambagem da seção do casco resistente para razão  $a/b=1,05$ .

A figura acima representa a flambagem do casco resistente para a razão  $a/b$  igual a 1,05. Já a Figura 15 demonstra a variação da pressão crítica de flambagem do casco conforme incremento do erro geométrico em questão, o que demonstra que a estrutura é extremamente sensível aos fatores simulados.

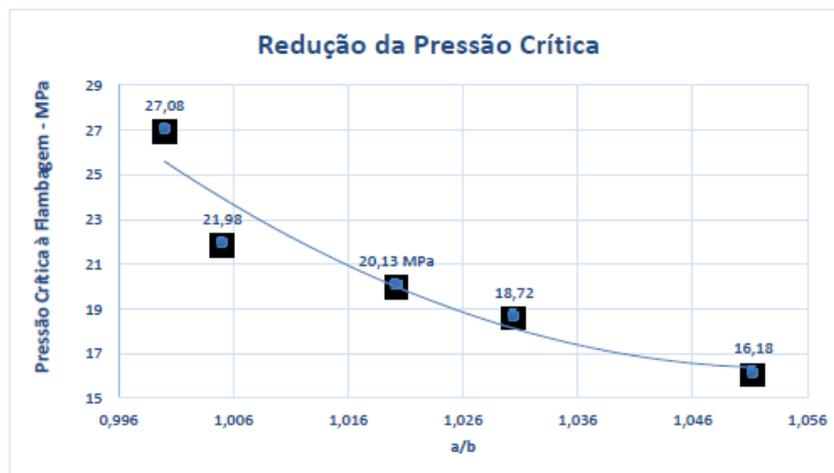


Figura 15: Redução da profundidade máxima de operação conforme amplitude da falha geométrica

Assim como nos resultados obtidos na seção anterior, que tratava da excentricidade do casco resistente, o desvio da geometria perfeita ocasionado pela ovalização ou falta de circulariedade acarreta numa grande perda da resistência estrutural. Dessa forma, o submarino acaba tendo reduzida a sua capacidade operacional, limitando-se à profundidades menores daquelas para as quais foi inicialmente projetado.

#### 5.4 Sobreposição dos defeitos no casco resistente – Excentricidade e Ovalização

Aqui, o casco resistente do submarino foi modelado com a inclusão dos dois erros geométricos discutidos anteriormente, porém agora incorporados na estrutura simultaneamente e aplicados no ponto crítico do início da falha.

Os resultados apresentados até essa seção já haviam sido verificados por Oliveira (2015), que também estudou a influência da excentricidade e ovalização quando incorporados simultaneamente no casco, porém com aplicação das falhas geométricas em locais distintos dos pontos críticos à flambagem, como mostra a Figura abaixo.

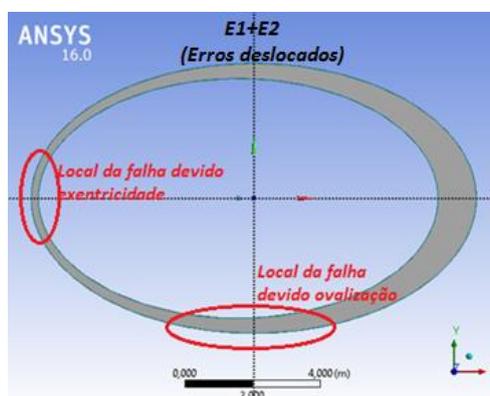


Figura 16: Erros geométricos sobrepostos

A presente seção do artigo tem o intuito de averiguar a influência dessas falhas quando incorporadas de forma simultânea e nos locais críticos à flambagem do casco resistente, como mostra a Figura 17, contribuindo, dessa forma, para o entedimento do fenômeno de instabilidade da estrutura em questão.

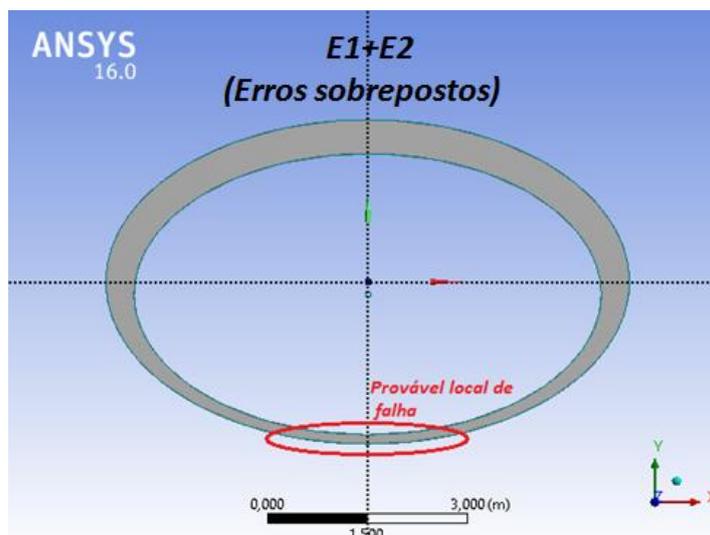


Figura 17: Erros geométricos sobrepostos no local crítico à flambagem

As dimensões dos defeitos de excentricidade e ovalização foram agrupadas em pares e com um aumento gradativo, de forma a proporcionar uma comparação com os resultados anteriores. O primeiro caso foi simulado com uma excentricidade de 1,34 mm entre os centros das circunferências, enquanto a ovalização foi adicionada conforme a razão entre as distâncias de  $a/b$  igual a 1,005, e assim sucessivamente até a excentricidade de 6,7 mm e ovalização de  $a/b$  igual a 1,05, conforme dados da tabela 3.

E1+E2 (Erros sobrepostos)		
ERRO APLICADO		PRESSÃO CRÍTICA DE FLAMBAGEM - (MPa)
0	0,0 - 1,0	27,08

1	1,34 - 1,005	20,33
2	4,02 - 1,02	15,93
3	5,36 - 1,03	13,85
4	6,7 - 1,05	11,67

Tabela 3: Pressão crítica de flambagem conforme amplitude da falha geométrica

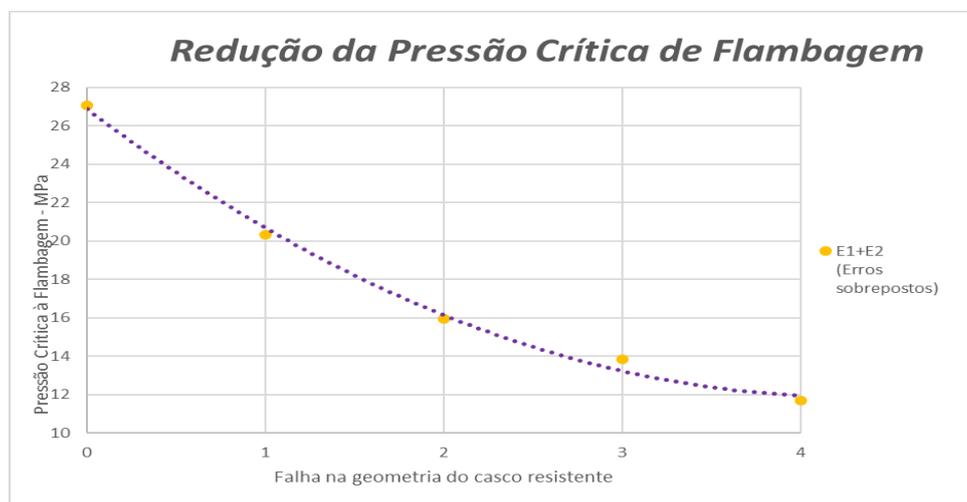


Figura 18: Redução da pressão de flambagem devido sobreposição dos erros geométricos no ponto crítico

O gráfico acima mostra que a capacidade da estrutura em resistir aos esforços aplicados de compressão são extremamente afetados pela inclusão dos dois erros geométricos em questão – excentricidade e ovalização; principalmente se incorporados de forma simultânea e nos locais críticos à flambagem, reduzindo drasticamente a pressão de colapso do submarino.

## 6. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste artigo é analisar o desempenho estrutural do casco resistente cilíndrico de um submarino quando sujeito a um esforço de compressão. Procurou-se investigar qual a influência na pressão de colapso da estrutura do submarino devido a certos parâmetros de projeto e defeitos geométricos (imperfeições) que podem ser incorporados à estrutura durante as diversas fases de fabricação.

Por ser uma estrutura crítica devido aos diversos fatores operacionais, o casco resistente deve ser projetado e dimensionado de forma conservadora. O entendimento dos diversos parâmetros que influem na resistência estrutural são extremamente importantes à evolução dos conceitos que permeiam as diversas etapas de projeto e construção dos submarinos.

O modo de falha governante em um submarino quando em operação de imersão é a flambagem e é causada pela ação da pressão hidrostática no casco, vindo a ocorrer de forma instantânea na estrutura.

Primeiramente, os defeitos geométricos ocasionados pela excentricidade e pela ovalização foram analisados individualmente na seção circular do casco, demonstrando que ambos reduzem, em média, 40% da resistência estrutural, no que diz respeito ao modo de falha por flambagem.

Oliveira (2015) analisou a influência de ambos os defeitos geométricos quando presentes simultaneamente na seção circular do casco. Porém, a localização da aplicação deu-se em pontos distintos das regiões propícias para a ocorrência da falha, o que fez com que a

redução na pressão crítica de colapso não fosse proporcional à soma das reduções apresentadas pelos erros quando aplicados individualmente na seção do casco.

O presente estudo analisou a influência dos dois defeitos geométricos (excentricidade e ovalização) à pressão crítica de colapso da estrutura, considerando o caso em que tais erros estão presentes simultaneamente na seção do casco resistente e inseridos no local crítico de início e propagação da falha, conforme Figura 17.

A Figura 19, abaixo, mostra as curvas que representam a redução da pressão crítica de flambagem devido à presença de cada erro geométrico na seção do casco resistente, bem como as curvas referente a sobreposição dos dois erros geométricos quando aplicados em pontos distintos.

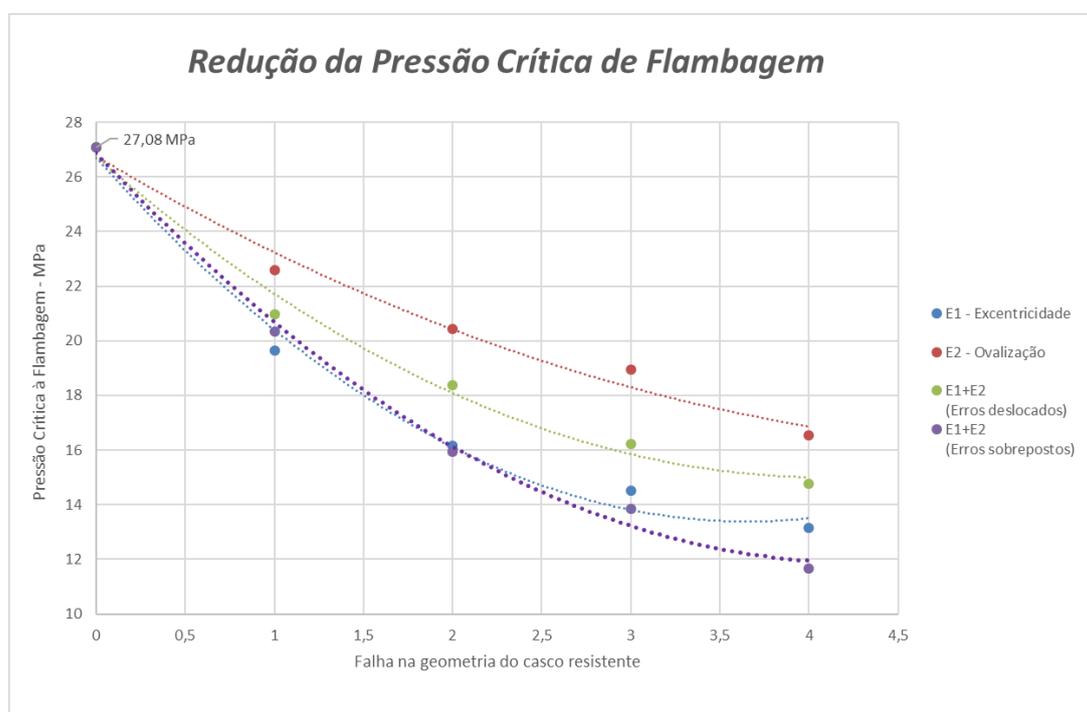


Figura 19: Redução da pressão crítica de flambagem devido sobreposição dos erros geométricos

A aplicação dos dois erros geométricos de forma conjunta na mesma seção do casco resistente e no ponto crítico para o início da flambagem revelou uma maior influência à resistência estrutural do que quando tais erros geométricos foram aplicados em locais distintos, como apresentou Oliveira (2015).

A pressão de colapso do casco resistente do submarino para o caso onde os erros foram aplicados de forma simultânea na mesma seção do casco resistente e no ponto crítico para o início da flambagem apresentou valores condizentes com a soma dos resultados obtidos na aplicação individualizada de cada um dos dois erros geométricos, amplificando, assim, o efeito causado por tais discontinuidades aqui analisadas.

O estudo realizado que considerou as combinações dos diferentes erros introduzidos na seção circular evidenciou que a estrutura do casco resistente (cilindro) é altamente sensível aos desvios geométricos da forma circular perfeita. Dessa forma, a capacidade operacional do submarino é diretamente afetada, tendo em vista que a pressão crítica de flambagem limita a

profundidade máxima de submersão, que vem a ser o principal requisito para este meio naval.

## **REFERÊNCIAS**

CHANG, W. J. Y. *Estudo de Flambagem em Colunas de Plataformas Semissubmersíveis*. 2012. 116 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FRANQUETTO, Paulo Rogério. *AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL NA INSTABILIDADE DE CASCOS RESISTENTES DE SUBMARINOS*. 2015. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Nuclear - Reatores, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2015.

MACKAY, John R. *Structural Analysis and Design of Pressure Hulls: The State of the Art and Future Trends*. Atlanta: Defence R&D Canada – Atlantic, 2007.

OLIVEIRA, Edgar Francisco Guimarães de. *INFLUÊNCIA DOS DEFEITOS GEOMÉTRICOS EXISTENTES NO CASCO ESTRUTURAL DE UM SUBMARINO NA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE OPERAÇÃO*. 2015. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

J.E.T. Reis; D.A. Rade, *Método dos elementos finitos aplicados à engenharia mecânica*, UFU, 2011.

SREELATHA P.R.; MATHAI, Alice. *Linear and Nonlinear Buckling Analysis of Stiffened Cylindrical Submarine Hull*. Kothamangalam, *International Journal of Engineering Science and Technology (ijest)*. Jun. 2012.

THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS (New York) (Ed.). *PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE*. New York: John P Comstock, 1967.

TOMASIN, Fabíola; TANCREDI, Thiago Pontin. *Imperfections' influence in the structural resistance of submarines*. In: *ESSS Conference & Ansys Users Meeting, 1., 2014, São Paulo. Apresentação de Trabalho/Conferência ou palestra*. São Paulo: ESSS, 2014. p. 1 - 24.