



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO AERODINÂMICO COMPARATIVO ENTRE DIVERSOS DIRIGÍVEIS

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO
CIENTÍFICA (CNPq/INPE)**

Luís Henrique de Camargo (FATEC-SJC, Bolsista CNPq)

E-mail: luis.camargo4@fatec.sp.gov.br

**Dr. José Ângelo da Costa Ferreira Neri (DAS/CEA INPE,
Orientador)**

E-mail: neri@das.inpe.br

Julho de 2015

Sumário

Resumo	3
1. Introdução.....	4
1.1. Dirigíveis	4
1.1. Projeto Tucuxi.....	6
1.2. Objetivos.....	6
2. Modelamento Teórico.....	7
2.1. Arrasto	7
2.2. Potência.....	8
3. Metodologia.....	9
3.1. Dirigíveis Pesquisados	9
3.2. Modelos CAD e Análises Aerodinâmicas	15
3.3. Cálculo da Potência Necessária	19
3.4. Simulações	20
4. Resultados.....	24
4.1. Comparações Cálculos contra Ensaios	24
4.2. Comparações Ensaios contra Simulações.....	24
5. Conclusões.....	26
6. Referências	27

Resumo

Com a crescente necessidade de uso racional dos recursos naturais, uma modalidade de transporte aéreo está novamente entrando em destaque, os dirigíveis, veículos mais leves que o ar, que no início do século XX eram usados em viagens transcontinentais até sofrer com diversos acidentes notáveis e tendo o seu uso relegado a papéis publicitários. Nos últimos anos diversas empresas têm retomado as pesquisas no desenvolvimento de novos dirigíveis. O Projeto Tucuxi visa o desenvolvimento de um dirigível autônomo para uso científico, como plataforma de coleta de dados, e para uso em telecomunicações, como plataforma retransmissora de sinais, o projeto está sendo desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Como o projeto se encontra em fase conceitual, é necessário criar uma base de conhecimento para execução das fases do projeto, através de pesquisas para poder determinar quais são os parâmetros necessários para a construção de um dirigível. Para poder validar os parâmetros que serão usados na construção do dirigível é necessário que os métodos utilizados sejam comparados com parâmetros já bem estabelecidos, como por exemplo, valores de ensaios físicos.

1. Introdução

1.1. Dirigíveis

Balões e dirigíveis são classificados como aeróstatos, pois a sua sustentação no ar é pelo fato de ser preenchido com um gás que é mais leve do que o ar atmosférico. A principal diferença entre os aeróstatos é que o dirigível é dotado de um motopropulsor, assim podendo ser guiado de forma mais efetiva.

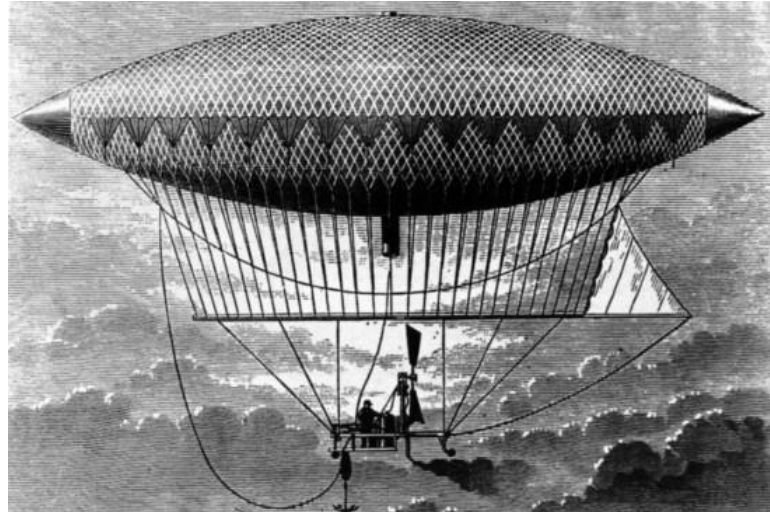
Os dirigíveis são classificados em três categorias relacionadas ao tipo de envelope:

- Rígido
- Semirrígido
- Não rígido

Nos dirigíveis não rígidos a forma externa é mantida através da pressão interna do gás de sustentação, enquanto nos rígidos a forma é mantida independente da pressão interna por haver uma estrutura de sustentação. Os dirigíveis semirrígidos possuem uma estrutura para distribuição de carga, mas a forma é mantida através da pressão do gás (Stockbridge, et al., 2012).

O primeiro dirigível foi criado na França por Henri Giffard em 1852, que consistia em um balão em forma de charuto (Figura 1) com um hélice acoplado a um motor à vapor, assim permitindo uma mobilidade maior do que os balões convencionais.

Figura 1: ilustração do dirigível de Giffard.



Após o dirigível de Giffard, diversos entusiastas da aviação criaram seus próprios modelos experimentais. Entre o final do século XIX e início do século XX, diversas conquistas foram alcançadas por estes entusiastas, entre eles os mais conhecidos são o conde Ferdinand von Zeppelin, criador do primeiro dirigível rígido (), e Alberto Santos-Dumont, desenvolvedor de diversos dirigíveis que lhe rendeu diversos prêmios (Figura 3).

Figura 2: O LZ-1, primeiro dirigível rígido, julho de 1900

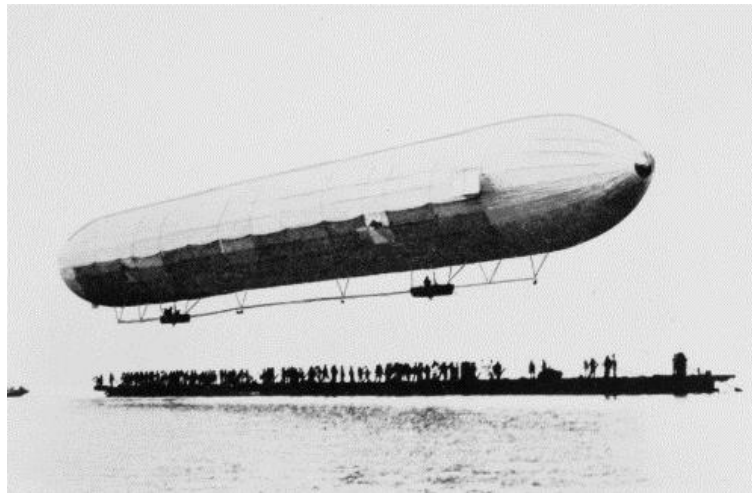
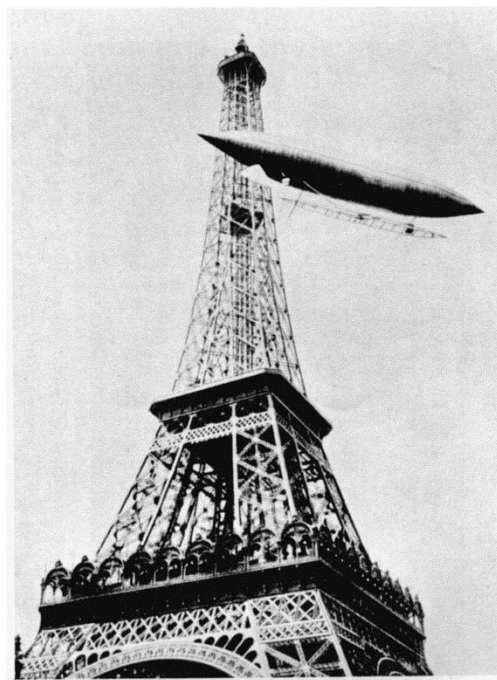


Figura 3: Alberto Santos-Dumont, contornando a Torre Eiffel em seu dirigível N° 6, setembro de 1901

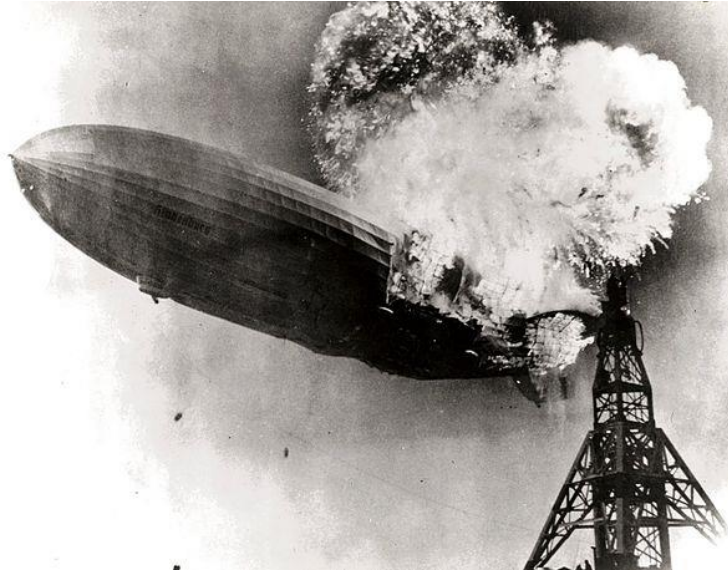


Após as conquistas no início do século XX, deu-se início a uma corrida no desenvolvimento de dirigíveis cada vez sofisticados, principalmente na Alemanha e nos Estados Unidos. Durante a Primeira Guerra Mundial (1914-1918), muitos países, em especial a Alemanha, começaram a utilizar dirigíveis como bombardeiros e aeronaves de patrulha.

No período entre a Primeira e a Segunda Guerras Mundiais, houve um aumento na produção de dirigíveis, além das aplicações militares, como patrulha, começaram a ser usados também como transporte de passageiros.

O LZ-129 *Hindenburg* foi o maior dirigível construído, entrando em operação em 1936, ficou conhecido também pelo desastre em 1937, onde ao pousar iniciou-se um incêndio (Figura 4) causando a morte de 36 pessoas e marcando o fim da era dos dirigíveis.

Figura 4: Incêndio do LZ-129 Hindenburg



Atualmente diversas empresas estão retornando com o desenvolvimento dos dirigíveis para diversas finalidades, desde transporte de carga até como plataforma para telecomunicações, devido à grande flexibilidade em sua utilização.

1.1. Projeto Tucuxi

O Projeto Tucuxi tem como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma dirigível para pesquisas com uma elevada autonomia. Por ser um dirigível não tripulado, poderá operar de forma contínua com um baixo custo operacional, podendo ser utilizado como plataforma multiuso para projetos de telecomunicações e de pesquisas científicas.

1.2. Objetivos

- Identificar os principais dirigíveis construídos;
- Comparar parâmetros no desenvolvimento de um dirigível
- Modelar um dirigível usando os parâmetros ótimos

2. Modelamento Teórico

2.1. Arrasto

O Arrasto é uma força mecânica gerada pela interação do fluido como o corpo, é caracterizada por uma força oposta ao movimento de um corpo gerada pela resistência do fluido (NASA, 2015). A força de arrasto (F_D) é dada pela equação (1):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A_f C_D U^2 \quad (1)$$

Onde:

ρ – Massa Específica do Fluido

A_f – Área Frontal

C_D – Coeficiente de Arrasto

U – Velocidade do corpo

Como nos dirigíveis o volume é uma característica determinante, pois é o volume de gás que determina quase toda a sustentação da carga, é utilizado para determinar a força de arrasto de um dirigível uma área equivalente do volume ($V^{\frac{2}{3}}$) no lugar da área frontal, equação (2).

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^{\frac{2}{3}} C_{DV} U^2 \quad (2)$$

Como o coeficiente de arrasto é característico à forma do dirigível, para determinar qual valor do coeficiente é necessária realização de ensaios em túnel de vento ou simulações computacionais para determinar a força de arrasto.

Tendo em vista que os métodos de determinação da força de arrasto não estão prontamente disponíveis, pois em fases preliminares de projetos não se tem a forma totalmente definida do dirigível, é possível utilizar equações empíricas de diversos autores que têm resultados bastante próximos os valores reais.

Um dos métodos empíricos utilizados para determinar o coeficiente de arrasto é usar as características geométricas do dirigível, como volume, área superficial, diâmetro e comprimento, relacionando com comportamento do escoamento (Número de Reynolds, equação (3)).

$$Re = \frac{\rho U l}{\mu} \quad (3)$$

Onde:

μ - viscosidade dinâmica

Usando o Número de Reynolds na equação (4) temos o coeficiente de arrasto superficial (Hoerner, 1965).

$$C_{Df} \cong \frac{0,044}{\sqrt{Re}} \quad (4)$$

E aplicando o coeficiente de arrasto superficial na equação (5) temos coeficiente de arrasto (C_{DV}), usando apenas valores da geometria do dirigível.

$$C_{DV} = C_{Df} \frac{A_s}{V^{\frac{2}{3}}} \left(1 + 1,5 \left(\frac{d}{l} \right)^{\frac{3}{2}} + 7 \left(\frac{d}{l} \right)^3 \right) \quad (5)$$

2.2.Potência

Para poder se movimentar o dirigível precisa de um propulsor que gere uma força de empuxo maior do que a de arrasto. Potência (equação (6)) é definida como a variação de trabalho (T) em relação ao tempo (t) (Silva, 2015).

$$P = \frac{T}{t} \quad (6)$$

Trabalho (equação (7)) é definido como a energia transferida ao aplicar uma força que gere um deslocamento (Δs) (Anjos, 2015).

$$T = F \cdot \Delta s \quad (7)$$

Assim substituindo aplicando a equação (7) na equação (6), temos

$$P = \frac{F \cdot \Delta s}{t}$$

Simplificando $\frac{\Delta s}{t} = U$, a potência necessária para movimentar a uma determinada velocidade é dada pela equação (6)

$$P = F_D U \quad (8)$$

Como a força de arrasto é descrita na equação (2), substituindo na equação (6) temos

$$P = \frac{1}{2} \rho C_{DV} V^{\frac{2}{3}} U^3 \quad (9)$$

3. Metodologia

3.1. Dirigíveis Pesquisados

Para a realização do trabalho foi necessária uma pesquisa bibliográfica dos diversos dirigíveis disponíveis na literatura, de modo que fosse possível identificar quais parâmetros seriam cruciais para o desenvolvimento de um dirigível.

Os dirigíveis notáveis durante as pesquisas foram listados na Tabela 1, ou por possuir uma característica marcante ou por ter dados de construção e ensaios completos.

Tabela 1: Principais Dirigíveis da Literatura

Nome	País e Ano de Operação	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Volume (m ³)	Carga Útil (kg)	Potência Instalada (kW)	Velocidade Máxima (m/s)
<i>Classe C</i>	EUA, 1918	59,76	12,8	5 125	1 837	224	26,94
LZ-127 Graf Zeppelin	Alemanha, 1928	236,53	30,48	105 000	60 000	2 050	35,56
LZ-129 Hindenburg	Alemanha, 1936	245	41,18	~200 000	-	3 560	37,50
R101	Reino Unido, 1929	236,83	40,03	156 018	25 069	2 180	31,67
R26	Reino Unido, 1917	163,07	156,15	26 700	6 600	760	23,33
SSZ	Reino Unido, 1916	43,7	9,1	2 000	605	56	23,61
USS Akron	EUA, 1929	239,3	40,5	~200 000	-	3 344	35,56
USS Los Angeles	EUA, 1924	200,7	27,6	78 280	-	1 192	33,33
USS Shenandoah	EUA, 1923	207,26	24,0	59 465	24 300	1 100	30,56
ZMC-2	EUA, 1929	56,4	16,2	5 666	5 837	320	31,11
ZPG-2W	EUA, 1952	104,57	23,17	23 648	-	1 200	35,56

Classe C

Os dirigíveis da classe C eram dirigíveis do tipo não rígido operados pela marinha americana logo após a Primeira Guerra Mundial. Eram usados como dirigíveis de patrulha.

Foram construídos para marinha americana 10 dirigíveis em 1918, entre eles estava o primeiro dirigível a ser inflado com hélio invés de hidrogênio, o dirigível C-7 **(Erro! Fonte de referência não encontrada.)**

Figura 5: C-7, primeiro dirigível inflado com hélio



Os dirigíveis da classe C possuem diversos estudos publicados pela NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), detalhando desde a construção até ensaios realizados em túnel de vento.

LZ-127 Graf Zeppelin

Nomeado a partir do conde Ferdinand von Zeppelin, um dos pioneiros na construção de dirigíveis, utilizado para transporte de passageiros. Entrando em operação em 1928, realizou diversos voos transatlânticos e 1929 realizou um voo ao redor do mundo, no qual foi amplamente divulgado na imprensa.

Após o acidente com o LZ-129 *Hindenburg*, o LZ-127 (Figura 6) foi retirado do serviço em junho de 1937. Durante o seu tempo operacional realizou mais de 500 voos e percorreu mais de 1,5 milhões de quilômetros.

Figura 6: Multidão assiste ao pouso do LZ-127 *Graf Zeppelin*, 1930



Apesar de seu status histórico notável, não possui muitos estudos disponíveis relevantes ao trabalho.

LZ-129 Hindenburg

O maior e mais famoso dirigível, era considerado o orgulho da Alemanha Nazista. É a maior aeronave já construída, em termos de comprimento e volume. Entrando em operação em 1936, como transporte de passageiros, teve uma vida operacional curta, pois em 1937 incendiou-se ao pousar, causando enorme comoção e após o acidente todos os voos comerciais foram abandonados.

Figura 7: LZ-129 *Hindenburg*, 1936



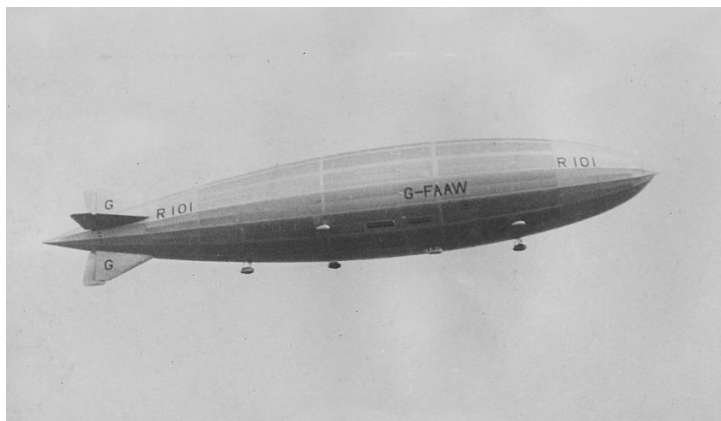
Assim como o LZ-127, o LZ-129 não possui muitos estudos disponíveis relevantes ao trabalho.

R101

Foi o maior dirigível britânico construído (Figura 8), na época de sua construção era o maior do mundo, em 1929. Serviu principalmente como aeronave experimental para o programa de dirigíveis do governo britânico.

Porém em 1932 foi destruído em um acidente, causando o encerramento do programa de pesquisas de dirigíveis britânicos.

Figura 8: R101 em voo

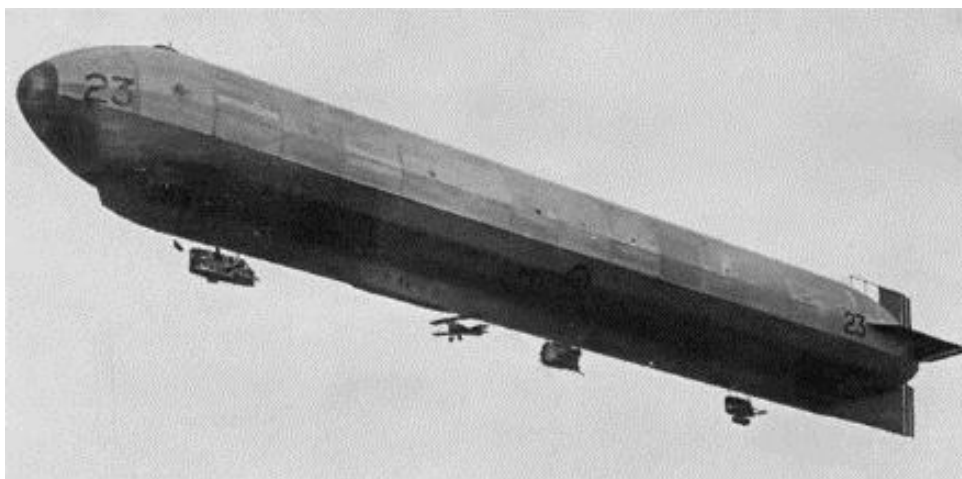


R26

Foi um dirigível da classe 23 da marinha britânica, foi usado como aeronave de patrulha e treinamento durante o final da Primeira Guerra Mundial em 1918.

Os dirigíveis da classe 23 (Figura 9) apesar de não terem sido usados em combate foram usados intensamente em voos de treinamento e serviram como plataforma de coleta de dados experimentais que foram usados no desenvolvimento do programa de dirigíveis britânicos.

Figura 9: R23 com um avião pendurado para testes de lançamento de aeronaves a partir de dirigíveis



SSZ

Os dirigíveis da classe SSZ (Figura 10) foram desenvolvidos durante a Primeira Guerra Mundial, entraram em operação em 1916, foram utilizados como aeronave de patrulha pelas marinhas americana, britânica e francesa.

Figura 10: Dirigível da classe SSZ



USS Akron

O USS Akron foi o maior dirigível operado pela marinha americana, entre 1931 e 1933, era inflado com hélio no lugar do hidrogênio, que era comumente usado como gás de sustentação na época. Foi construído para servir como aeronave de patrulha e escolta para navios da marinha. Além de disso serviu como plataforma experimental como porta-aviões, lançando e recolhendo aviões.

O USS Akron (Figura 11) foi perdido em um acidente causado por uma tempestade, causando a maior perda de vidas em um acidente com dirigíveis.

Figura 11: USS Akron



Assim como os dirigíveis da classe C, possui uma vasta gama de relatórios publicados pela NACA.

USS Los Angeles

Construído em 1924 pela mesma empresa que mais tarde construiria o LZ-129 *Hindenburg*, foi entregue aos Estados Unidos pela Alemanha como reparação pela Primeira Guerra Mundial. Foi usado principalmente como aeronave experimental no desenvolvimento do programa de aero porta-aviões, que mais tarde seria usado em testes com o USS Akron.

O USS Los Angeles (Figura 12) foi aposentado em 1932, pouco depois do USS Akron entrar em operação

Figura 12: USS Los Angeles



USS Shenandoah

O USS Shenandoah (Figura 13), foi o primeiro dirigível rígido construído e operado pela marinha americana, entrando em operação em 1923, serviu como aeronave experimental no desenvolvimento de dirigíveis para a marinha americana. Foi destruído em uma tempestade em 1925.

Figura 13: USS Shenandoah



ZMC-2

O ZMC-2 (Figura 14) foi um dirigível bastante peculiar, era um dirigível não rígido com o envelope feito de metal, no lugar do envelope de borracha, construído em 1929 para a marinha americana, foi único dirigível de metal de sucesso a ser construído. Foi operado de 1929 até 1938, quando foi aposentado.

Figura 14: ZMC-2



ZPG-2W

O ZPG-2W (Figura 15) foi um dirigível não rígido da classe N operado pela marinha americana entre 1957 e 1962, foi o maior dirigível não rígido já construído. Serviu como aeronave de patrulha e como aeronave de alerta antecipado.

Figura 15: ZPG-2W



3.2. Modelos CAD e Análises Aerodinâmicas

Para a realização dos cálculos do coeficiente de arrasto utilizando a equação (5), onde se usa as características geométricas do envelope, e posteriormente realizar simulações, foram recriados em software CAD os envelopes usando os dados de construção apresentados em relatórios.

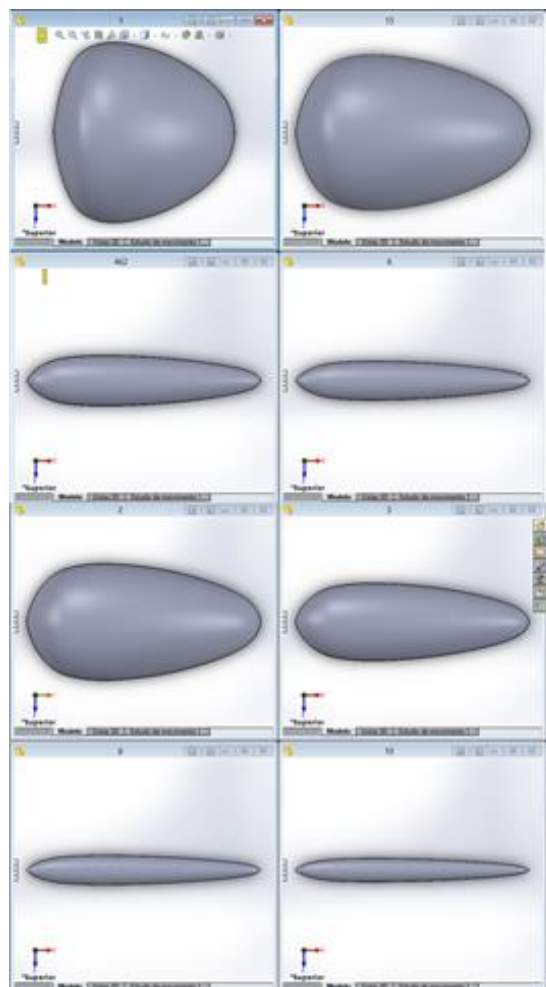
Ao recriar digitalmente os envelopes, valores como volume, centro de gravidade, área superficial, etc. são fornecidos com um elevado grau de precisão, principalmente a área superficial, utilizada para a determinação do coeficiente de arrasto, que nem sempre está disponível nas especificações dos dirigíveis.

Dentre os dirigíveis pesquisados e listados anteriormente na Tabela 1, cinco dirigíveis apresentaram dados completos de ensaios e de construção, podendo assim ser recriados digitalmente de forma fiel. Foram eles:

- **Classe C**, (Zahm, et al., 1928)
- **R26**, (Pannel, et al., 1920)
- **SSZ**, (Frazer, et al., 1918)
- **USS Akron**, (Freeman, 1933)
- **USS Shenandoah**, (Zahm, et al., 1922)

Os ensaios e a construção dos modelos dos dirigíveis da classe C foram detalhados em *Drag of C-Class Airship Hull of Various Fineness Ratios* (Zahm, et al., 1928), onde foi feita uma análise da relação da razão do comprimento pelo diâmetro (λ) com o coeficiente de arrasto. Ao todo foram oito razões de diferentes (1, 1,5, 2, 3, 4,62, 6, 8 e 10) que foram recriados (Figura 16) com ajuda do SolidWorks.

Figura 16: Diversas razões de comprimento pelo diâmetro (λ) o do perfil dos dirigíveis da classe C



As propriedades geométricas necessárias para o cálculo do coeficiente de arrasto se encontram na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades geométricas dos desenhos dos dirigíveis *Classe C*

λ	Comprimento (m)	Diâmetro Máximo (m)	Área Superficial (m ²)	Volume (m ³)
1	0,1956000	0,1956	0,11995257	0,00382088
1,5	0,2933700	0,1956	0,16095003	0,00572999
2	0,3910584	0,1956	0,20365381	0,00763578
3	0,5870448	0,1956	0,291491	0,01146754
4,62	0,9037320	0,1956	0,43831837	0,01766206
6	0,1173480	0,1956	0,56421587	0,02292678
8	0,1564538	0,1956	0,74801849	0,03056754
10	0,1955902	0,1956	0,93229309	0,03822232

Com os valores da área superficial foram feitos os cálculos dos coeficientes de arrasto usando a equação (5) comparou com os valores apresentados nos ensaios. Na

Tabela 3 é apresentado os resultados dos cálculos juntamente com os coeficientes de arrasto medidos nos ensaios.

Tabela 3: Cálculo do coeficiente de arrasto dos modelos do dirigível da classe C

Viscosidade Dinâmica (Pa . s)		Massa Específica (kg/m ³)	Velocidade (m/s)		
0,000017		1,2255	17,8816		
λ	Número de Reynolds	C _{DV} Experimental	C _{Dr}	C _{DV}	C _{DV} Exp. / C _{DV}
1	3,15E+04	0,1105	0,0055	0,2581	0,428
1,5	4,13E+04	0,0507	0,0052	0,1012	0,501
2	5,00E+04	0,0357	0,0049	0,0623	0,573
3	6,56E+04	0,0306	0,0046	0,0409	0,748
4,62	8,74E+04	0,0280	0,0043	0,0339	0,825
6	1,04E+05	0,0298	0,0041	0,0326	0,914
8	1,26E+05	0,0318	0,0039	0,0323	0,983
10	1,46E+05	0,0326	0,0038	0,0327	0,999

Assim como nos dirigíveis da Classe C, também foram recriados os modelos dos demais dirigíveis (Figura 17) e as propriedades geométricas foram organizadas na Tabela 4.

Figura 17: Modelos CAD dos envelopes, 1: R26, 2: SSZ, 3: USS Akron e 4: USS Shenandoah

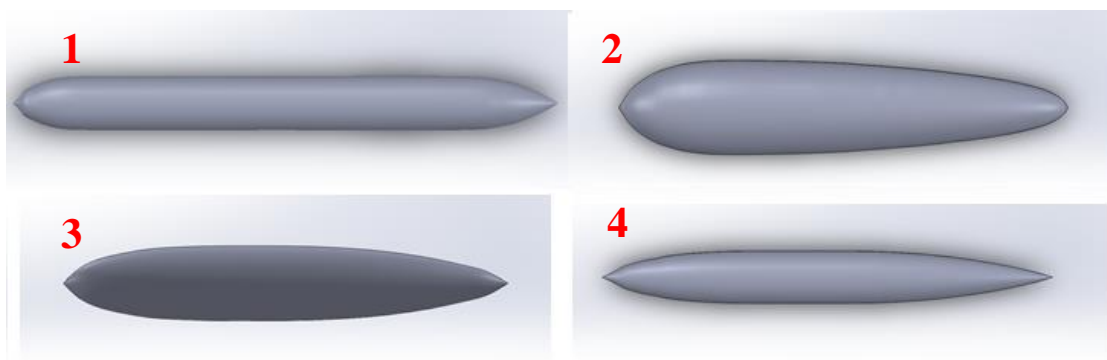


Tabela 4: Propriedades geométricas dos dirigíveis

Dirigível	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	λ	Área Superficial (m ²)	Volume (m ³)
R26	0,120	1,223	10,18	4,29E-01	0,015046
SSZ	0,183	0,869	4,75	3,98E-01	0,034930
USS Akron	1,010	5,980	5,91	1,51E+01	0,012344
USS Shenandoah	0,200	1,720	8,60	8,09E-01	3,27006

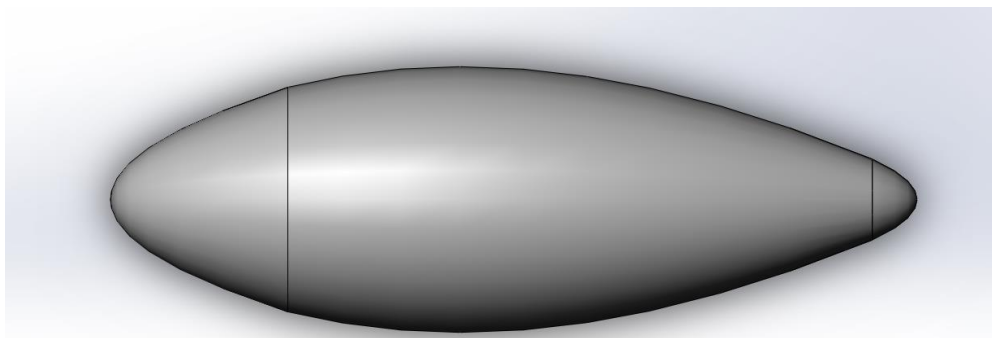
Usando as propriedades dos dirigíveis, também foram calculados os coeficientes de arrasto e comparados com os valores dos ensaios.

Tabela 5: Cálculo do coeficiente de arrasto dos modelos de diversos dirigíveis

Viscosidade Dinâmica (Pa . s)	Massa Específica (kg/m ³)						
0,000017	1,2255						
Dirigível	λ	Velocidade (m/s)	Número de Reynolds	C _{DV} Exp.	C _{Dr}	C _{DV}	C _{DV} Exp. / C _{DV}
R26	10,18	15,24	1,34E+06	0,0492	0,00419	0,0355	1,387
SSZ	4,75	12,19	7,61E+05	0,0292	0,00460	0,0364	0,803
USS Akron	5,91	44,70	1,92E+07	0,0190	0,00269	0,0210	0,985
USS Shenandoah	8,60	17,88	2,21E+06	0,0308	0,00386	0,0312	0,903

Após comparar os resultados analíticos e os experimentais, notou-se que os valores analíticos eram bastante razoáveis para uma primeira aproximação. Assim deu-se início ao desenvolvimento da forma do que seria o perfil do envelope do Tucuxi. Usando software CAD desenhou-se um perfil de um paraboloide de revolução que tivesse as dimensões desejadas, 13 m de comprimento e no máximo 4,5 m de diâmetro. O perfil que apresentou melhor relação volume por área superficial foi definido pelo orientador como a forma final a ser usada (Figura 18/Figura 1).

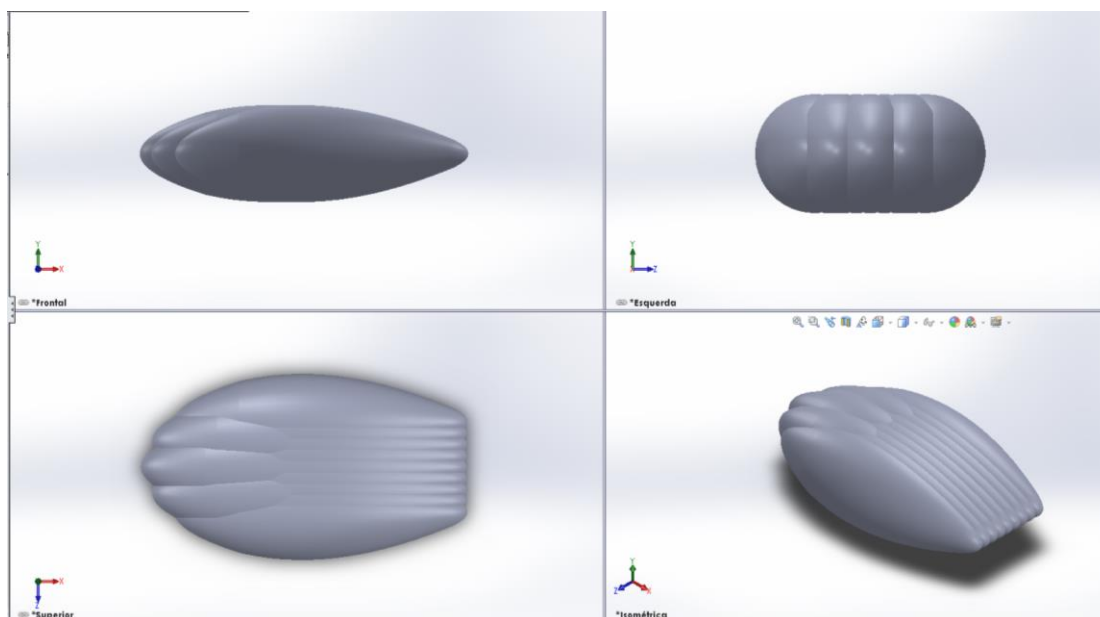
Figura 18: Forma base do Tucuxi



Porém o volume da forma base não atendia aos requisitos do projeto, que era de 300 m³, pois a carga de um dirigível é proporcional ao volume de gás de sustentação. Para um volume requerido e mantendo a mesma razão de comprimento pelo diâmetro, seria necessário que o comprimento fosse de no mínimo 18 m, quase 40% maior que o previsto.

A solução encontrada foi de agrupar horizontalmente vários envelopes, assim permitindo um significativo aumento do volume se aumentar em demasia o comprimento e manteria a altura. O resultado é apresentado na Figura 19, possuindo um volume de 287,5 m³ e uma área superficial de 257,8 m² a forma foi considerada ideal para construção.

Figura 19: Vistas da forma final do Tucuxi



Usando a equação (5) na forma base com 300 m^3 e a forma final obteve-se os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Comparação entre a Forma Base e a Forma Final

Velocidade (m/s)	Viscosidade Dinâmica (Pa . s)	Massa Específica (kg/m ³)
10 m/s	0,000017	1,185

	Forma Base	Forma Final
Volume	301,42	287,55
Área Superficial	257,76	257,80
Comprimento	18,20	14,5
Diâmetro	5,98	~4,76
λ	3,04	2,29
Número de Reynolds	1,27E+07	1,01E+07
C_{DV}	0,025	0,036

Apesar da Forma Base ter um desempenho aerodinâmico melhor que a Forma Final, essa tem a vantagem de que possui uma área de topo maior que a da Forma Base, assim permitindo a instalação de painéis solares, que está dentro da proposta do projeto.

3.3. Cálculo da Potência Necessária

A partir dos cálculos do coeficiente de arrasto é possível determinar de forma aproximada qual é a potência necessária para deslocar o dirigível em questão.

Usando a equação (9) nos dirigíveis da Tabela 1 podemos obter o valor da potência necessária para movimentar o dirigível à sua velocidade máxima, se estiver com o valor

da área superficial disponível, porém isso não inclui a eficiência do sistema de propulsão (hélices e transmissão)

Ao recriar o modelo em tamanho real do envelope do dirigível da classe C foram obtidas as propriedades geométricas necessárias para o cálculo do coeficiente de arrasto e posteriormente de potência conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Potencia calculada usando a equação (9) para um dirigível da classe C

Comprimento (m)	56,76
Diâmetro (m)	12,8
Área Superficial (m²)	18,97
Volume (m³)	5002
Viscosidade Dinâmica (Pa . s)	0,000017
Massa Específica (kg/m³)	1,1185
Velocidade (m/s)	26,94
C_{DV}	0,0158
Potência Calculada (kW)	53,57

Assim da mesma forma foi realizada o cálculo na Forma Final do Tucuxi a uma velocidade de 10 metros por segundo, obtendo uma potência necessária de 918 W.

3.4.Simulações

Usando a plataforma online de simulações numéricas SimScale (disponível em <<http://www.simscale.com>>), foram realizadas simulações de dinâmica de fluidos computacionais, de modo que fosse possível obter valores para a força de arrasto, tornando possível o cálculo do coeficiente de arrasto.

Em um primeiro momento foram realizadas recriações dos ensaios dos dirigíveis da classe C de forma que os resultados pudessem ser comparados com os presente no relatório dos ensaios (Zahm, et al., 1928).

A plataforma apresentou poucas opções para criação de malha, de forma que não haveria um controle maior sobre as malhas geradas. A nas Figuras Figura 20 e Figura 21 é mostrado Figura 20 exemplos de malhas geradas, mostrando o refinamento na região do contorno do dirigível e o domínio criado para a geração das malhas. Nas configurações para geração de malha foi selecionada uma malha com refinamento nível 4, de uma escala de 1 a 5, com 1 o menos refinado e 5 o mais refinado.

Figura 20: Exemplo de malha gerada no SimScale, dirigível da classe C com $\lambda = 8$

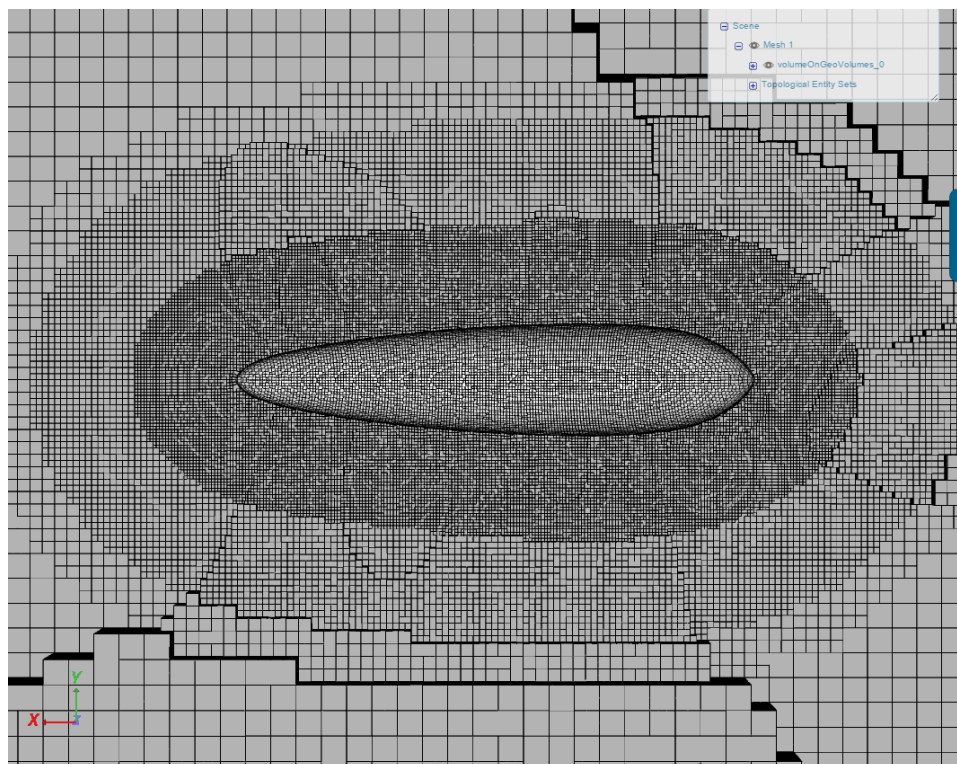
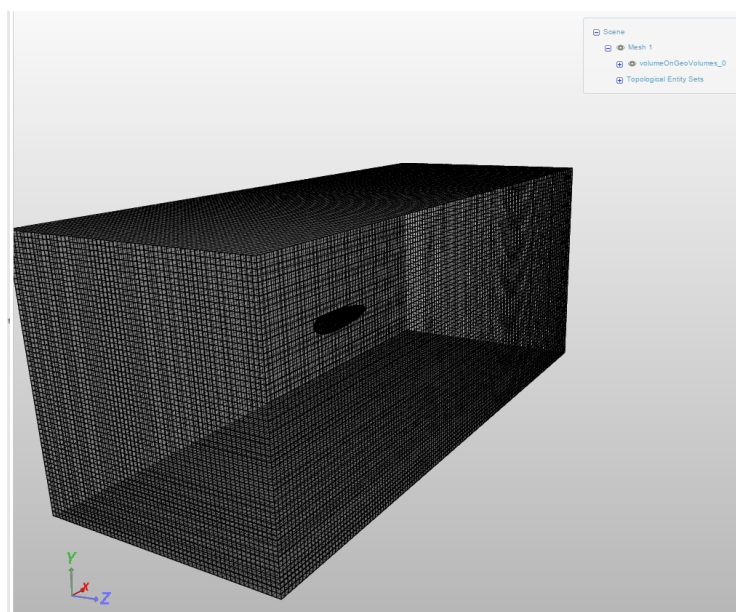


Figura 21: Domínio do dirigível da classe C com $\lambda = 4,62$



A partir das malhas geradas foram determinadas as regiões do contorno, regiões de entrada (*inlet*) e de saída de ar (*outlet*), paredes, em seguida foram adicionadas as condições do escoamento, velocidade inicial, pressão, propriedades do fluido. Em todas as simulações foram usadas as configurações presente na Tabela 8.

Tabela 8: Configurações utilizadas nas simulações dos dirigíveis da classe C no SimScale

Velocidade	17,8816 m/s
Pressão de referencia	0 Pa
Energia cinética turbulenta	0,85 m ² /s ²
Dissipação específica da turbulência	729 1/s
Massa específica do fluido	1,2255 kg/m ³
Viscosidade dinâmica	0,000001 m ² /s

Após serem feitas as configurações, cada dirigível foi submetido a uma simulação numérica para que em seguida pudessem ser extraídas as informações referente às forças aerodinâmicas que o modelo é submetido. Nas Figuras Figura 22 e Figura 23 são mostrados os gráficos de cada variável calculada e seu valor a cada iteração.

Figura 22: Linhas de convergência do dirigível da classe C com $\lambda = 8$

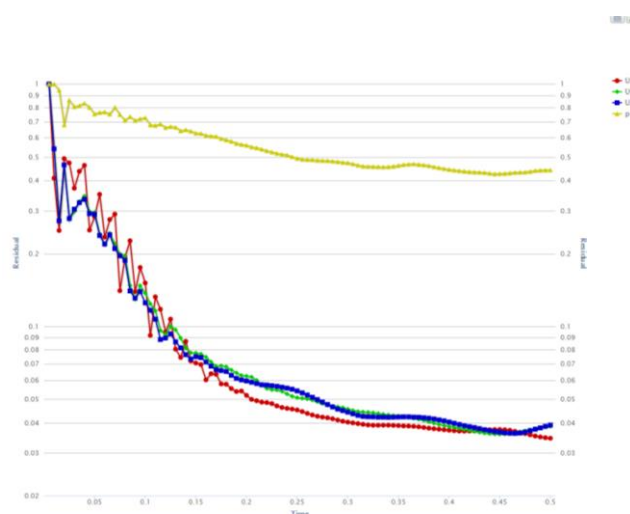
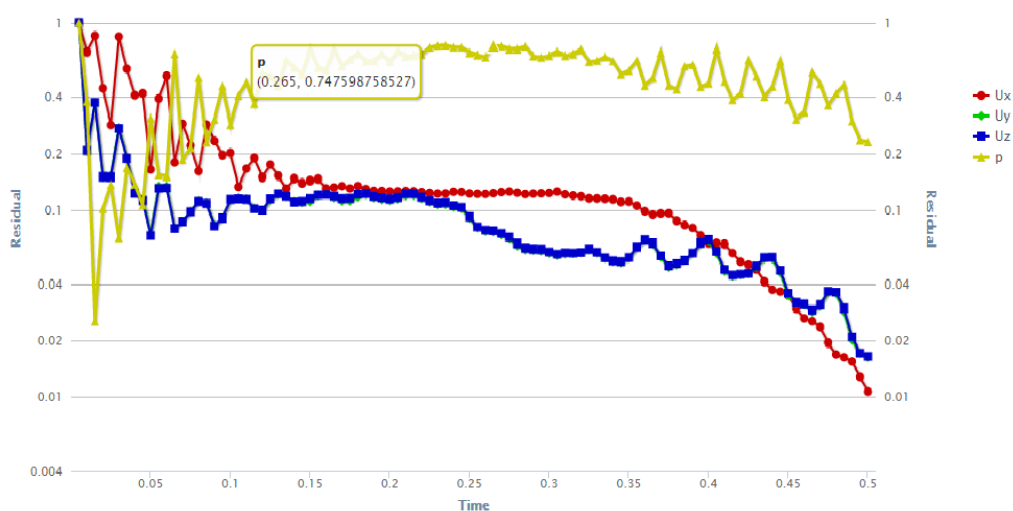


Figura 23 Linhas de convergência do dirigível da classe C com $\lambda = 4,62$



Terminadas as simulações, os resultados foram exportados para um programa de tratamento de resultados de simulações numéricas, Paraview, para que fosse possível extrair as informações referentes à força de arrasto. Para isso era preciso que fosse integrada a pressão exercida na área do corpo do modelo do dirigível, em seguida era preciso extrair as forças normais nos eixos cartesianos x , y e z . Feito isso a intensidade da força era apresentada para cada sentido dos eixos cartesianos, com o eixo x sendo referente ao sentido do escoamento do fluido, portando o de arrasto.

Figura 24: Contornos de pressão no dirigível da classe C com $\lambda = 1$

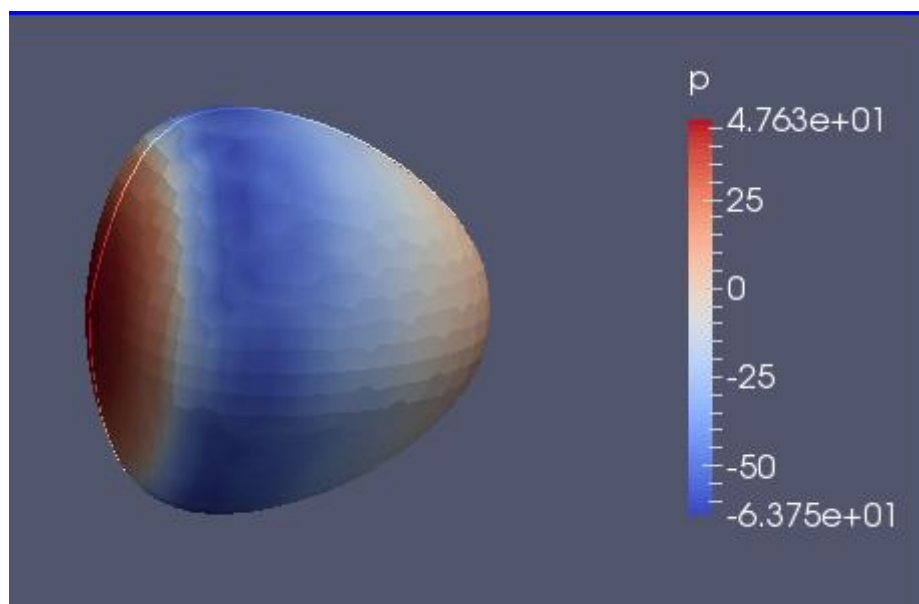
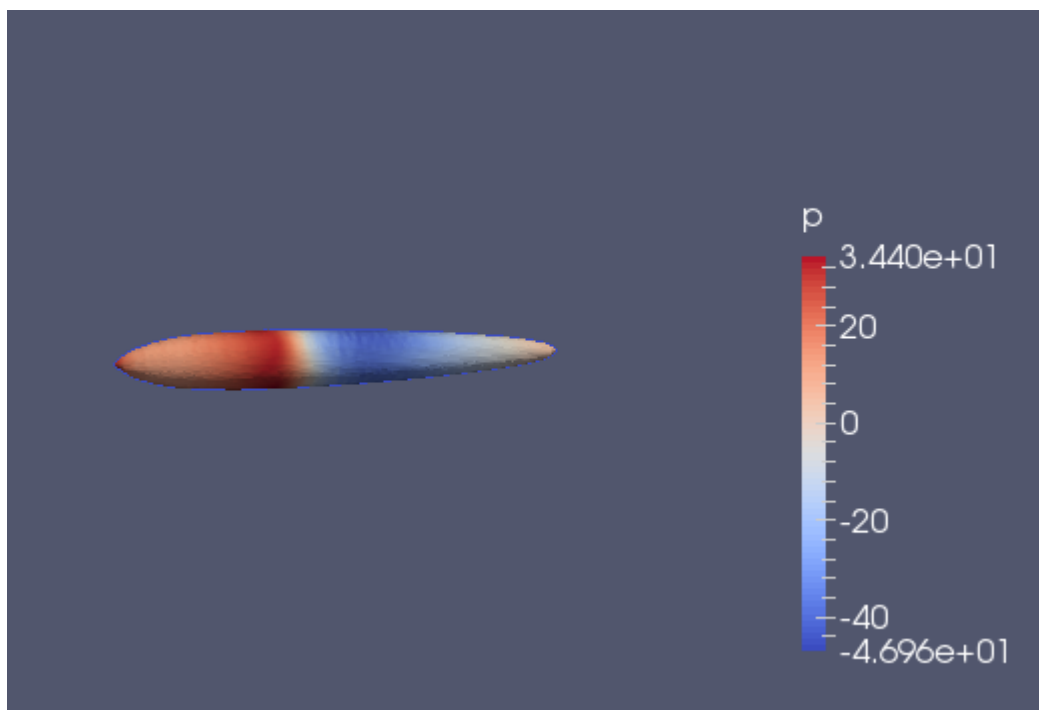


Figura 25: Contornos de pressão no dirigível da classe C com $\lambda = 8$

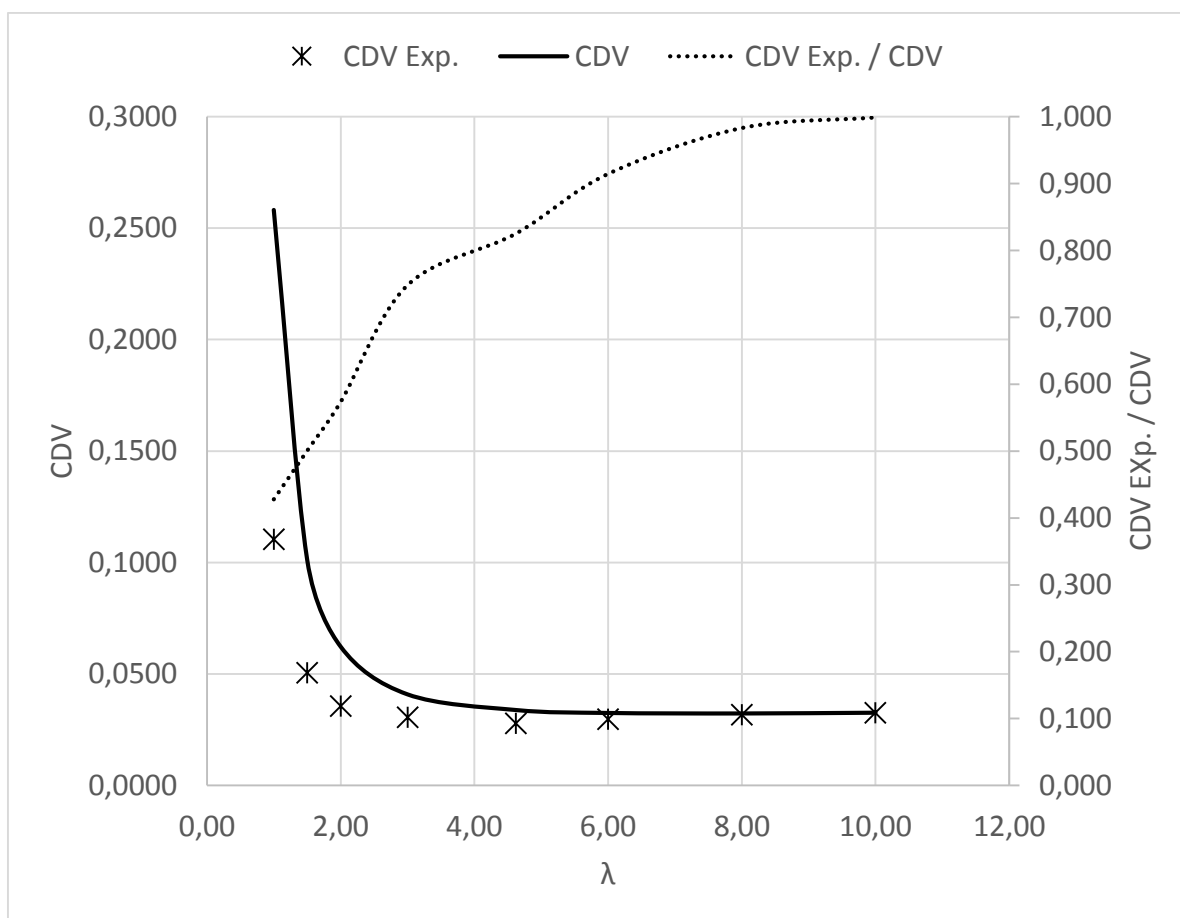


4. Resultados

4.1. Comparações Cálculos contra Ensaio

Para os ensaios dos dirigíveis da classe C, observou-se uma diferença de até 60% para baixas razões de comprimento pelo diâmetro (λ), mas apresenta um rápido acréscimo na precisão conforme aumenta o valor λ , em relação aos valores obtidos em ensaio. Usando os dados da Tabela 3 foi plotado um gráfico dos valores dos coeficiente de arrasto (Figura 26)

Figura 26 Coeficientes de arrasto, experimentais e calculados, dos dirigíveis da classe C para vários valores de λ



Do mesmo modo que nos cálculos dos dirigíveis da classe C, os demais apresentaram valores bastante precisos em relação aos valores obtidos nos respectivos ensaios

4.2. Comparações Ensaio contra Simulações

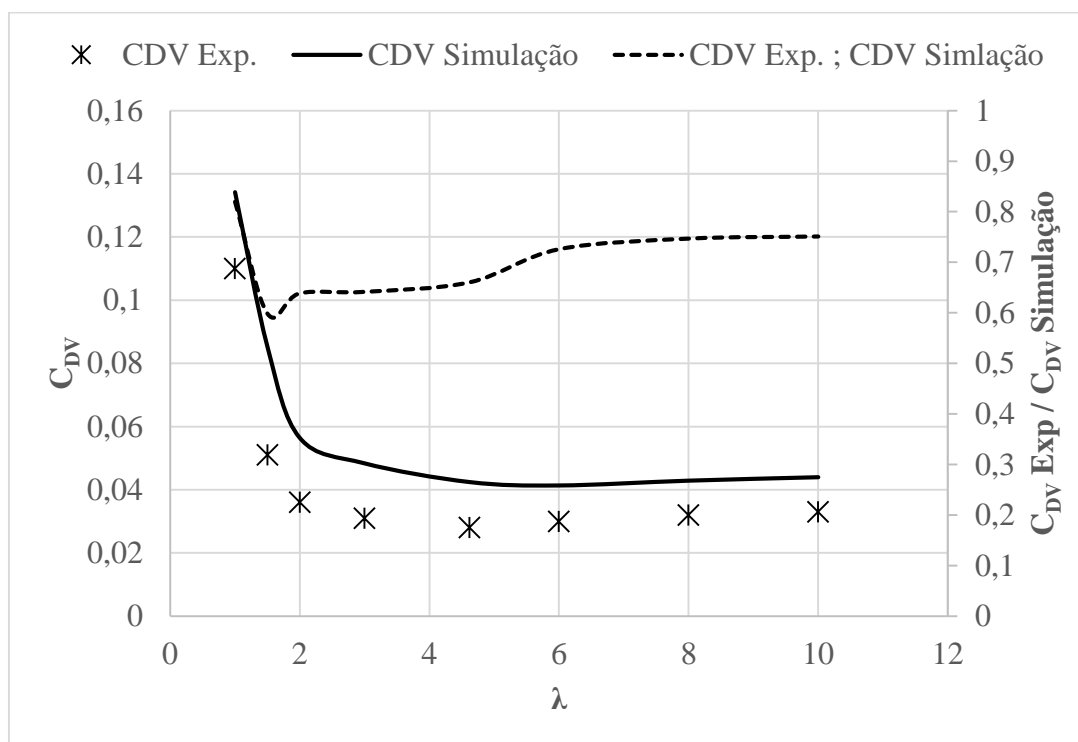
Os dados das simulações dos dirigíveis da classe C foram organizados na Tabela 9 e comparados com os valores dos ensaios, a partir da força de arrasto obtida pelas simulações foi calculado o coeficiente de arrasto usando a equação (2).

Tabela 9: Valores dos ensaios e das simulações para vários valores de λ a uma velocidade de 17,8816 m/s

λ	Força de Arrasto (N)			Coeficiente de Arrasto		
	Experimental	Simulação	Exp. / Simulação	C_{DV} Exp.	C_{DV} Simulação	C_{DV} Exp. / C_{DV} Simulação
1	0,5337866	0,642694	0,83	0,1105	0,134214	0,82
1,5	0,3558577	0,534841	0,66	0,0507	0,08525	0,60
2	0,3113755	0,428329	0,73	0,0357	0,056378	0,64
3	0,3336166	0,481534	0,69	0,0306	0,04833	0,64
4,62	0,4003399	0,5635	0,71	0,0280	0,042407	0,66
6	0,4893044	0,653583	0,75	0,0298	0,041334	0,73
8	0,6005099	0,820854	0,73	0,0318	0,042854	0,75
10	0,7561977	0,976955	0,77	0,0326	0,043944	0,75

Com os dados da Tabela 9 foi plotado um gráfico para melhor observar a relação dos coeficientes obtidos através de simulações com os de ensaios (Figura 27).

Figura 27: Coeficientes de arrasto, experimentais e simulados, dos dirigíveis da classe C para vários valores de λ



5. Conclusões

O uso de dirigíveis está voltando a ter destaque, pelas suas características inigualáveis, principalmente pelo fato de poder transportar grandes volumes de carga a uma velocidade razoável, que desde o acidente com o LZ-129 *Hindenburg* há quase oitenta anos permaneceu sem nenhum desenvolvimento significativo, além da evolução dos materiais de construção os métodos de operação se tornaram mais seguro e eficiente o manuseio de dirigíveis.

Nos dirigíveis o volume é um parâmetro determinante, pois além da carga sustentada ser proporcional ao volume, assim como a área superficial, pois os dois possuem relação direta com o arrasto do dirigível, conseqüentemente na sua potência necessária e na autonomia

Apesar dos valores calculados terem uma variação na precisão maior do que nas simulações, nas razões de comprimento pelo diâmetro ($\lambda > 3$), onde se tem um uso mais prático dos dirigíveis, a precisão foi notável. Enquanto os valores obtidos através de simulações mantiveram uma variação mais estável, pode se considerar o devido a problemas de construção de malha. Conclui-se que em projeto em fase conceitual, no qual o Projeto Tucuxi se encontra atualmente, a realização de ensaios físicos não são uma alternativa viável, pois os custos para realização dos ensaios tende a crescer pelo fato de que os parâmetros do projeto estão em constante mudança. Assim as alternativas, simulações e cálculos analíticos, são extensivamente empregadas, devido ao seu baixo custo operacional e aos seus resultados bastante representativos.

6. Referências

Anjos, Talita A. 2015. TRABALHO DE UMA FORÇA. *Brasil Escola*. [Online] 2015. [Acesso em: 30 de abril de 2015.] <http://www.brasilecola.com/fisica/trabalho-uma-forca.htm>.

Frazer, R. A. e Simmons, L. F. G. 1918. *Investigation of the Forces and Moments Upon a Complete Model Airship Type S.S.Z. with an Analysis of the Effects of Full and Partial Rigging*. London : Aeronautical Research Comitte, 1918. Reports and Memoranda No 457.

Freeman, Hush B. 1933. *Force Measurements on a 1/40-Scale Model of the U. S. Airship "Akron"*. Washington : U. S. Navy, 1933. NACA TR-432.

Hoerner, Sighard F. 1965. *Fluid-Dynamic Drag*. Bakersfield, CA, EUA : Hoerner Fluid Dynamics, 1965.

NASA. 2015. What's Drag? NASA. [Online] 5 de Maio de 2015. [Acesso em: 20 de Junho de 2015.] <https://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/drag1.html>.

Pannel, J. R. e Frazer, R. A. 1920. *Account of Some Experiments on Rigid Airship R.26*. London : Aeronautical Research Committee, 1920. Reports and Memoranda No 674.

Silva, Marco Aurélio da. 2015. POTÊNCIA E RENDIMENTO. *Brasil Escola*. [Online] 2015. [Acesso em: 30 de abr de 2015.] <http://www.brasilecola.com/fisica/potencia.htm>.

Stockbridge, Casey, Ceruti, Alessandro e Marzocca, Pier. 2012. Airship Reseach and Development in the Areas of Design, Structures, Dynamics and energy Systems. *International Journal of Aeronautical & Space Science*. 2012, pp. 170-187.

Zahm, A. F., Smith, R. H. e Louden, F. A. 1922. *Air Forces, Moments and Damping on Model of Fleet Airship USS Shenandoah*. Washington : U. S. Navy, 1922. NACA TR-215.

—. **1928.** *Drag of C-Class Airship Hull of Various Fineness Ratios*. NACA. Washington D.C : Government Printing Office, 1928. NACA TR-2019.