

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**JONATHAN CRESPO PEREIRA**

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL, LEVANTAMENTO DOS COEFICIENTES  
AERODINÂMICOS E TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS**

**RIO DE JANEIRO  
2022**

JONATHAN CRESPO PEREIRA

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL, LEVANTAMENTO DOS COEFICIENTES  
AERODINÂMICOS E TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS

Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(es): Victor Santoro Santiago, D.Sc.

Rio de Janeiro

2022

©2022

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Pereira, Jonathan Crespo.

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL, LEVANTAMENTO DOS COEFICIENTES AERODINÂMICOS E TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS / Jonathan Crespo Pereira. – Rio de Janeiro, 2022.

102 f.

Orientador(es): Victor Santoro Santiago.

Projeto de Final de Curso (graduação) – Instituto Militar de Engenharia, Engenharia Mecânica, 2022.

1. Foguete. 2. Solidworks. 3. Coeficientes aerodinâmicos. 4. Trajetória balística. 5. PRODAS. 6. Tabela de tiro. i. Santiago, Víctor Santoro (orient.)  
ii. Título

## CIP - Catalogação na Publicação

Pereira, Jonathan Creso  
MODELAGEM TRIDIMENSIONAL, LEVANTAMENTO DOS  
COEFICIENTES AERODINÂMICOS E TRAJETÓRIA DO FOGUETE  
SS-09 TS / Jonathan Creso Pereira. – Rio de  
Janeiro, 2022.  
102 f.

Orientador: Victor Santoro Santiago.

Projeto Final de Curso (graduação) – Instituto  
Militar de Engenharia, Bacharel em Engenharia  
Mecânica e de Armamento, 2022.

1. Foguete. 2. Solidworks. 3. Coeficientes  
aerodinâmicos. 4. Trajetória balística. 5. PRODAS.  
I. Santiago, Victor Santoro, orient. II. Título

**JONATHAN CRESPO PEREIRA**

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL, LEVANTAMENTO  
DOS COEFICIENTES AERODINÂMICOS E  
TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS**

Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

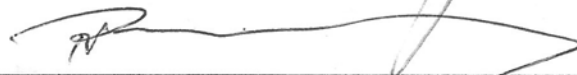
Orientador(es): Victor Santoro Santiago.

Aprovada em 06 de outubro de 2022, pela seguinte banca examinadora:



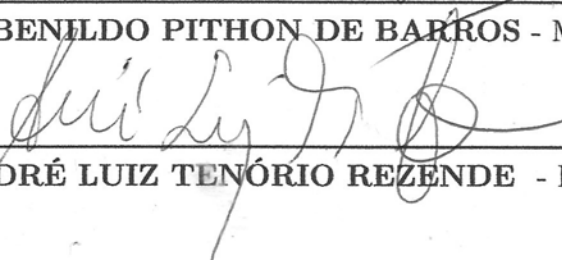
---

Prof. **VICTOR SANTORO SANTIAGO** - D.Sc. do IME - Presidente



---

Prof. **RUBENILDO PITHON DE BARROS** - M.Sc. do IME



---

Prof. **ANDRÉ LUIZ TENÓRIO REZENDE** - D.Sc. do IME

Rio de Janeiro

2022

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,  
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

## AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados primeiramente a Deus e minha família que muito me apoiou na elaboração deste projeto final de curso. Aos professores Victor Santoro Santiago, Rubenildo Pithon de Barros e André Luiz Tenório Rezende que muito contribuíram desde quando a concepção do presente projeto era apenas uma ideia até ao acompanhamento dos resultados finais obtidos.

Agradeço a toda equipe do Centro Tecnológico do Exército na qual destaco TC Dal Bello e Cap Ricardo que mesmo com todas as missões diárias sempre se disponibilizaram em receber-me da melhor maneira possível.

Agradecimentos especiais aos membros da Comissão de Absorção de Conhecimentos e Transferência de Tecnologia da Avibras e do Forte Santa Bárbara/Centro de Instrução de Artilharia de Mísseis e Foguetes que muito me auxiliaram com manuais e documentos relacionados ao assunto proposto.

*“Seja você quem for,  
seja qual for a posição social que você tenha na vida,  
a mais alta ou a mais baixa,  
tenha sempre como meta muita força, muita determinação  
e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus,  
que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”  
(Ayrton Senna)*



## RESUMO

Neste trabalho é explorado a modelagem tridimensional do foguete SS-09 TS, utilizando-se das ferramentas que compõem o programa *Solidworks*. Através do desenho obtido, gerado no *software* já mencionado, determina-se os coeficientes aerodinâmicos do foguete, reproduzindo a trajetória balística, através do *software* *PRODAS*.

Por fim, buscou-se comparar os resultados obtidos com as tabelas de tiro disponíveis para o foguete estudado.

**Palavras-chave:** Foguete. Solidworks. Coeficientes aerodinâmicos. Trajetória balística. PRODAS. Tabela de tiro.

## ABSTRACT

In this work, the three-dimensional modeling of the SS-09 TS rocket is explored, using the tools that make up the *Solidworks* program. Through the obtained design, generated in the mentioned before *software*, the aerodynamic coefficients of the rocket are determined, reproducing the ballistic trajectory, through the *PRODAS software*.

Finally, we sought to compare the results obtained with the shooting tables available for the rocket studied.

**Keywords:** Rocket. Solidworks. Aerodynamic coefficients. Ballistic trajectory. PRODAS. Firing table.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dois foguetes F-114-R-E. . . . .	19
Figura 2 – Fv-108-R com dez tubos montado sobre veículo 4x4 Jeep Willys Overland $\frac{3}{4}$ ton. . . . .	20
Figura 3 – Lançador de foguete F-114-DE com cinco foguetes, montado sobre reparo Bofors 40/60 em desfile militar de 28 de junho de 1966. . . . .	20
Figura 4 – Lançador de foguetes rotativo acoplado à torre de um M-8 Greyhound 6x6. . . . .	21
Figura 5 – Lançador de foguetes montado sobre um M-20 6x6. . . . .	21
Figura 6 – Lançamento de um foguete X-40 do veículo lançador XLF-40 em testes realizados na Marambaia, em 11 de agosto de 1982. . . . .	22
Figura 7 – O X-40 sobre um reparo auto rebocado montado sobre uma carreta Sanvas. . . . .	22
Figura 8 – Elementos da trajetória (C6-40). . . . .	26
Figura 9 – Definição coordenadas foguete. . . . .	27
Figura 10 – Força de arrasto (CARLUCCI; JACOBSON, 2008). . . . .	28
Figura 11 – Momento de amortecimento de rotação (CARLUCCI; JACOBSON, 2008). . . . .	29
Figura 12 – Momento de rolagem (CARLUCCI; JACOBSON, 2008). . . . .	29
Figura 13 – Força de sustentação (CARLUCCI; JACOBSON, 2008). . . . .	30
Figura 14 – Forças de arrasto, sustentação, normal e axial (MCCOY, 1998). . . . .	31
Figura 15 – Ilustração do centro de gravidade (CG) e do centro de pressão (CP) do foguete SS-09 TS. . . . .	32
Figura 16 – Momento de capotamento (CARLUCCI; JACOBSON, 2008). . . . .	32
Figura 17 – Força e momento Magnus (CARLUCCI; JACOBSON, 2008). . . . .	33
Figura 18 – Força e momento amortecimento de arfagem (CARLUCCI; JACOBSON, 2008). . . . .	35
Figura 19 – Estrutura molecular do polibutadieno líquido hidroxilado. . . . .	38
Figura 20 – Fluxograma com as etapas de fabricação do propelente tipo "compo- site"(MARTHO, 2020). . . . .	39
Figura 21 – Constituição do Foguete SS-09 TS (EB70-MT-11.000). . . . .	41
Figura 22 – Constituição da cabeça de guerra do foguete SS-09 TS (EB70-MT-11.000). . . . .	41
Figura 23 – Visão seccionada da cabeça de guerra do foguete SS-09 TS (EB70-MT- 11.000). . . . .	42
Figura 24 – Visão seccionada da espoleta detonadora de impacto AVE-70 M9-B (EB70-MT-11.000). . . . .	43
Figura 25 – Conjunto de tubeiras com empenas do foguete SS-09 TS (EB70-MT- 11.000). . . . .	45

Figura 26 – Foguete SS-09 TS (Centro de Catalogação de Defesa - CECADE). . . . .	46
Figura 27 – Modelagem tridimensional do foguete SS-09 TS. . . . .	47
Figura 28 – Vista do propelente em modelagem tridimensional do foguete SS-09 TS.	47
Figura 29 – Desenho técnico do foguete SS-09 TS. . . . .	47
Figura 30 – <i>Mighty Mouse</i> MK4 (PARSCH, 2009) . . . . .	48
Figura 31 – Sistema <i>Hydra 70</i> MK 66 com diversos tipos de ogiva (General Dynamics) . . . . .	49
Figura 32 – Aba <i>Formatted Results</i> - Coeficientes Aerodinâmicos . . . . .	51
Figura 33 – Aba <i>Formatted Results</i> - Conversão coeficientes . . . . .	52
Figura 34 – Aba <i>Plotted Results</i> - $C_{X0}$ x Mach . . . . .	53
Figura 35 – Aba <i>Plotted Results</i> - $C_{Na}$ x Mach. . . . .	53
Figura 36 – Aba <i>Plotted Results</i> - $CPN$ x Mach. . . . .	54
Figura 37 – Aba <i>Plotted Results</i> - $C_{xf}$ x Mach. . . . .	54
Figura 38 – Tempo x Deslocamento . . . . .	56
Figura 39 – Tempo x Velocidade . . . . .	57
Figura 40 – Extrato da aba <i>Formatted Output</i> . . . . .	58
Figura 41 – Tempo x Deslocamento . . . . .	60
Figura 42 – Tempo x Velocidade . . . . .	60
Figura 43 – Extrato da aba <i>Formatted Results</i> . . . . .	62
Figura 44 – Comparação do alcance <i>versus</i> erro percentual de alcance da flecha entre Fabricante e 4-DOF . . . . .	64
Figura 45 – Comparação do alcance <i>versus</i> erro percentual de alcance da flecha entre Fabricante e 6-DOF . . . . .	64
Figura 46 – Comparação do alcance <i>versus</i> erro percentual de alcance da flecha entre 4-DOF e 6-DOF . . . . .	65
Figura 47 – Comparação do alcance <i>versus</i> erro percentual de elevação entre Fabricante e 4-DOF . . . . .	66
Figura 48 – Comparação do alcance <i>versus</i> erro percentual de elevação entre Fabricante e 6-DOF . . . . .	66
Figura 49 – Comparação do alcance <i>versus</i> erro percentual de elevação entre 4-DOF e 6-DOF . . . . .	67
Figura 50 – Comparação do alcance <i>versus</i> erro percentual de velocidade entre 4-DOF e 6-DOF . . . . .	67
Figura 51 – Comparação das tabelas de tiro . . . . .	68
Figura 52 – Extrato tela <i>PRODAS - Analysis - Aerodynamics</i> . . . . .	72
Figura 53 – Aba <i>Geometry inputs</i> . . . . .	72
Figura 54 – Aba <i>Aero Model</i> . . . . .	73
Figura 55 – Aba <i>Tabular Results</i> . . . . .	73
Figura 56 – Extrato tela <i>PRODAS - Analysis - Trajectories</i> . . . . .	74

Figura 57 – Aba <i>Setup/Run</i> . . . . .	74
Figura 58 – Aba <i>Initial Conditions</i> . . . . .	75
Figura 59 – Aba <i>Projectile Parameters</i> . . . . .	75
Figura 60 – Aba <i>Tabular Results</i> . . . . .	76
Figura 61 – Extrato tela <i>PRODAS - Analysis - Ballistic Tables</i> . . . . .	77
Figura 62 – Aba <i>Setup</i> . . . . .	77
Figura 63 – Aba <i>Results Tables</i> . . . . .	78
Figura 64 – Extrato tela <i>PRODAS - Analysis - Trajectories</i> . . . . .	79
Figura 65 – Aba <i>Setup/Run</i> . . . . .	79
Figura 66 – Aba <i>Initial Conditions</i> . . . . .	80
Figura 67 – Aba <i>Projectile Parameters</i> . . . . .	80
Figura 68 – Aba <i>Tabular Results</i> . . . . .	81
Figura 69 – Aba <i>Results Tables</i> . . . . .	82
Figura 70 – Aba <i>Formatted Results</i> . . . . .	83
Figura 71 – Aba <i>Formatted Results</i> - continuação . . . . .	84
Figura 72 – Aba <i>Formatted Results</i> - continuação . . . . .	85
Figura 73 – Aba <i>Formatted Results</i> - continuação . . . . .	86
Figura 74 – Aba <i>Plotted Results</i> - Zero Yaw Drag Aerodynamics . . . . .	87
Figura 75 – Aba <i>Plotted Results</i> - Zero Yaw Drag ( $\sin^2 A$ ) Aerodynamics . . . . .	87
Figura 76 – Aba <i>Plotted Results</i> - Normal Force Aerodynamics . . . . .	88
Figura 77 – Aba <i>Plotted Results</i> - Center of Pressure Normal Force Aerodynamics . . . . .	88
Figura 78 – Aba <i>Plotted Results</i> - Forebody Drag Aerodynamics . . . . .	89
Figura 79 – Aba <i>Plotted Results</i> - Induced Moment Force Aerodynamics . . . . .	89
Figura 80 – Aba <i>Plotted Results</i> - Fin Drag Aerodynamics . . . . .	90
Figura 81 – Aba <i>Plotted Results</i> - Pitch Moment . . . . .	90
Figura 82 – Aba <i>Plotted Results</i> - Pitch Damping Moment . . . . .	91
Figura 83 – Aba <i>Plotted Results</i> - Roll Damping Moment . . . . .	91
Figura 84 – Aba <i>Plotted Results</i> - Roll Moment . . . . .	92
Figura 85 – Aba <i>Plotted Results</i> - Fin Drag . . . . .	92
Figura 86 – Aba <i>Plotted Results</i> - Fin Normal Force . . . . .	93
Figura 87 – Aba <i>Plotted Results</i> - Fin Roll Moment . . . . .	93
Figura 88 – Aba <i>Plotted Results</i> - Fin Roll Damping . . . . .	94
Figura 89 – Aba <i>Formatted Results</i> . . . . .	95
Figura 90 – Aba <i>Formatted Results</i> - continuação . . . . .	96
Figura 91 – Aba <i>Formatted Results</i> - continuação . . . . .	97
Figura 92 – Aba <i>Formatted Results</i> - continuação . . . . .	98
Figura 93 – Aba <i>Formatted Results</i> . . . . .	99
Figura 94 – Aba <i>Formatted Results</i> - continuação . . . . .	100
Figura 95 – Aba <i>Formatted Results</i> - continuação . . . . .	101

Figura 96 – Aba *Formatted Results* - continuação . . . . . 102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do foguete SS-09 TS. . . . .	46
Tabela 2 – Parâmetros do foguete <i>Hydra 70</i> . . . . .	50
Tabela 3 – Velocidade máxima. . . . .	62
Tabela 4 – Tempo até atingir velocidade máxima. . . . .	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETE	Escola Técnica do Exército
IME	Instituto Militar de Engenharia
MB	Marinha do Brasil
IMBEL	Indústria de Material Bélico do Brasil
FAB	Força Aérea Brasileira
IPD	Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
CFD	Computational fluid dynamics
CP	Centro de pressão
CG	Centro de gravidade
VLS	Veículo lançador de satélite
PBLH	Polibutadieno líquido hidroxilado
UCF	Unidade de controle de fogo
CECADE	Centro de Catalogação de Defesa
EB	Exército Brasileiro
NOTS	Naval Ordnance Test Station
FFAR	Folding-Fin Aircraft Rocket
USAF	United States Air Force



## LISTA DE SÍMBOLOS

$F_D$	Força de arrasto
$\rho$	Densidade do ar
$S$	Área de referência do foguete
$C_D$	Coefficiente de arrasto
$\vec{V}$	Vetor velocidade
$V$	Norma do vetor velocidade
$\delta$	Ângulo de ataque/ângulo de guinada total
$C_{D_0}$	Coefficiente de arrasto para ângulo de ataque nulo (“zero-yaw”)
$C_{D_{\delta^2}}$	Coefficiente de arrasto quadrático
$M_{lp}$	Momento de amortecimento da rotação
$d$	Diâmetro de referência do projétil
$p$	Rotação axial
$C_{lp}$	Coefficiente de momento de amortecimento da rotação
$M_{l\delta}$	Momento de rolagem
$\delta_F$	Ângulo de inclinação fornecido às aletas
$C_{l\delta}$	Coefficiente de rolagem
$F_L$	Força de sustentação
$C_{L\alpha}$	Coefficiente de sustentação
$F_x$	Força axial
$C_x$	Coefficiente de força axial
$C_{N\alpha}$	Coefficiente de força normal
$M_\alpha$	Momento de capotamento
$C_{M\alpha}$	Coefficiente de momento de capotamento
$F_M$	Força Magnus

$C_{Np\alpha}$	Coeficiente da força Magnus
$M_{Mp\alpha}$	Momento Magnus
$C_{Mp\alpha}$	Coeficiente de momento Magnus
$F_{N_{q+\dot{\alpha}}}$	Força amortecimento de arfagem
$q_t$	Velocidade angular transversal total
$q$	Velocidade angular de arfagem
$r$	Velocidade angular de guinada
$\dot{\alpha}_t$	Taxa total de mudança do ângulo de ataque
$C_{Nq}$	Coeficiente de força de amortecimento de arfagem devido a $q_t$
$C_{N\dot{\alpha}}$	Coeficiente de força de amortecimento de arfagem devido a $\dot{\alpha}$
$\frac{d\mathbf{x}}{dt}$	Taxa de variação do vetor unitário
$M_{M_{q+\dot{\alpha}}}$	Momento amortecimento de arfagem

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	23
1.2	OBJETIVOS	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>FORMULAÇÃO MATEMÁTICA</b>	<b>25</b>
3.1	ELEMENTOS DA TRAJETÓRIA	25
3.2	SISTEMAS DE COORDENADAS EMPREGADO	27
3.3	FORÇAS, MOMENTOS E COEFICIENTES AERODINÂMICOS	27
3.3.1	FORÇA DE ARRASTO	27
3.3.2	MOMENTO DE AMORTECIMENTO DA ROTAÇÃO	28
3.3.3	MOMENTO DE ROLAGEM	28
3.3.4	FORÇA DE SUSTENTAÇÃO	29
3.3.5	MOMENTO DE CAPOTAMENTO	31
3.3.6	FORÇA MAGNUS	33
3.3.7	MOMENTO MAGNUS	33
3.3.8	FORÇA AMORTECIMENTO DE ARFAGEM	34
3.3.9	MOMENTO AMORTECIMENTO DE ARFAGEM	35
3.4	PROPELENTE TIPO " COMPOSITE " PARA FOGUETES	36
3.4.1	SUBSTÂNCIAS OXIDANTES	36
3.4.2	SUBSTÂNCIAS COMBUSTÍVEIS	37
3.4.3	ADITIVOS MECÂNICOS	38
3.4.4	ADITIVOS BALÍSTICOS	38
<b>4</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA</b>	<b>40</b>
4.1	DESCRIÇÃO DO FOGUETE SS-09 TS	40
4.1.1	CABEÇA DE GUERRA AVC 70 RS	40
4.1.1.1	ESPOLETA AVE 70 M9-B	42
4.1.1.2	OGIVA	43
4.1.1.3	CONJUNTO REFLETOR ANGULAR	44
4.1.2	TUBO-MOTOR	44
4.1.3	TUBEIRA COM EMPENAS	44
4.2	MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO FOGUETE SS-09 TS	45
4.3	PARÂMETROS DO FOGUETE	45
<b>5</b>	<b>COEFICIENTES AERODINÂMICOS</b>	<b>48</b>

5.1	FOGUETES 70 MM . . . . .	48
5.1.1	HYDRA - 70 . . . . .	49
5.2	RESULTADOS AERODINÂMICOS DO FOGUETE SS-09 TS . . . . .	50
<b>6</b>	<b>TRAJETÓRIA . . . . .</b>	<b>55</b>
6.1	RESULTADOS DA TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS PARA 4-DOF	55
6.2	TABELA DE TIRO DO FOGUETE SS-09 TS PARA 4-DOF . . . . .	57
6.3	RESULTADOS DA TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS PARA 6-DOF	58
6.4	TABELA DE TIRO DO FOGUETE SS-09 TS PARA 6-DOF . . . . .	61
6.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS . . . . .	62
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE A – COEFICIENTES AERODINÂMICOS - PRODAS .</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE B – TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS PARA 4-DOF - PRODAS . . . . .</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE C – TABELA DE TIRO DO FOGUETE SS-09 TS PARA 4-DOF - PRODAS . . . . .</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE D – TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS PARA 6-DOF . . . . .</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE E – TABELA DE TIRO DO FOGUETE SS-09 TS PARA 6-DOF - PRODAS . . . . .</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXO A – FORMATTED RESULTS - COEFICIENTES AERO- DINÂMICOS - PRODAS . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO B – PLOTTED RESULTS - PRODAS . . . . .</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO C – TABELA DE TIRO COM 4-DOF - PRODAS . . . . .</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXO D – TABELA DE TIRO COM 6-DOF - PRODAS . . . . .</b>	<b>99</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que após a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), o Exército Brasileiro (EB) começou a dedicar-se ao estudo de mísseis e foguetes para o emprego em suas forças de combate, visando acompanhar o que faziam os outros principais exércitos do mundo na área. Tem-se relato que o primeiro grupo dedicado a esses estudos no Brasil iniciou-se na Escola Técnica do Exército (ETE), atual Instituto Militar de Engenharia (IME). (STEPHANI, 2014)

Em 1950, iniciou-se o primeiro projeto de foguete, denominado F-114-R/E, conforme Figura 1, propelido à pólvora, com corpo de 114 mm de diâmetro, 1,80 m de comprimento e um alcance de 22 quilômetros. Na época, buscou-se a utilização de tal tubo, não por questões técnicas, mas pelo fato que o mesmo já estava disponível por ser fabricado pela Marinha do Brasil (MB). Apesar do projeto ter gerado bons resultados, o mesmo foi abandonado pela falta de êxito em pesquisas relacionadas à área de motores e combustível líquido. (STEPHANI, 2014)



Figura 1 – Dois foguetes F-114-R-E.

Fonte: Expedito Carlos Stephani Bastos, 2014.

Em 1956, foi desenvolvido o sistema de lançadores múltiplos, denominado F-108-R, utilizando foguetes de 108 mm com tubeiras e um sistema elétrico de disparo. Tal lançador

contava com uma quantidade de tubos variando de 10 a 16 unidades e podia ser acoplado no *Jeep Willys Overland*  $\frac{3}{4}$  ton, chamado Fv-108-R.



Figura 2 – Fv-108-R com dez tubos montado sobre veículo 4x4 Jeep Willys Overland  $\frac{3}{4}$  ton.

Fonte: Expedito Carlos Stephani Bastos, 2014.

Com o conhecimento já adquirido, foi possível o desenvolvimento do F-114-DE. Um foguete de duplo-estágio propelido por combustível sólido de base dupla (BD560) produzido na Indústria de Material Bélico do Brasil (IMBEL). Tal foguete era supersônico, atingindo uma velocidade de Mach 3 (3715 km/h), alcance de 30 km e uma carga útil de 3 kg. No primeiro estágio, ele possuía comportamento semelhante ao foguete F-114-R/E, já para a ignição do segundo estágio foi desenvolvido uma válvula de passagem de chama que permitia que o mesmo fosse iniciado sem a utilização de qualquer outro dispositivo. Esse foguete era utilizado sobre os reboques de canhões antiaéreos Bofors 40 mm/L60 com configuração de 5 foguetes por reboque.



Figura 3 – Lançador de foguete F-114-DE com cinco foguetes, montado sobre reparo Bofors 40/60 em desfile militar de 28 de junho de 1966.

Fonte: Exército Brasileiro.

Entre 1966 e 1968, dois blindados, denominados M-20 e M-8 GREYHOUND, foram utilizados como plataforma de desenvolvimento, gerando dois projetos de lançadores de foguetes de 81 mm. Para tal, buscou-se aproveitar os tubos lançadores de foguetes e munições já utilizados nos aviões P-47 da Força Aérea Brasileira (FAB), gerando-se dois protótipos. Embora ambos os protótipos utilizassem a mesma plataforma, possuíam sistemas de lançamento distintos. Enquanto um utilizava dois sistemas rotativos de lançamento acoplado nas laterais da torre original, com um tubo para cada conjunto lançador; o outro era um sistema adaptado em uma nova torre, com tubos lançadores de sete tubos cada. Tais sistemas era bem semelhantes ao soviético "Katiusha" e o alemão "Nebelwefer", ambos utilizados na Segunda Guerra Mundial.



Figura 4 – Lançador de foguetes rotativo acoplado à torre de um M-8 Greyhound 6x6.

Fonte: Exército Brasileiro.



Figura 5 – Lançador de foguetes montado sobre um M-20 6x6.

Fonte: Expedito Carlos Stephani Bastos, 2014.

Em 1972, através de estudos realizados pelo Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IPD) surge o foguete denominado X-40 com alcance de 68 km, carga útil de 150 kg impulsionado por propelente sólido do tipo "composite". O mesmo chegou a ter duas configurações, uma com acoplamento sobre um veículo blindado sobre lagartas denominado XLF - 40 e outra montado sobre uma carreta Sanvas de duas rodas auto rebocadas.



Figura 6 – Lançamento de um foguete X-40 do veículo lançador XLF-40 em testes realizados na Marambaia, em 11 de agosto de 1982.

Fonte: Expedito Carlos Stephani Bastos, 2014.



Figura 7 – O X-40 sobre um reparo auto rebocado montado sobre uma carreta Sanvas.

Fonte: Expedito Carlos Stephani Bastos, 2014.

Com o desenvolvimento do X-40, permitiu-se que a indústria nacional avançasse um pouco mais nesta área, tornando possível o desenvolvimento do Sistema de Artilharia de Saturação de Área ASTROS - II.

A família de foguetes ASTROS compreende os TS-09 (objeto de estudo do presente projeto), SS-30, SS-40, SS-60 e SS-80, com alcances que variam de 9 a 85 km a nível do mar.



## 1.1 Motivação

A utilização de mísseis e foguetes nos combates modernos vem crescendo amplamente, sendo de grande valia o estudo dos mesmos a fim de que seja disponibilizado a sociedade brasileira maior segurança no monitoramento das fronteiras, florestas e recursos naturais, bem como garantir a hegemonia frente a países vizinhos, elevando o Brasil a um outro nível internacional, diante das pesquisas em novos segmentos do setor espacial.

Logo, pode-se dizer que a pesquisa e o desenvolvimento de foguetes balísticos em território nacional é fundamental para soberania e para o desenvolvimento da base industrial de defesa, tornando o país referência juntamente com outras potências já consolidadas nesse setor.

## 1.2 Objetivos

O projeto em questão visa realizar a modelagem tridimensional do Foguete SS-09 TS, utilizando-se das ferramentas que compõe o programa *Solidworks*.

Através do desenho, gerado no software *Solidworks*, determinar os coeficientes aerodinâmicos do foguete, reproduzindo a trajetória balística, através do software *PRODAS* que permite através de seu banco de dados projetar novos projéteis e analisar a eficácia de munições novas e/ou já existentes.

Por último, será comparado os resultados obtidos com as tabelas de tiro disponíveis para o foguete estudado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O manual de campanha (C 6-40, 2001) apresenta as noções básicas iniciais quanto aos elementos da trajetória, assim como os fatores externos controláveis e não controláveis presentes na balística externa dos projéteis. Deste manual, foi possível realizar no presente projeto uma breve abordagem teórica e a possibilidade de definir conceitos já largamente utilizadas e conhecidas no meio militar.

MCCOY (1998) e CARLUCCI; JACOBSON (2008) apresentam os principais conceitos e formulações quanto às forças, momentos e coeficientes aerodinâmicos levados em consideração no presente projeto. Definindo-se o sistema de coordenadas tornou-se possível a abordagem de conceitos introdutórios relevantes a serem estudados com o objetivo de inferir a respeito dos coeficientes aerodinâmicos e da trajetória balística do foguete SS-09 TS.

O manual técnico (EB70-MT-11.000, 2020) aborda os principais foguetes pertencentes ao sistema ASTROS. Neste manual, permite-se a descrição do foguete SS-09 TS, abordando-se os principais componentes presentes no foguete, com destaque para cabeça de guerra, turbo motor e tubeira com empenas.

BARBOSA et al. (2005) através do projeto apresentado, buscou realizar a análise da trajetória balística do projétil M1 105mm a partir de três abordagens diferentes: Modelo massa-ponto; modelo massa-ponto modificado; e o modelo de seis graus de liberdade (6-DOF), a partir de dados aerodinâmicos e das propriedades de massa já existentes no PRODAS. Dessa forma, através de diferentes situações de lançamento, foram feitas comparações entre os resultados obtidos por cada modelo de abordagem da trajetória.

BARANOWSKI; FRANT (2017) buscaram comparar dois métodos para obtenção dos coeficientes aerodinâmicos do míssil não guiado de 122mm. Para tanto, utilizam-se de um método teórico-experimental através do software *PRODAS* e um método teórico utilizando o software *ANSYS*.

Em DUPIUS (2001), estima-se os coeficientes aerodinâmicos a partir de três modelos empíricos-teóricos e um modelo *computational fluid dynamics* (CFD), para posteriormente serem utilizados em um programa que aborda a trajetória em um modelo de seis graus de liberdades (6-DOF) para prever e comparar performance com os resultados de voo livre.

MAAG; KLINGENBERG (1996) enumera as motivações do estudo das técnicas de propulsão modernas que visam: aumentar a energia cinética do projétil, aumentar a letalidade, reduzir custos, aumentar a confiabilidade e diminuir a vulnerabilidade a falhas.

## 3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo serão abordados conceitos importantes para o entendimento da trajetória do Foguete SS-09 TS extraídos do manual do EB, seguido por uma descrição matemática dos efeitos resultantes de forças, momentos e coeficientes aerodinâmicos e apresentação do propelente "composite" utilizado pelo foguete SS-09 TS.

### 3.1 ELEMENTOS DA TRAJETÓRIA

Para o entendimento da nomenclatura utilizada ao longo do presente projeto, torna-se necessário definir alguns conceitos que serão citados a seguir, com base no manual C 6-40:

- Trajetória: É a curva descrita pelo centro de gravidade em seu trajeto da boca da peça ao ponto de incidência ou de arrebetamento;
- Origem: É a posição do centro de gravidade do projétil no momento em que deixa a boca da peça. Para simplificar outras definições, este termo pode ser usado para indicar o centro da boca da peça quando apontada;
- Linha de sítio - É a linha que une a origem a um determinado ponto do terreno, normalmente o alvo. Como o presente projeto tem como foco comparar os resultados obtidos no software *PRODAS* com a tabela de tiro do foguete SS-09 TS, a linha de sítio estará fixa no plano horizontal;
- Ângulo de sítio - É o ângulo vertical formado pela linha de sítio e pelo plano horizontal. É referido, às vezes, como sítio topográfico. Como a linha de sítio estará fixa na horizontal, o ângulo de sítio será considerado nulo;
- Correção complementar de sítio - É a correção aplicada ao ângulo de sítio, a fim de corrigir a deformação da trajetória, quando introduzimos o ângulo de sítio (deformação causada pela ação da gravidade sobre o projétil na trajetória);
- Sítio total - É a soma do ângulo de sítio com a correção complementar de sítio.
- Linha de projeção: A linha tangente à trajetória no momento em que o projétil deixa a origem;
- Ângulo de projeção - É o ângulo vertical formado pelas linhas de sítio e de projeção;
- Plano de projeção - É o plano vertical que contém a linha de projeção;
- Ponto de queda - Ponto no qual a trajetória encontra de novo o plano horizontal

que passa pela boca da peça;

- Linha de queda - É a linha tangente à trajetória no ponto de queda;
- Ângulo de queda ( $\omega$ ) - É o ângulo vertical formado pela linha de queda e o plano horizontal. Pode ser expresso por sua tangente;
- Ponto de incidência (ponto de impacto) - Ponto onde o projétil atinge o solo ou obstáculo;
- Linha de incidência - É a linha tangente à trajetória no ponto de incidência;
- Ângulo de incidência - É o ângulo formado pela linha de incidência e um plano tangente à superfície no ponto de incidência;
- Ângulo de chegada - É o ângulo formado pela linha de incidência e a linha de sítio.
- Derivação angular - É o ângulo segundo o qual é vista, da peça, a derivação linear. À derivação angular, dá-se comumente o nome de derivação ou deriva;
- Duração de trajeto - É o tempo, expresso em segundos, que o projétil gasta para percorrer a trajetória, da origem ao ponto de queda;
- Base da trajetória - É a linha reta que une a origem ao ponto de queda;
- Ponto de arrebatamento - Ponto da trajetória onde ocorre a explosão do projétil;
- Alcance - É o comprimento, medido no plano horizontal da boca da arma, da distância entre a origem e o ponto de queda, ponto de impacto ou ponto de arrebatamento.

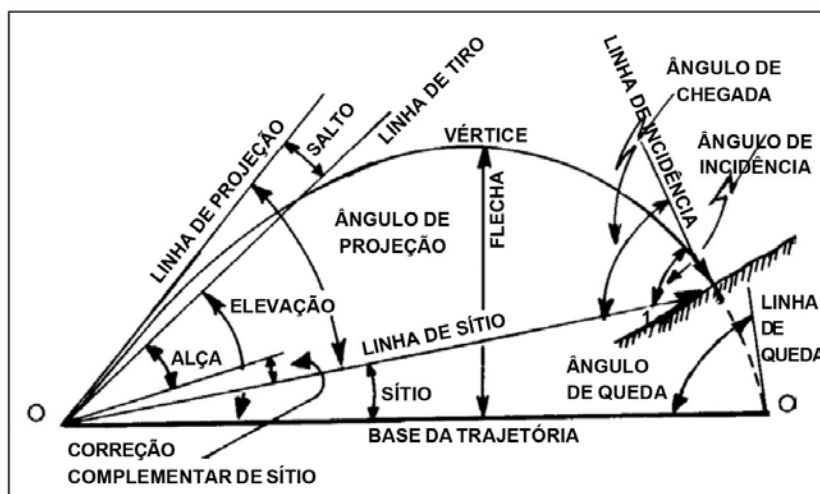


Figura 8 – Elementos da trajetória (C6-40).

## 3.2 SISTEMAS DE COORDENADAS EMPREGADO

Como a literatura sobre aerodinâmica e balística é bastante ampla e diversificada buscou-se, com a finalidade de padronizar o referencial utilizado para definir as equações de movimento, empregar o sistema de coordenadas adotado por McCoy (1980), uma vez que com esse referencial (eixo  $y$  considerado positivo apontando para cima e eixo  $x$  considerado positivo apontando para a direita), conforme Figura 9, torna-se mais intuitivo e de mais fácil compreensão.

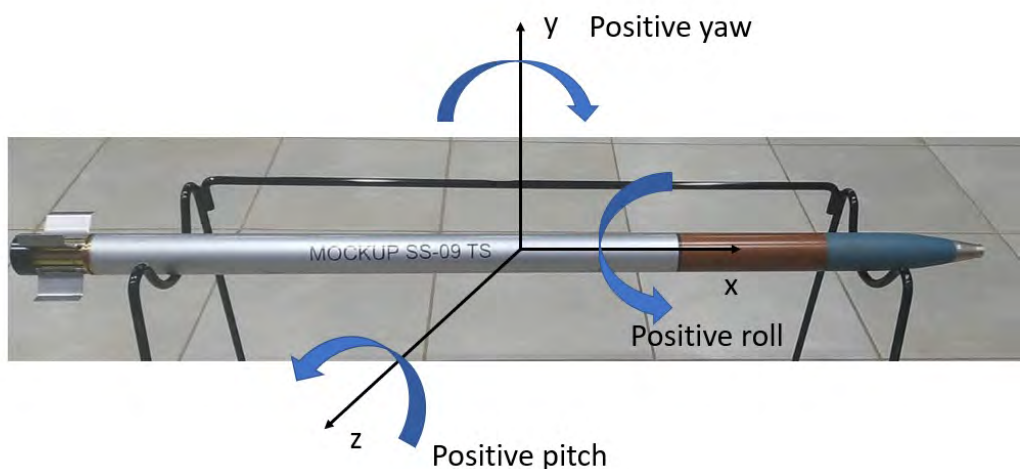


Figura 9 – Definição coordenadas foguete.

## 3.3 FORÇAS, MOMENTOS E COEFICIENTES AERODINÂMICOS

Com o objetivo de levar-se em consideração a ação das forças, momentos e coeficientes aerodinâmicas presentes no movimento do foguete, buscou-se descrever o efeito e o equacionamento dos mesmos a seguir.

### 3.3.1 FORÇA DE ARRASTO

É a força aerodinâmica clássica, também referenciada como resistência do ar. É um vetor com a mesma direção do vetor velocidade, porém com sentido contrário, desacelerando o projétil, conforme ilustrado na Figura 10 (MCCOY, 1998).

Seu módulo depende da área da seção transversal do projétil, assim como da densidade do ar e da velocidade, dado pela fórmula:

$$F_D = -\frac{1}{2}\rho S C_D \vec{V}V \quad (3.1)$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar,  $S$  é a área de referência do foguete,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto e  $\vec{V}$  é o vetor velocidade.

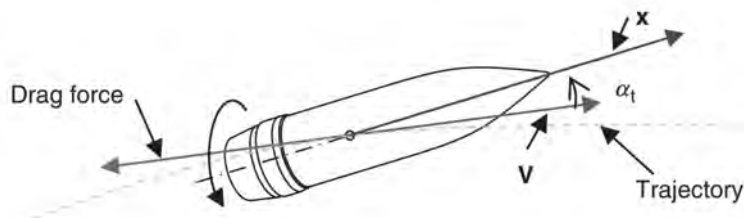


Figura 10 – Força de arrasto (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

Vale ressaltar que o coeficiente de arrasto pode ser uma função do ângulo de guinada (*yaw*). De uma forma mais geral, pode-se definir o coeficiente por:

$$C_D = C_{D_o} + C_{D_{\delta^2}} \delta^2 \quad (3.2)$$

onde  $\delta$  é denominado guinada total e definido como:

$$\delta = \sin \alpha_t \quad (3.3)$$

### 3.3.2 MOMENTO DE AMORTECIMENTO DA ROTAÇÃO

Como pode ser visto na Figura 11, quando um projétil rotaciona em um meio, a interação viscosa do meio e da superfície do projétil é tal que o projétil irá desacelerar a rotação durante o vôo (MCCOY, 1998). Esse fenômeno é explicado por um momento aplicado ao projétil, dado por:

$$M_{lp} = \frac{1}{2}\rho V^2 S d \frac{pd}{V} C_{lp} \quad (3.4)$$

onde  $d$  é o diâmetro de referência do projétil,  $p$  é a rotação axial (geralmente medido em radianos por segundo e positivo para rotação à direita) e  $C_{lp}$  é o coeficiente de momento de amortecimento da rotação.

### 3.3.3 MOMENTO DE ROLAGEM

Quando alguns projéteis possuem aletas ou jatos permitem que a taxa de rotação aumente, implementando um torque de rolagem ao projétil (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

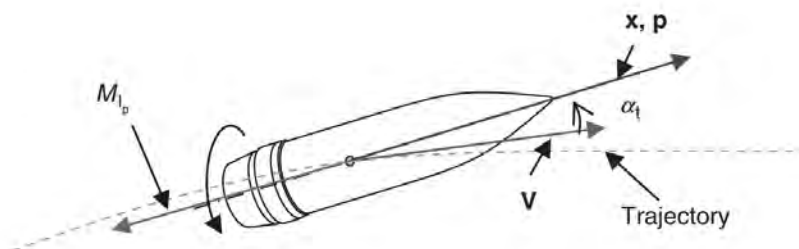


Figura 11 – Momento de amortecimento de rotação (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

$$M_{l\delta} = \frac{1}{2}\rho V^2 S d \delta_F C_{l\delta} \quad (3.5)$$

onde  $\delta_F$  é o ângulo de inclinação fornecido às aletas para gerar a sustentação necessária para garantir a rotação e  $C_{l\delta}$  é o coeficiente do momento de rolagem.

Pode-se dizer que para um foguete com aletas/empenas o momento de rolamento é o responsável por aumentar a rotação enquanto que o momento de amortecimento da rotação tende a diminuí-la. Logo, esses momentos se opõem e o resultado é que a rotação deve aproximar-se de um valor de estado estacionário, após a interação dos mesmos (MCCOY, 1998). Na Figura 12, ilustra-se o momento de rolagem.

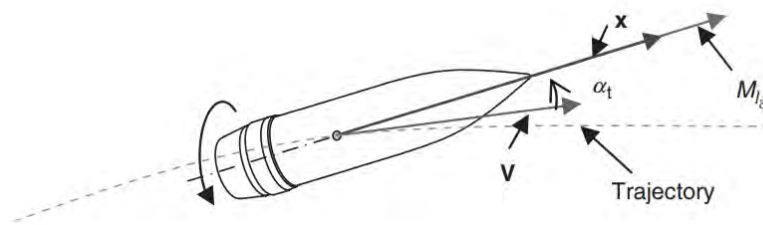


Figura 12 – Momento de rolagem (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

### 3.3.4 FORÇA DE SUSTENTAÇÃO

É a força responsável por manter a sustentação do projétil no ar, e sempre está na direção perpendicular à trajetória, no plano contendo a trajetória e o eixo de simetria do projétil (MCCOY, 1998), conforme está representado na Figura 13.

A força de sustentação pode ser definida de modo vetorial ou escalar pela Equação 3.6 e 3.7, respectivamente (CARLUCCI; JACOBSON, 2008):

$$F_L = \frac{1}{2}\rho S C_{L\alpha} [\mathbf{V} \times (\mathbf{x} \times \mathbf{V})] \quad (3.6)$$

ou

$$F_L = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_{L\alpha} \delta \quad (3.7)$$

onde o coeficiente de sustentação  $C_{L\alpha}$  é definido por:

$$C_{L\alpha} = C_{L\alpha_0} + C_{L\alpha_2} \delta^2 \quad (3.8)$$

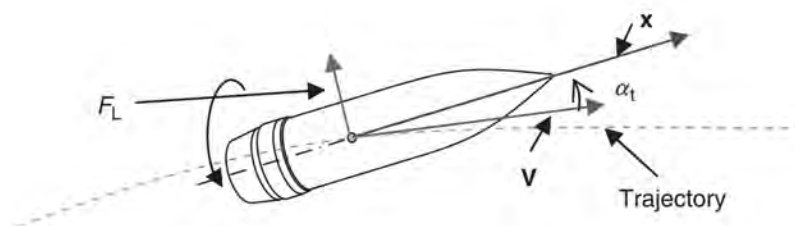


Figura 13 – Força de sustentação (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

Vale ressaltar que para um projétil simétrico, onde o ângulo de ataque ( $\delta$ ) seja nulo não haverá força de sustentação.

O software *PRODAS* busca trabalhar com eixos paralelos e perpendiculares ao eixo de simetria do foguete, ao invés de eixos paralelos e perpendiculares à trajetória, como citado anteriormente. Para tal, as forças de arrasto e sustentação são substituídas pela força axial e pela força normal, conforme ilustrado na Figura 14.

A força axial e normal são dadas pelas Equações (3.9) e (3.10), respectivamente.

$$F_X = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_X \quad (3.9)$$

$$F_N = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_{N\alpha} \sin\alpha_t \quad (3.10)$$

onde  $C_X$  é o coeficiente de força axial e  $C_{N\alpha}$  é o coeficiente de força normal.

Da Figura 14, pode-se inferir que:

$$F_D = F_N \sin\alpha_t - F_X \cos\alpha_t \quad (3.11)$$

$$F_L = F_N \cos\alpha_t + F_X \sin\alpha_t \quad (3.12)$$

Substituindo as Equações (3.1), (3.7), (3.9) e (3.10) na Equação (3.11) e (3.12), temos:



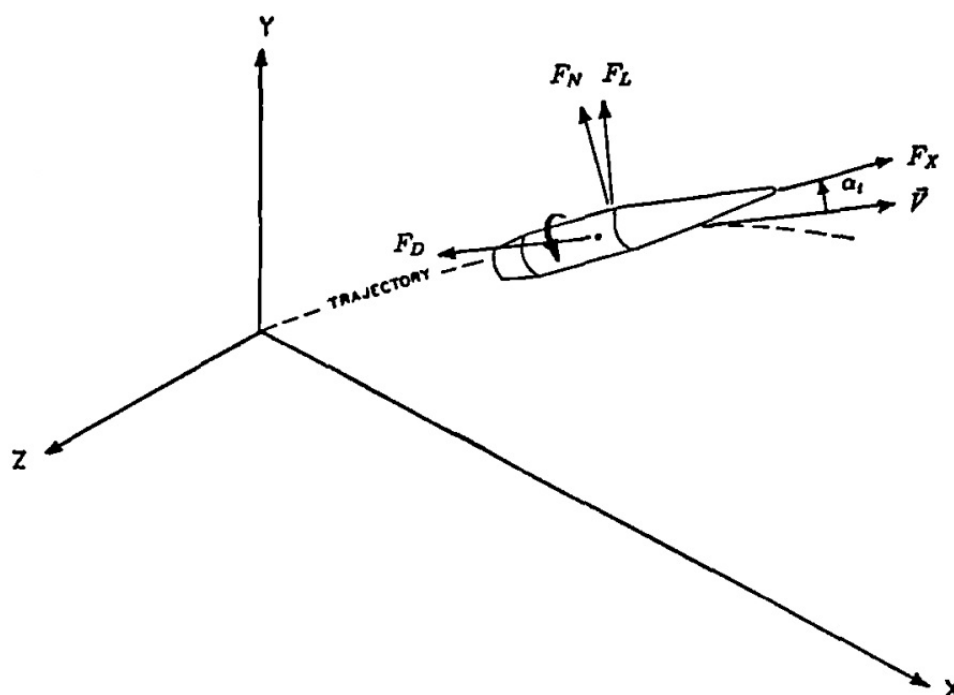


Figura 14 – Forças de arrasto, sustentação, normal e axial (MCCOY, 1998).

$$C_D = C_{N\alpha} \sin^2 \alpha_t - C_X \cos \alpha_t \quad (3.13)$$

$$C_{L\alpha} = C_{N\alpha} \cos \alpha_t + C_X \quad (3.14)$$

Dessa forma, através das Equações (3.13) e (3.14) permite-se encontrar uma relação direta entre os eixos do corpo e os eixos utilizados na trajetória.

Como a força normal também apresenta um comportamento não-linear, similar ao observado para o coeficiente de sustentação, tem-se:

$$C_{N\alpha} = C_{N\alpha_0} + C_{N\alpha_2} \delta^2 \quad (3.15)$$

### 3.3.5 MOMENTO DE CAPOTAMENTO

Antes de definir o momento de capotamento é válido apresentar duas grandezas importantes para determinação desse conceito: centro de pressão (CP) e centro de gravidade (CG).

O CG é o local no projétil onde toda a massa pode ser concentrada para que, para uma análise, o vetor gravitacional opere neste ponto. O CP é o ponto pelo qual um vetor pode ser traçado, ou seja, a resultante de todas as forças de pressão infinitesimais

que atuam sobre o projétil. Vale ressaltar que para a maioria dos projéteis estabilizados por aletas, o CG está à frente do CP, conforme ilustrado na Figura 15 (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).



Figura 15 – Ilustração do centro de gravidade (CG) e do centro de pressão (CP) do foguete SS-09 TS.

A separação do CP e CG dá origem a um momento de capotamento em todos os projéteis, conforme ilustrado na Figura 16 (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

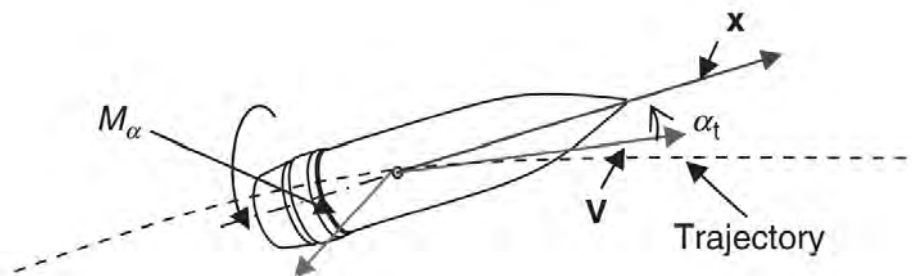


Figura 16 – Momento de capotamento (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

Além disso, vale ressaltar que este momento é estabilizador para os projéteis estabilizados por aletas e destabilizador para projéteis estabilizados por rotação. O momento de capotamento é definido como:

$$M_{\alpha} = \frac{1}{2} \rho S d V C_{M\alpha} (\mathbf{V} \times \mathbf{x}) \quad (3.16)$$

ou

$$M_{\alpha} = \frac{1}{2} \rho V^2 S d C_{M\alpha} \delta \quad (3.17)$$

onde o coeficiente de momento de capotamento é dado por:

$$C_{M\alpha} = C_{M\alpha 0} + C_{M\alpha 2}\delta^2 \quad (3.18)$$

### 3.3.6 FORÇA MAGNUS

É a força gerada pela diferença de pressão ao redor de um objeto que gira. Ela atua na direção paralela ao eixo lateral do projétil, sendo também a responsável pelo desvio lateral da trajetória, conforme ilustrado na Figura 17 (MCCOY, 1998).

$$F_{N_{p\alpha}} = \frac{1}{2}\rho SV \left( \frac{pd}{V} \right) C_{N_{p\alpha}} (\mathbf{V} \times \mathbf{x}) \quad (3.19)$$

ou

$$F_{N_{p\alpha}} = \frac{1}{2}\rho V^2 S \left( \frac{pd}{V} \right) C_{N_{p\alpha}} \delta \quad (3.20)$$

onde o coeficiente da força Magnus é dado por:

$$C_{N_{p\alpha}} = C_{N_{p\alpha 0}} + C_{N_{p\alpha 2}}\delta^2 \quad (3.21)$$

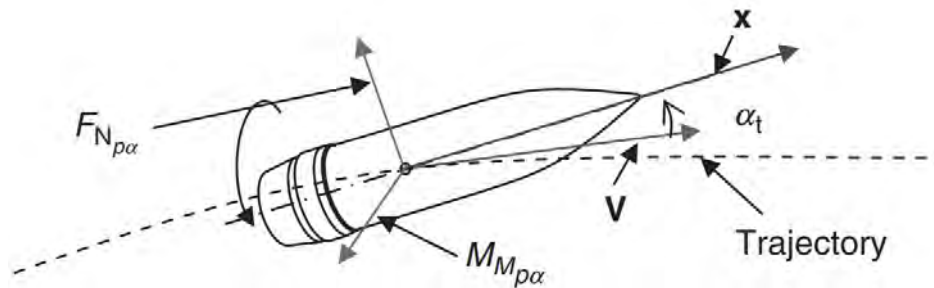


Figura 17 – Força e momento Magnus (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

### 3.3.7 MOMENTO MAGNUS

Apesar de muitas vezes a força Magnus ser considerada insignificante quando comparada às outras forças que atuam no projétil, o mesmo não acontece com o momento desenvolvido pela força, sendo de considerável relevância e contribuindo significativamente para a estabilidade do projétil (CARLUCCI, 2008). O momento Magnus é dado por:

$$M_{M_{p\alpha}} = \frac{1}{2}\rho SV d \left( \frac{pd}{V} \right) C_{M_{p\alpha}} [\mathbf{x} \times (\mathbf{V} \times \mathbf{x})] \quad (3.22)$$

ou

$$M_{M_{p\alpha}} = \frac{1}{2}\rho V^2 S d \left( \frac{pd}{V} \right) C_{M_{p\alpha}} \delta \quad (3.23)$$

onde o coeficiente de momento Magnus é dado por:

$$C_{M_{p\alpha}} = C_{M_{p\alpha 0}} + C_{M_{p\alpha 2}} \delta^2 \quad (3.24)$$

### 3.3.8 FORÇA AMORTECIMENTO DE ARFAGEM

É a tendência de um projétil de cessar seu movimento de arfagem devido à resistência do ar, conforme ilustrado na Figura 18. Sendo descrito por:

$$F_{N_{q+\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2}\rho V S d \left( \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right) C_{N_q} + \frac{1}{2}\rho V S d C_{N_{\dot{\alpha}}} \left( \frac{d\mathbf{x}}{dt} - \frac{d\mathbf{l}}{dt} \right) \quad (3.25)$$

ou

$$F_{N_{q+\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2}\rho V^2 S \left[ \left( \frac{q_t d}{V} \right) C_{N_q} + \left( \frac{\dot{\alpha}_t d}{V} \right) C_{N_{\dot{\alpha}}} \right] \quad (3.26)$$

com  $q_t$  definido por:

$$q_t = \sqrt{q^2 + r^2} \quad (3.27)$$

onde  $q_t$  é a velocidade angular transversal total,  $q$  é a velocidade angular de arfagem,  $r$  é a velocidade angular de guinada (derrapagem),  $\dot{\alpha}_t$  a taxa total de mudança do ângulo de ataque,  $C_{N_q}$  coeficiente de força de amortecimento de arfagem devido a  $q_t$ ,  $C_{N_{\dot{\alpha}}}$  coeficiente de força de amortecimento de arfagem devido a  $\dot{\alpha}_t$  e  $\left( \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right)$  taxa de variação do vetor unitário.

$$\dot{\alpha}_t = \frac{d\alpha_t}{dt} \quad (3.28)$$

Vale destacar que o amortecimento de arfagem ocorre através de dois movimentos. O primeiro devido a taxa de arfagem  $q$ , enquanto o segundo é desenvolvido por causa da resistência à mudança do ângulo de ataque. No geral, os dois coeficientes são quase sempre escritos como uma soma (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

Relacionando-se as Equações (3.25) e (3.26) e combinando-se com os coeficientes pode-se escrever que:

$$F_{N_{q+\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2}\rho V S d \left( C_{N_q} + C_{N_{\dot{\alpha}}} \right) \frac{d\mathbf{x}}{dt} \quad (3.29)$$

ou

$$F_{N_{q+\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2}\rho V^2 S d \left( \frac{q_t d}{V} \right) (C_{N_q} + C_{N_{\dot{\alpha}}}) \quad (3.30)$$

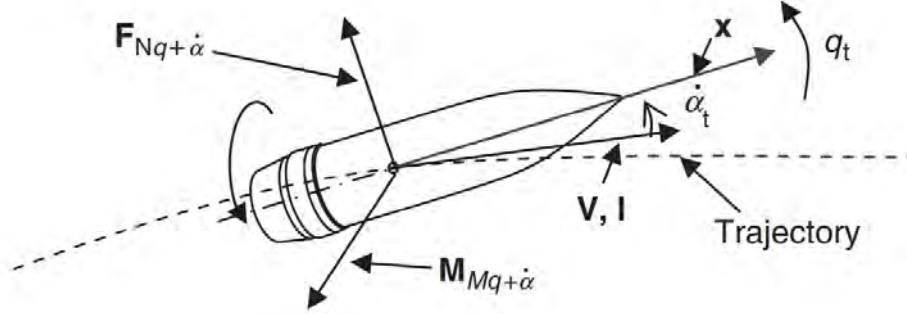


Figura 18 – Força e momento amortecimento de arfagem (CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

### 3.3.9 MOMENTO AMORTECIMENTO DE ARFAGEM

Assim como a força Magnus, a força de amortecimento de arfagem é geralmente negligenciada, pois é considerada pequena em comparação às outras forças, como sustentação e arrasto. Contudo, o momento causado por este amortecimento de arfagem é frequentemente significativo (CARLUCCI; JACOBSON, 2008). Na Figura 18, ilustra-se o momento amortecimento de arfagem que é descrito matematicamente por:

$$M_{M_{q+\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2}\rho V S d^2 \left( \mathbf{x} \times \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right) C_{M_q} + \frac{1}{2}\rho V S d^2 C_{M_{\dot{\alpha}}} \left[ \left( \mathbf{x} \times \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right) - \left( \mathbf{x} \times \frac{d\mathbf{l}}{dt} \right) \right] \quad (3.31)$$

ou

$$M_{M_{q+\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2}\rho V^2 S d \left[ \left( \frac{q_t d}{V} \right) C_{M_q} + \left( \frac{\dot{\alpha}_t d}{V} \right) C_{M_{\dot{\alpha}}} \right] \quad (3.32)$$

Simplificando as Equações (3.31) e (3.32), tem-se:

$$M_{M_{q+\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2}\rho V S d^2 (C_{M_q} + C_{M_{\dot{\alpha}}}) \left( \mathbf{x} \times \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right) \quad (3.33)$$

ou

$$M_{M_{q+\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2}\rho V^2 S d \left( \frac{q_t d}{V} \right) [C_{M_q} + C_{M_{\dot{\alpha}}}] \quad (3.34)$$

## 3.4 PROPELENTE TIPO “ COMPOSITE ” PARA FOGUETES

Com a finalidade de proporcionar maior detalhamento quanto ao funcionamento do foguete SS-09 TS, buscou-se implementar no presente projeto um breve estudo sobre o propelente "composite", visto que o mesmo é utilizado no foguete em estudo.

Propelentes tipo “composite” são obtidos pela mistura íntima de um combustível e de um oxidante quimicamente distintos (MEYER; HOMBURG; KÖHLER, 2007).

O oxidante é normalmente um sal mineral oxigenado, finamente dividido e disperso em um combustível que serve ao mesmo tempo de aglutinante. Pode-se acrescentar ao oxidante e ao combustível substâncias químicas destinadas a facilitar a fabricação e melhorar as propriedades mecânicas e balísticas do propelente.

### 3.4.1 SUBSTÂNCIAS OXIDANTES

Os oxidantes mais utilizados na fabricação das “composites” são (MEYER; HOMBURG; KÖHLER, 2007):

- a)  $NaClO_4$  - 52% de teor de oxigênio,
- b)  $NaNO_3$  - 47% de teor de oxigênio,
- c)  $KClO_4$  - 46% de teor de oxigênio,
- d)  $KNO_3$  - 39,5% de teor de oxigênio,
- e)  $NH_4ClO_4$  - 25,2% de teor de oxigênio e
- f)  $NH_4NO_3$  - 20% de teor de oxigênio

Os percloratos apresentam o inconveniente de produzirem HCl, o que torna os gases da combustão muito corrosivos porém, são mais ricos em oxigênio do que os nitratos, permitindo a obtenção de propelente mais energéticos.

A combustão dos sais de sódio e de potássio dão origem a produtos sólidos (NaCl, KCl) e provocam fumaças esbranquiçadas. Os percloratos de sódio e amônio são relativamente pouco higroscópicos e permitem a preparação de propelentes com melhor resistência a umidade (MEYER; HOMBURG; KÖHLER, 2007).

O oxidante mais frequentemente utilizado é o perclorato de amônio. O nitrato de amônio apesar de produzir gases de combustão relativamente pouco tóxicos, pouco corrosivos e sem fumaça, apresenta um teor de oxigênio relativamente baixo e é muito higroscópico (MEYER; HOMBURG; KÖHLER, 2007).

### 3.4.2 SUBSTÂNCIAS COMBUSTÍVEIS

MEYER; HOMBURG; KÖHLER (2007) explicam que existe um grande número de substâncias suscetíveis de serem utilizadas como combustíveis e aglutinantes. A escolha é orientada pelas propriedades físicas, químicas e mecânicas exigidas pelo propelente, além da viabilidade tecnológica e econômica.

Um bom aglutinante deve manter a integridade geométrica do grão do propelente quando esse é submetido a condições tais como:

- a) temperaturas extremas ( de 80 °C a -60 °C);
- b) tensões resultantes de ciclos de temperaturas e;
- c) tensões resultantes da pressurização no corpo do foguete.

É também desejável que o combustível tenha uma temperatura de auto-ignição elevada, seja estável a impactos mecânicos (caso seja um polímero energético) e não seja tóxico.

Conforme sua natureza química os aglutinantes podem ser hidrocarbonetos de alto peso molecular como o alcatrão, o asfalto e as borrachas naturais e sintéticas, ou plásticos sintéticos como poliéteres, fenolatos, poliuretanos, entre outros.

Os combustíveis mais utilizados são:

- a) cloreto de polivinila (PVC) - termoplástico;
- b) poliestireno - termoplástico;
- c) polibutadieno - elastômero;
- d) polibutadieno-estireno - elastômero;
- e) resinas de polisulfetos - elastômero;
- f) poliuretanos - termoplástico;
- g) polietileno - termorrígido;
- h) poliéster - termorrígido;
- i) poliacrilatos - termoplástico e
- j) polímeros energéticos.

O propelente utilizado pela Força Aérea no veículo lançador de satélite (VLS) é o polibutadieno líquido hidroxilado (PBLH), representado molecularmente na Figura 19:

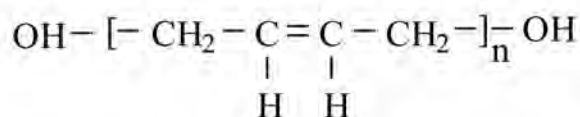


Figura 19 – Estrutura molecular do polibutadieno líquido hidroxilado.

### 3.4.3 ADITIVOS MECÂNICOS

Podem ser divididos basicamente em agentes umectantes, plastificantes e endurecedores.

Agente umectantes são substâncias que facilitam o envolvimento do cristal do oxidante mineral pelo aglutinante (lecitina).

Plastificantes são substâncias que melhoram as propriedades mecânicas do propelente dando mais flexibilidade ao aglutinante, pois aumentam suas propriedades elásticas (ésteres de álcoois de alto peso molecular).

Endurecedores são substâncias que reforçam as substâncias plásticas de base (carbon-black).

### 3.4.4 ADITIVOS BALÍSTICOS

Podem ser divididos geralmente em catalisadores de combustão ou energizantes.

Catalisadores de combustão são substâncias que controlam a velocidade de queima do propelente.

Energizantes são substâncias utilizadas para aumentar as propriedades energéticas do propelente, podendo geralmente são ser metais, como *Al* ou *Mg*, ou auto-explosivos como *RDX* ou *HMX* em forma de pó.

Na Figura 20, pode-se entender melhor as etapas de fabricação do propelente tipo "composite" para foguetes:



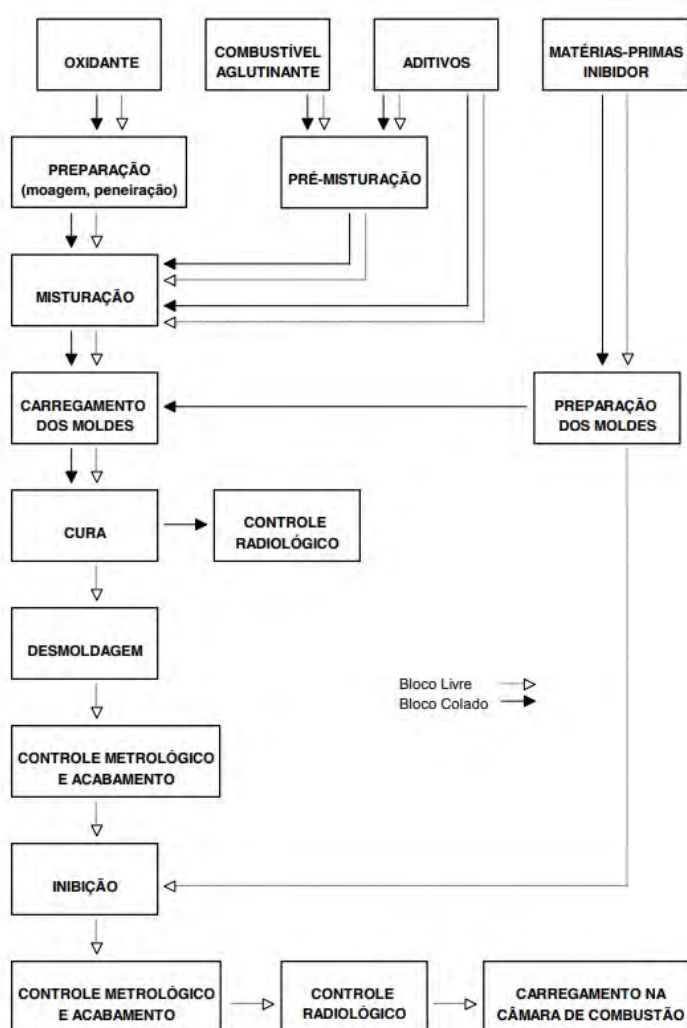


Figura 20 – Fluxograma com as etapas de fabricação do propelente tipo "composite"(MARTHO, 2020).

## 4 MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo buscou-se descrever o foguete SS-09 TS com maior detalhamento baseado no manual utilizado pelo EB, abordando cabeça de guerra, tubo motor e tubeira com empenas.

Além disso, buscou-se apresentar a modelagem tridimensional do foguete realizada por meio do software *solidworks* com base nos dados obtidos. Buscando-se, dessa forma, representar o desenho técnico obtido do foguete que será empregado no software *PRODAS* para análise dos coeficientes aerodinâmicos e trajetória do mesmo.

### 4.1 DESCRIÇÃO DO FOGUETE SS-09 TS

De acordo com o manual do fabricante, o foguete SS 09 TS é um foguete de treinamento solo solo composto de um motor foguete de propelente sólido com empenas envolventes, uma cabeça de guerra com marcação refletora/sinalizadora AVC 70 RS e uma espoleta AVE 70 M9-B, utilizado somente para fins de treinamento.

O fabricante ressalta que o foguete SS-09 TS é equipado com um conjunto refletor localizado na parte traseira da cabeça de guerra, de modo que ele possa ser rastreado pela Unidade de Controle de Fogo (UCF). Possuindo na parte dianteira da cabeça de guerra os itens designados para sinalizar o ponto de impacto no terreno.

Pode-se dividir o foguete analisado basicamente em três partes, conforme Figura 21:

- a) Cabeça de guerra;
- b) Tubo motor;
- c) Tubeira com empenas.

#### 4.1.1 CABEÇA DE GUERRA AVC 70 RS

A cabeça de guerra AVC 70 RS é composta basicamente por três partes, conforme Figura 22:

- a) Esopoleta AVE 70 M9-B;
- b) Ogiva;
- c) Conjunto refletor angular.

Dentre as partes já mencionadas para composição da cabeça de guerra AV 70 RS, há ainda a divisão das mesmas em subpartes, conforme apresentado na Figura 23:

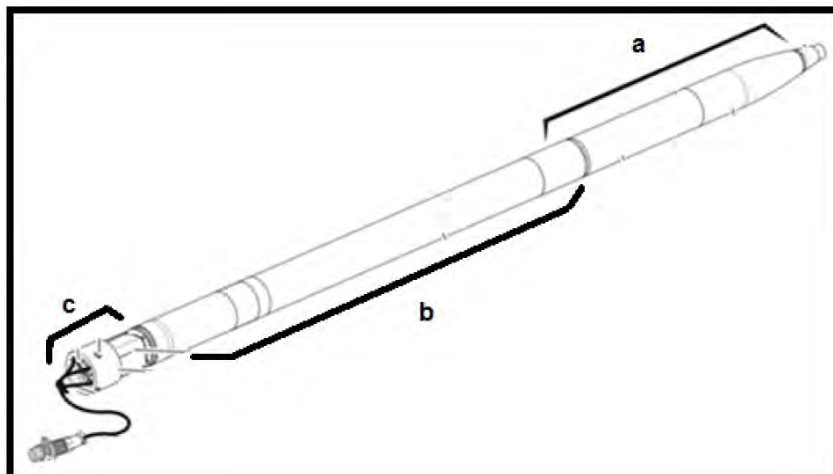


Figura 21 – Constituição do Foguete SS-09 TS (EB70-MT-11.000).

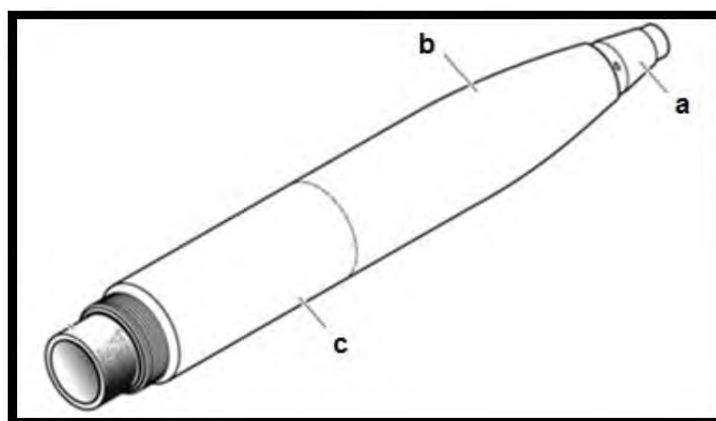


Figura 22 – Constituição da cabeça de guerra do foguete SS-09 TS (EB70-MT-11.000).

Onde:

- 1 - Composto explosivo;
- 2 - Disco de vedação;
- 3 - Cavidade da espoleta;
- 4 - Composto de sinalização;
- 5 - Ogiva;
- 6 - Radome;
- 7 - Fixação do motor foguete;
- 8 - Conjunto do refletor angular.

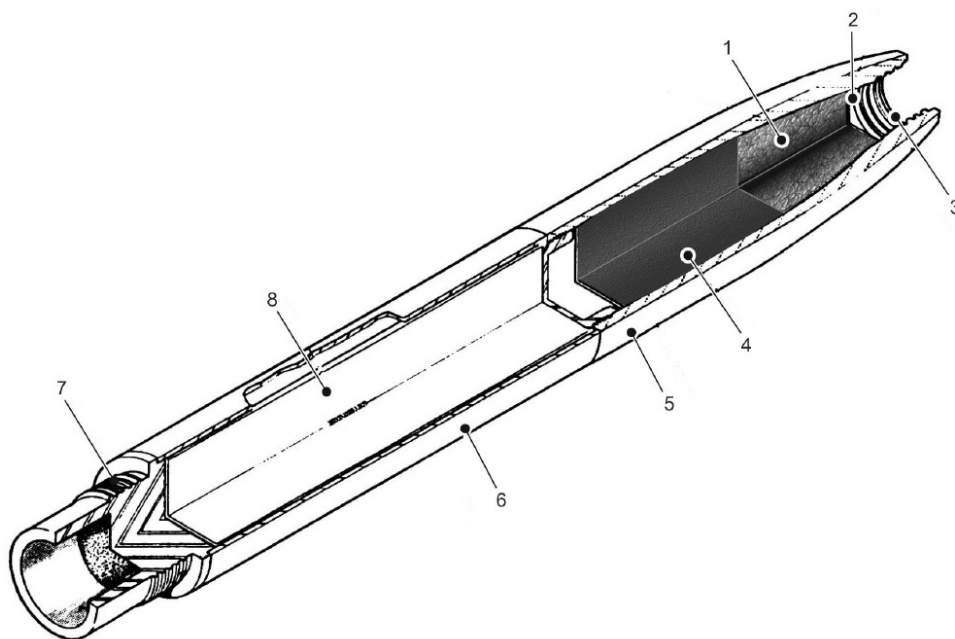


Figura 23 – Visão seccionada da cabeça de guerra do foguete SS-09 TS (EB70-MT-11.000).

#### 4.1.1.1 ESPOLETA AVE 70 M9-B

De acordo com o manual EB70-MT-11.000, a espoleta AVE 70 M9-B é projetada para funcionar de modo instantâneo, juntamente com o impacto no alvo. Todos os componentes do mecanismo da espoleta são montados dentro de um corpo em forma de cone (usinado em alumínio) com uma rosca externa para fixar à extremidade dianteira da cabeça de guerra. Na Figura 24, é possível verificar a espoleta com todos os componentes presentes na mesma.

Onde:

- 1 - Esfera de retenção;
- 2 - Anel de retenção;
- 3 - Esfera segurança de chanfro;
- 4 - Percutor;
- 5 - Cápsula de ignição;
- 6 - Iniciador do reforçador;
- 7 - Reforçador (Booster).

Com o intuito de propiciar maior segurança, destaca-se que a espoleta possui as seguintes características:

- Segurança da armazenagem;

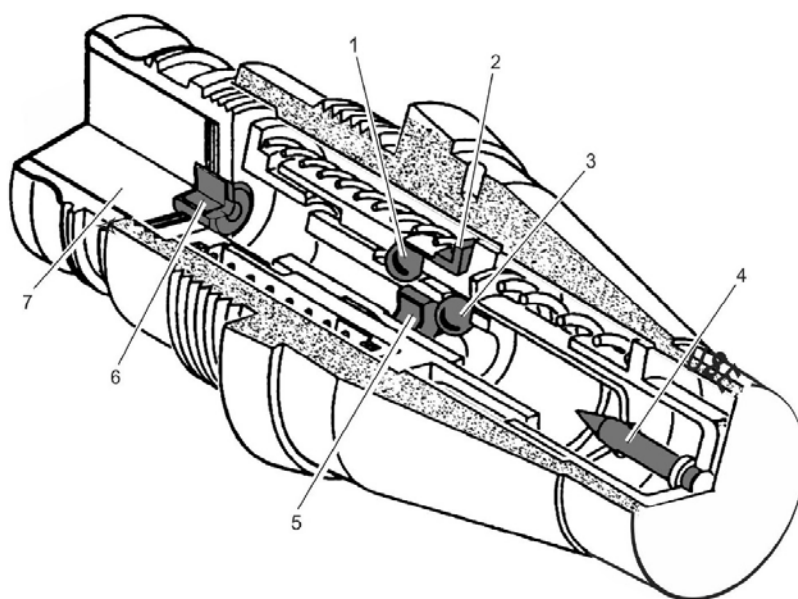


Figura 24 – Visão seccionada da espoleta detonadora de impacto AVE-70 M9-B (EB70-MT-11.000).

- Segurança do transporte e manuseio; e
- Segurança de boca.

A segurança de armazenagem existe devido ao projeto do mecanismo de armação mecânico e também pelo explosivo composto de explosivos militares de alta segurança.

Para o transporte e manuseio, a segurança é fornecida por duas esferas de aço de retenção que travam a cápsula de ignição fora do alcance do pino percutor, quando submetida a acelerações de transporte e manuseio.

Já a segurança de boca é fornecida por duas outras esferas de aço, montadas em frente à capsula iniciadora, bloqueando seu contato com o percutor, mesmo quando o movimento da capsula iniciadora é liberado por inércia da aceleração do foguete. Dessa forma, a espoleta arma-se, portanto, somente após o final da queima do foguete.

#### 4.1.1.2 OGIVA

A ogiva fica localizada na extremidade dianteira do conjunto refletor e contém uma carga composta de explosivo e pó sinalizador, preparada para produzir um efeito de demarcação no alvo após a detonação da espoleta, conforme pode ser verificado na Figura 22.

#### 4.1.1.3 CONJUNTO REFLETOR ANGULAR

O conjunto refletor angular possui uma peça de aço refletora especial encaixada dentro do radome, que é um invólucro tubular para o conjunto refletor, possibilitando o formato aerodinâmico da cabeça de guerra, feito com a finalidade de permitir que o sinal do radar passe em ambas as direções, com uma perda mínima.

#### 4.1.2 TUBO-MOTOR

O turbo-motor é um cilindro de aço, sem costura e de material com alta qualidade que na sua parte central contém o grão propelente e o inibidor, tendo na sua parte dianteira e traseira, respectivamente, o espaço necessário para o acoplamento do corpo da cabeça de guerra e o conjunto tubeira com empenas.

Vale ressaltar que a parte dianteira possui dupla função, isto é, isola a cabeça de guerra do propelente e compõe o elemento de fixação da cabeça de guerra através de uma rosca trapezoidal.

#### 4.1.3 TUBEIRA COM EMPENAS

A tubeira com empenas é composta basicamente por quatro componentes:

- Invólucro;
- Tubeira;
- Empenas;
- Ignitor.

O invólucro é uma peça moldada de aço usinado, roscada externamente, para ser fixada à extremidade traseira roscada internamente do tubo motor.

A tubeira é a parte que direciona o jato de gás e usa a expansão deste em um cone de saída para aumentar o impulso total. Ela também restringe a saída do gás da câmara de combustão, mantendo, portanto, a pressão dentro do tubo motor em um valor apropriado para a queima do propelente. A tubeira contém o inserto de grafite e o divergente.

As empenas são peças feitas de liga de alumínio, articuladas através dos respectivos eixos fixados ao invólucro cilíndrico da tubeira. Quando essas empenas estão na posição dobrada ou dentro do tubo lançador, envolvem a tubeira e restringem-se ao diâmetro externo do foguete. A abertura dessas empenas na posição de voo é obtida através da ação da mola, assim que o foguete deixa o tubo lançador, conforme Figura 25.

O grão propelente existente no motor-foguete é sólido, tipo composite, com uma perfuração em forma de estrela, de queima interna, sendo segundo o fabricante projetado para assegurar um empuxo uniforme durante o voo propulsado.

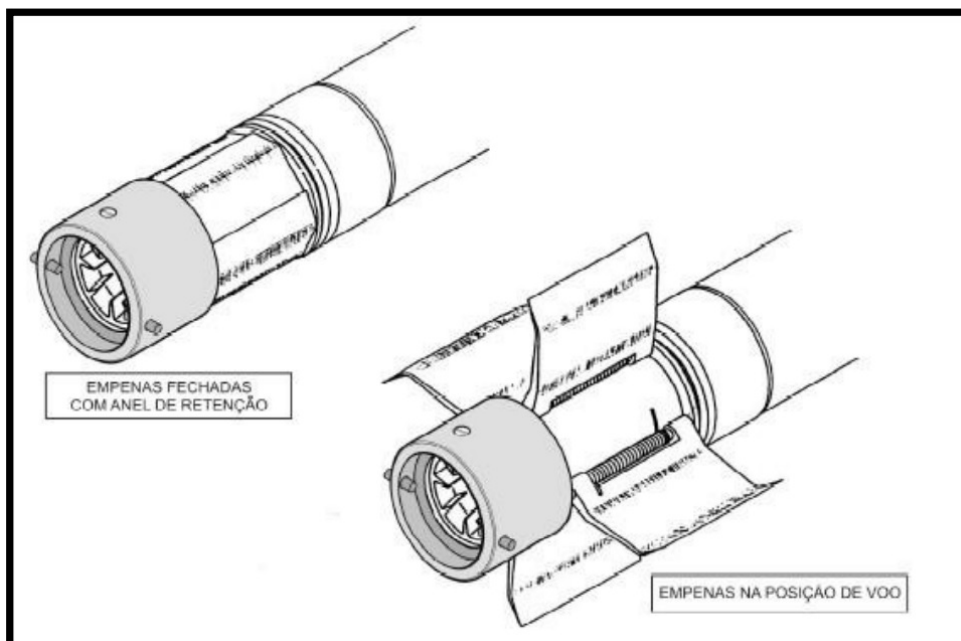


Figura 25 – Conjunto de tubeiras com empenas do foguete SS-09 TS (EB70-MT-11.000).

O ignitor é o responsável por aquecer a superfície do grão propelente à temperatura de ignição. O mesmo fica localizado dentro da garganta da tubeira, contendo a carga da ignição e iniciador elétrico. O cordão umbilical, que se estende da garganta através do centro da membrana traseira do ignitor do divergente e através do rotor, termina em um conector.

## 4.2 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO FOGUETE SS-09 TS

A fim de detalhar melhor cada componente que compõe o foguete SS-09 TS, torna-se essencial obter a lista de parâmetros associados ao mesmo para que posteriormente possa ser comparado com os resultados obtidos no software *PRODAS*.

Esta seção tratará dos parâmetros de interesse para a simulação e os respectivos valores obtidos. Na Figura 26 é possível visualizar uma imagem do foguete SS-09 TS no qual foram obtidos os parâmetros abordados a seguir.

## 4.3 PARÂMETROS DO FOGUETE

Os parâmetros físicos do foguete SS-09 TS, apresentados na Tabela 1, foram fornecidos no *datasheet* do próprio fabricante (AVIBRAS).

Com os dados apresentados pelo fabricante iniciou-se a modelagem tridimensional do foguete no software *Solidworks*, como pode ser observado na Figura 27.



Figura 26 – Foguete SS-09 TS (Centro de Catalogação de Defesa - CECADE).

Tabela 1 – Parâmetros do foguete SS-09 TS.

Parâmetro	Valor
Peso total (com anel de retenção)	11,9 <i>kgf</i>
Calibre nominal	70 <i>mm</i>
Diâmetro máximo externo (turgências)	71,12 <i>mm</i>
Comprimento total (com anel de retenção)	1366 <i>mm</i>
Tipo de espoleta	<i>AVE – 70M9 – B</i>
Carga de sinalização	Óxido de titânio
Alcance mínimo (nível do mar)	6,3 <i>km</i>
Alcance máximo (nível do mar)	10,6 <i>km</i>
Comprimento da cabeça de guerra (com espoleta M9-B)	624 <i>mm</i>
Peso da cabeça de guerra (com espoleta M9-B)	3,84 <i>kgf</i>
Velocidade máxima	811,64 <i>m/s</i>
Tempo até atingir velocidade máxima	1,17 <i>s</i>
Altitude máxima	3,22 <i>km</i>
Alcance máximo	11,01 <i>km</i>
Tempo até atingir range máximo	50,08 <i>s</i>

Para parte interna, foi adotado um propelente sólido de seção hexagonal com objetivo de assegurar uma combustão uniforme durante o voo propelido, isto é, variação da área de queima do propelente constante, conforme pode ser visualizado na Figura 28.

Na Figura 29, é possível verificar uma estimativa do desenho técnico do foguete SS-09 TS que será implementado posteriormente no software *PRODAS*. Vale ressaltar que com o intuito de resguardar o projeto já em uso pelo Exército Brasileiro (EB) e por motivos de segurança e confidencialidade, optou-se por não expor em maiores detalhes as cotas empregadas no desenho técnico apresentado.

Contudo, vale destacar que ao final do projeto será disponibilizado um anexo com todas as medidas utilizadas na simulação no software *PRODAS*, assim como os resultados obtidos e a comparação com os dados de tiro do foguete estudado.





Figura 27 – Modelagem tridimensional do foguete SS-09 TS.



Figura 28 – Vista do propelente em modelagem tridimensional do foguete SS-09 TS.

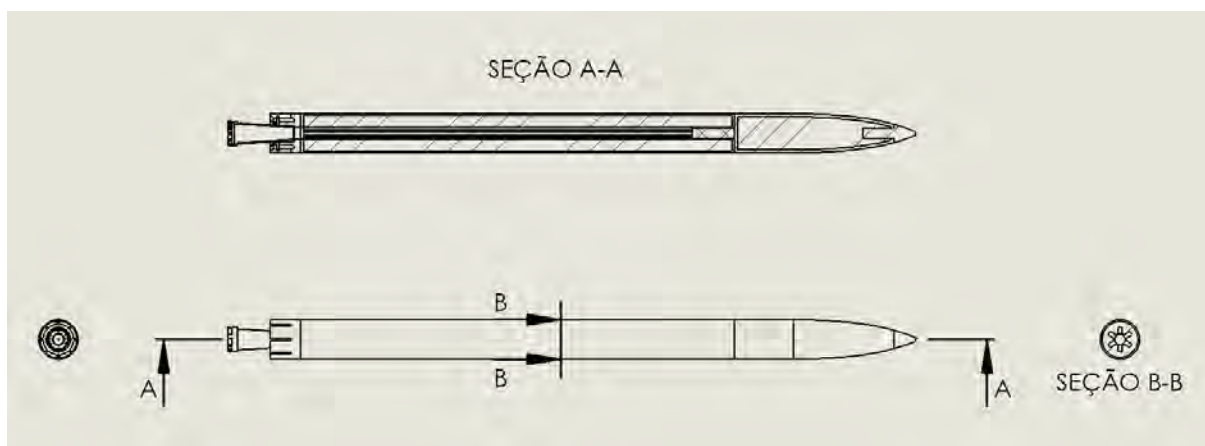


Figura 29 – Desenho técnico do foguete SS-09 TS.

## 5 COEFICIENTES AERODINÂMICOS

Neste capítulo buscou-se realizar o levantamento dos coeficientes aerodinâmicos do foguete SS-09 TS através do *software* *PRODAS*.

Como não haviam dados suficientes fornecidos pelo fabricante para prosseguir com a modelagem do mesmo através de medidas exigidas pelo software, tonou-se necessário estimar alguns parâmetros do foguete SS-09 TS através do foguete *Hydra - 70*, cujas referências estão disponíveis no banco de dados do *software* empregado.

Dessa forma, foi possível determinar os dados aerodinâmicos referentes ao foguete em estudo conforme será apresentado adiante.

### 5.1 FOGUETES 70 MM

Segundo PARSCH (2009), os foguetes de 70 mm foram desenvolvidos no final da década de 1940 pela *Naval Ordnance Test Station* (NOTS), com o objetivo de serem utilizados como poderosos suplementos e/ou substitutos para armas tanto em aplicações ar-ar, quanto ar-terra.

Nesse escopo, foi desenvolvido pela NOTS o *Folding-Fin Aircraft Rocket* (FFAR) de 70 mm para ser uma arma ar-ar com objetivo de ser utilizado por interceptadores contra bombardeiros pesados. O modelo original do foguete era o MK4 estabilizado com quatro aletas do tipo *flip-out* e o mesmo contava com uma ogiva HE de 2,7 kg, 1,2 m de comprimento e 8,4 kg de peso.

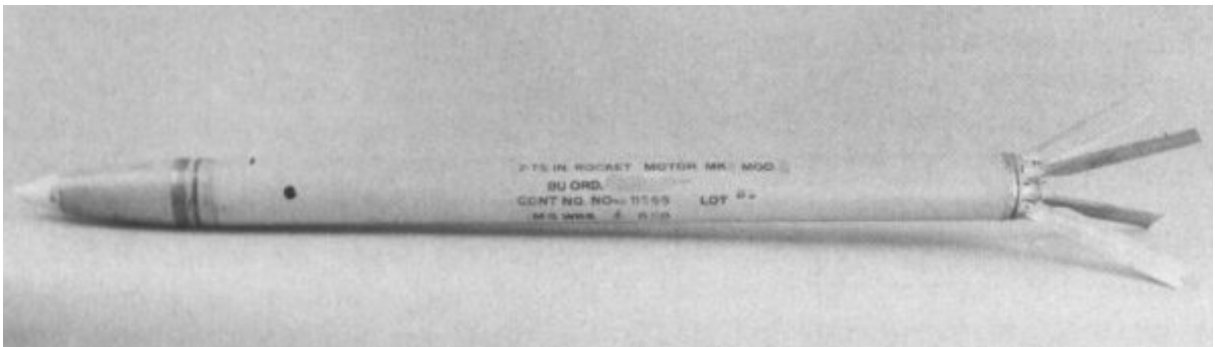


Figura 30 – *Mighty Mouse* MK4 (PARSCH, 2009)

Na década de 1950, o FFAR de 70 mm foi amplamente utilizado como o foguete ar-ar *Mighty Mouse* pela *United States Air Force* (USAF). Contudo, como o foguete não era tão preciso tratou-se de adaptá-lo para uso ar-terra.

Mais tarde, o foguete foi aperfeiçoado pelo Exército e Corpo de Fuzileiros Navais dos EUA para utilização em helicópteros. Com o intuito de adquirir um melhor desempenho ao partir dessas plataformas foi desenvolvido o motor MK 40, possibilitando maior rotação e precisão.

### 5.1.1 HYDRA - 70

Atualmente o Exército Americano vem utilizando o sistema de foguetes *Hydra 70* com motor MK 66, sendo uma versão substituta do MK 4 e MK 40.

O MK 66 é mais longo que o MK 4/40, usa um propulsor sem fumaça melhorado e tem uma montagem completamente nova de tubeira e tipo de aleta. As três aletas são do tipo *wrap-around* e se encaixam em torno da circunferência da tubeira do foguete. Possui uma taxa de impulso e rotação maior do que o MK 4/40, aumentando o alcance efetivo e a precisão.

Existem inúmeras ogivas das quais foram originalmente desenvolvidas para o MK 4/40 FFARs e estão disponíveis para o foguete MK 66 *Hydra 70*, conforme pode ser observado na Figura 31.



Figura 31 – Sistema *Hydra 70* MK 66 com diversos tipos de ogiva (General Dynamics)

Na Tabela 2 é possível verificar alguns parâmetros de relevância fornecidos pelo fabricante do *Hydra - 70* referentes ao motor MK 66 empregado no mesmo.

Tabela 2 – Parâmetros do foguete *Hydra 70*

Parâmetro	Valor
Peso (somente motor)	6,2 <i>kgf</i>
Peso total (dependendo da ogiva empregada)	11,33 <i>kgf</i>
Comprimento (somente motor)	1059 <i>mm</i>
Diâmetro	70 <i>mm</i>
Alcance útil	8,00 <i>km</i>
Alcance máximo	10,50 <i>km</i>
Velocidade máxima	739 <i>m/s</i>
Velocidade de saída do lançador	45 <i>m/s</i>

## 5.2 RESULTADOS AERODINÂMICOS DO FOGUETE SS-09 TS

Com o intuito de prosseguir com a modelagem do foguete SS-09 TS, buscou-se adaptar o motor MK 66 do foguete *Hydra 70* (no qual os dados puderam ser obtidos por meio do *datasheet* do fabricante e pelo banco de dados do *software PRODAS*) para o foguete SS - 09 TS, dentro dos parâmetros de manual previsto para o foguete em análise.

Para o levantamento dos coeficientes aerodinâmicos, o *PRODAS* fornece opções para diversos coeficientes aerodinâmicos, assim como para os coeficientes do efeito Magnus. Para tal, deve-se selecionar no menu principal a opção *Analysis*, selecionar o menu *Aerodynamics* e optar pela opção *Aero Predictions*, conforme Figura 52 presente no Apêndice A.

O programa exibe uma nova página, já com os dados obtidos do projétil criado anteriormente, conforme ilustrado na Figura 53 presente no Apêndice A. Na aba inicial, *Geometry Inputs*, são realizadas análises da geometria do projétil, tais como comprimento do projétil em voo, comprimento da ogiva, raio da ogiva, diâmetro *Meplat*<sup>1</sup>, diâmetro de referência, entre outros.

Ao selecionar o comando *Calc New Aeros* é gerado na aba *Aero Model* do software o modelo aerodinâmico que será analisado, conforme apresentado na Figura 54 presente no Apêndice A.

O *PRODAS* fornece também através da aba *Tabular Results* os coeficientes aerodinâmicos levantados para o modelo em estudo, conforme pode ser verificado na Figura 55 presente no Apêndice A.

<sup>1</sup> A palavra é de origem francesa "méplat" e pode ser entendida como "superfície plana de um cilindro". O mesmo fica localizado na parte dianteira da munição, tendo influência relevante no levantamento dos coeficientes aerodinâmicos.

Um projétil com meplat plano e largo tem muito mais potencial para transferir sua energia imediatamente sobre o impacto do que um projétil pontiagudo. (FOSTER, 2016)

Além disso, através da aba *Formatted Results* o programa possibilita ainda a reunião dos dados referentes às abas anteriores. Dentre os dados apresentados nesta aba, pode-se citar:

- Parâmetros básicos do projeto;
- Coeficientes aerodinâmicos, conforme Figura 32;
- Coeficientes aerodinâmicos dos componentes do conjunto de aletas;
- Tabela de conversão dos coeficientes da força de arrasto e sustentação para os coeficientes da força axial e normal (Figura 33), visto que o *software* trabalha com eixos paralelos e perpendiculares ao eixo de simetria do foguete, ao invés de eixos paralelos e perpendiculares à trajetória, como já mencionado no item 3.3.4.

SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Crespo.pr3 - 0  
07/12/2022 16:10  
Finner2000 Version 3.0.0

Aerodynamic Coefficients (with form factors applied) for Baseline Stage 1  
Fin Set(s) Included 1: Yes 2: No 3: No

Mach	CX0	CX2	CX4	CNa	CNa3	CPN	CYpa	CXfore	CXbase	CNq
1.000	0.759	8.11	0.0	13.04	0.0	14.46	0.00	0.544	0.214	367.5
1.025	0.796	8.86	0.0	13.07	0.0	14.70	0.00	0.583	0.213	377.0
1.050	0.833	9.61	0.0	13.10	0.0	14.93	0.00	0.622	0.211	386.6
1.100	0.814	10.83	0.0	13.44	0.0	15.12	0.00	0.603	0.211	406.3
1.200	0.773	12.76	0.0	12.70	0.0	14.90	0.00	0.566	0.207	378.8
1.350	0.745	12.13	0.0	11.94	0.0	14.54	0.00	0.544	0.201	346.5
1.500	0.714	11.48	0.0	11.46	0.0	14.17	0.00	0.520	0.194	322.6
1.750	0.671	10.85	0.0	11.33	0.0	13.91	0.00	0.490	0.181	312.9
2.000	0.631	10.19	0.0	9.22	0.0	12.61	0.00	0.465	0.166	226.0
2.250	0.594	9.84	0.0	8.70	0.0	12.01	0.00	0.442	0.152	201.7
2.500	0.557	9.48	0.0	8.17	0.0	11.34	0.00	0.420	0.137	177.3
3.000	0.485	8.19	0.0	7.37	0.0	10.36	0.00	0.374	0.111	145.6
3.500	0.460	7.60	0.0	6.77	0.0	9.72	0.00	0.368	0.092	123.7
4.000	0.435	7.02	0.0	6.16	0.0	8.97	0.00	0.362	0.073	101.8

Moments at Baseline CG = 8.98 Calibers from the Nose

Mach	Cma	Cma3	Cma5	Cmq	Cmq2	Cnpa@1	Cnpa@3	Cnpa@5	Clp	Cld
1.000	-71.5	0.0	0.0	-2243.9	0.0	0.0	0.0	0.	-4.8	0.057
1.025	-74.7	0.0	0.0	-2299.5	0.0	0.0	0.0	0.	-4.8	0.058
1.050	-78.0	0.0	0.0	-2355.0	0.0	0.0	0.0	0.	-4.9	0.059
1.100	-82.5	0.0	0.0	-2491.0	0.0	0.0	0.0	0.	-5.0	0.061
1.200	-75.1	0.0	0.0	-2396.2	0.0	0.0	0.0	0.	-4.7	0.056
1.350	-66.3	0.0	0.0	-2288.7	0.0	0.0	0.0	0.	-4.2	0.051
1.500	-59.4	0.0	0.0	-2223.6	0.0	0.0	0.0	0.	-3.9	0.047
1.750	-55.9	0.0	0.0	-2206.6	0.0	0.0	0.0	0.	-3.8	0.046
2.000	-33.4	0.0	0.0	-1838.2	0.0	0.0	0.0	0.	-2.8	0.033
2.250	-26.4	0.0	0.0	-1740.0	0.0	0.0	0.0	0.	-2.5	0.030
2.500	-19.3	0.0	0.0	-1641.8	0.0	0.0	0.0	0.	-2.2	0.026
3.000	-10.1	0.0	0.0	-1497.9	0.0	0.0	0.0	0.	-1.8	0.021
3.500	-5.0	0.0	0.0	-1384.4	0.0	0.0	0.0	0.	-1.6	0.018
4.000	0.1	0.0	0.0	-1270.8	0.0	0.0	0.0	0.	-1.3	0.015

Figura 32 – Aba *Formatted Results* - Coeficientes Aerodinâmicos

Com a finalidade de possibilitar maior compreensão quanto aos coeficientes apresentados na Figura 32, buscou-se indicar a nomenclatura dos mesmos.

Onde:

$CX_0$  - Coeficiente de força axial de guinada zero;  
 $CNa$  - Coeficiente da força Normal;  
 $CPN$  - Centro de pressão da força normal;  
 $CYpa$  - Coeficiente de força Magnus;  
 $CXf$  - Coeficiente de força axial da parte dianteira do corpo;  
 $CXb$  - Coeficiente de força axial da parte traseira do corpo;  
 $CNq$  - Coeficiente de força de amortecimento de arfagem;  
 $Cma$  - Coeficiente de momento de capotamento;  
 $Cmq$  - Coeficiente do momento de amortecimento de arfagem;  
 $Clp$  - Coeficiente do momento de amortecimento da rotação;  
 $Cld$  - Coeficiente do momento de rolagem.

Vale destacar que o arquivo gerado pelo *PRODAS* na aba *Formatted Results* com todos os dados fornecidos e empregados para o levantamento dos coeficientes aerodinâmicos estão disponíveis no Anexo A do presente projeto.

```

SS_09_TS_Finish_Cap_Crespo.pr3 - 0
07/12/2022 16:10
Finner2000 Version 3.0.0
  
```

Expressed in CD and CL Convention  
 (CX And CN Force Coeffs repeated for convenience)  
 Aerodynamic Coefficients (with form factors applied) for Baseline Stage 1  
 Fin Set(s) Included 1: Yes 2: No 3: No

Mach	CD0	CD2	CLa	CLa3	CXo	CX2	CNa	CNa3
1.00	0.759	21.16	12.29	-8.11	0.759	8.11	13.04	0.00
1.02	0.796	21.94	12.28	-8.86	0.796	8.86	13.07	0.00
1.05	0.833	22.71	12.27	-9.61	0.833	9.61	13.10	0.00
1.10	0.814	24.27	12.62	-10.83	0.814	10.83	13.44	0.00
1.20	0.773	25.46	11.93	-12.76	0.773	12.76	12.70	0.00
1.35	0.745	24.06	11.19	-12.13	0.745	12.13	11.94	0.00
1.50	0.714	22.93	10.74	-11.48	0.714	11.48	11.46	0.00
1.75	0.671	22.18	10.66	-10.85	0.671	10.85	11.33	0.00
2.00	0.631	19.41	8.59	-10.19	0.631	10.19	9.22	0.00
2.25	0.594	18.53	8.10	-9.84	0.594	9.84	8.70	0.00
2.50	0.557	17.65	7.61	-9.48	0.557	9.48	8.17	0.00
3.00	0.485	15.57	6.89	-8.19	0.485	8.19	7.37	0.00
3.50	0.460	14.37	6.31	-7.60	0.460	7.60	6.77	0.00
4.00	0.435	13.18	5.73	-7.02	0.435	7.02	6.16	0.00

Figura 33 – Aba *Formatted Results* - Conversão coeficientes

Já na aba *Plotted Results*, o *software* possibilita que todos os dados aerodinâmicos já obtidos possam ser plotados em função do número de Mach, permitindo-se, dessa forma, que o usuário tenha uma melhor perspectiva dos dados levantados. Nas figuras 34, 35, 36 e 37, pode-se visualizar o padrão de quatro curvas exibidas pelo programa ( $C_{X_0}$  versus Mach,  $C_{Na}$  versus Mach,  $CPN$  versus Mach e  $C_{Xf}$  versus Mach, respectivamente).

Vale destacar que o arquivo gerado pelo *PRODAS* na aba *Plotted Results* com todos os gráficos fornecidos e empregados para o levantamento dos coeficientes aerodinâmicos estão disponíveis no Anexo B do presente projeto.

Cabe ressaltar que como os dados aerodinâmicos não foram disponibilizados pelo fabricante, uma opção para uma análise mais aprofundada dos resultados fornecidos pelo programa, seria a implantação no *Ansys Fluent*, não sendo o foco do presente estudo.

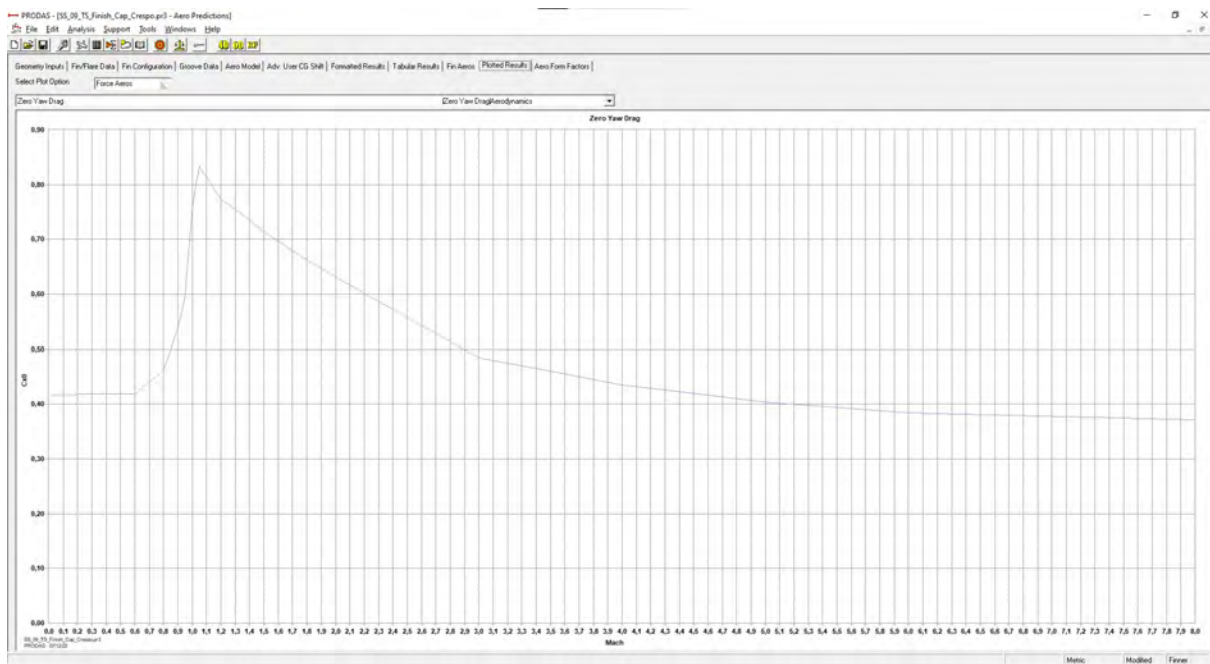


Figura 34 – Aba *Plotted Results* -  $C_{X0}$  x Mach

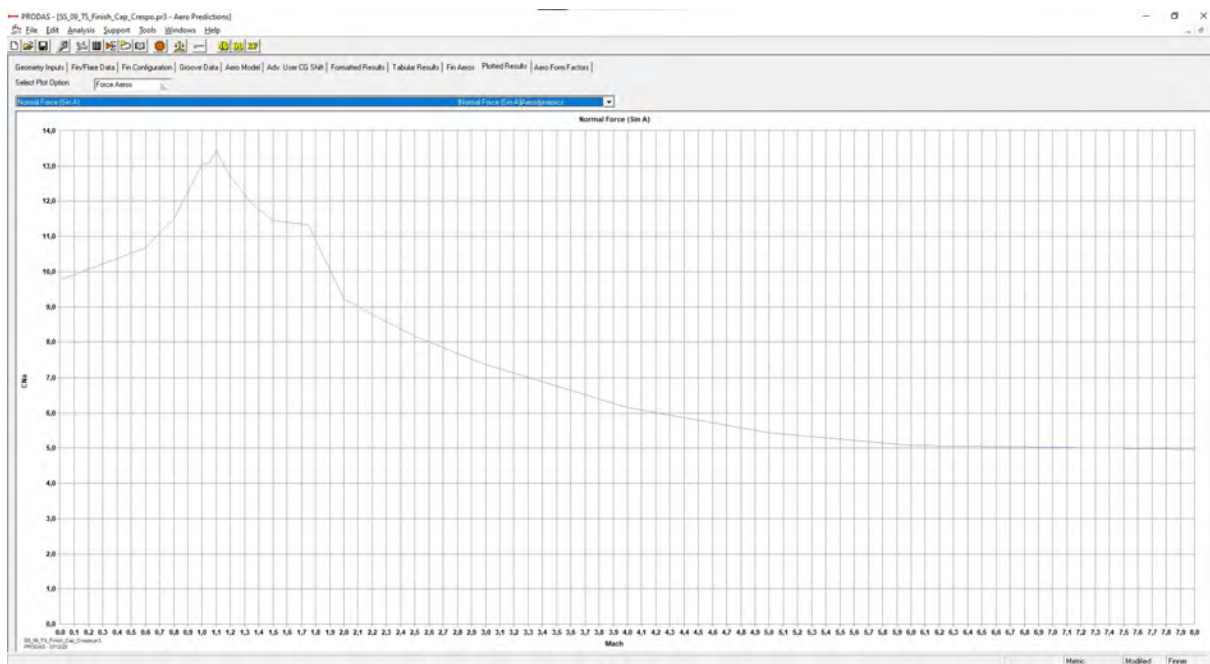


Figura 35 – Aba *Plotted Results* -  $C_{Na}$  x Mach.

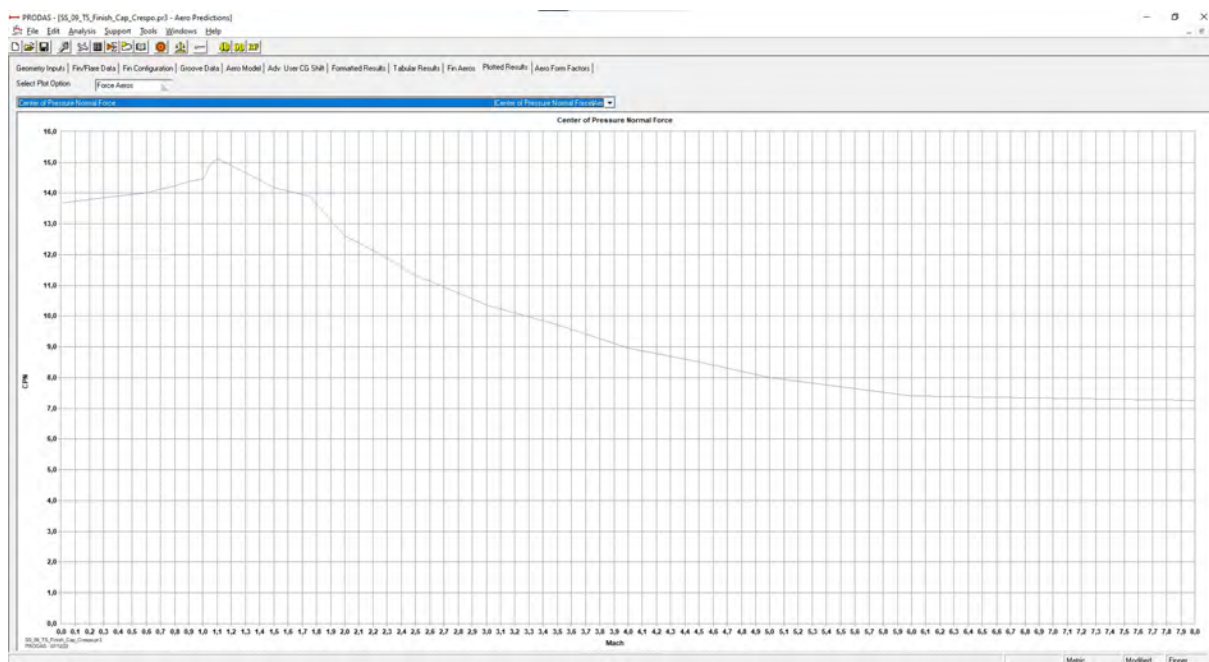


Figura 36 – Aba *Plotted Results* -  $CPN$  x Mach.

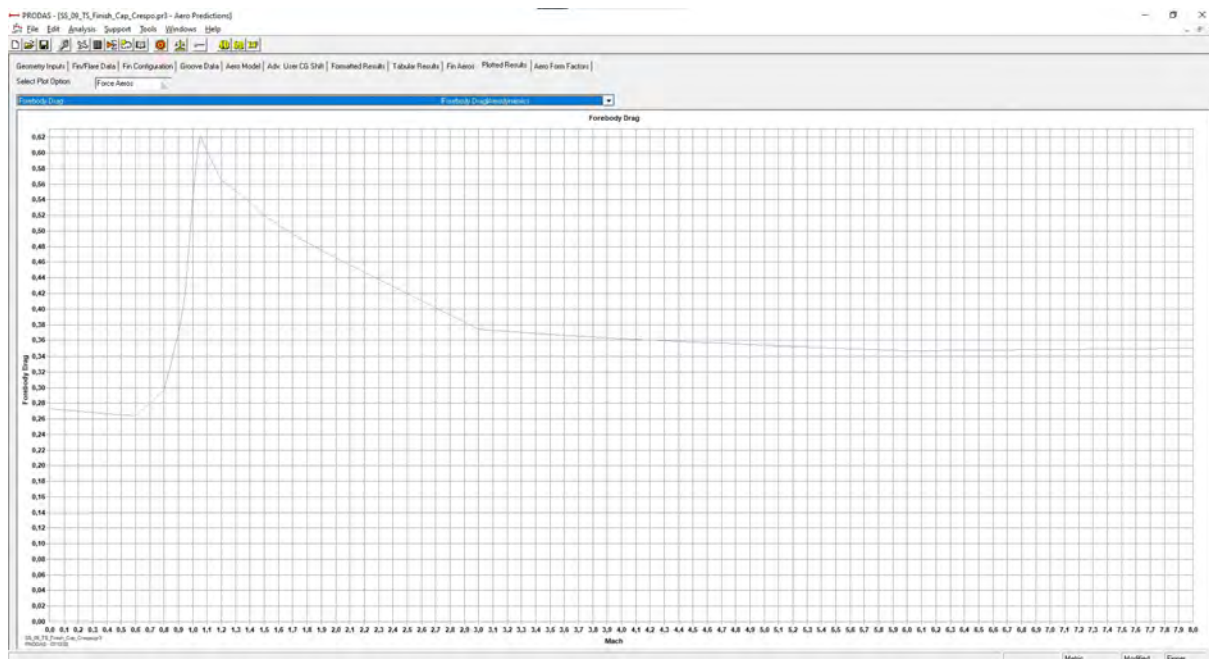


Figura 37 – Aba *Plotted Results* -  $C_{xf}$  x Mach.



## 6 TRAJETÓRIA

Neste capítulo buscou-se realizar o cálculo da trajetória do foguete SS-09 TS através do *software* *PRODAS*.

Com a finalidade de proceder uma avaliação mais detalhada, utilizou-se para o cálculo da trajetória tanto o modelo massa-ponto modificado (4-DOF), quanto o modelo com seis graus de liberdade (6-DOF).

Após a obtenção dos dados relativos a trajetória do foguete em estudo, foi possível comparar os resultados alcançados com o estabelecido pelo fabricante através da tabela de tiro.

### 6.1 RESULTADOS DA TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS PARA 4-DOF

Para o levantamento da trajetória com 4-DOF, o *software* simula a trajetória considerando os deslocamentos (x, y e z) e a rotação do foguete.

Com a finalidade de analisar a trajetória com 4-DOF, deve-se selecionar no menu principal a opção *Analysis*, selecionar o menu *Trajectories* e optar pela opção *Fixed Plane - 4D*, conforme Figura 56 apresentada no Apêndice B.

O programa exhibe uma nova página que permite ao usuário exercer maior controle sobre a simulação, conforme ilustrado na Figura 57 apresentada no Apêndice B. Para tal, pode-se inserir tempo de parada da simulação e parâmetros de alcance e altitude.

Além disso, é possível selecionar qual tipo de plataforma o mesmo está sendo lançado. No presente estudo, foi adotado um tempo de simulação de 90s com alcance variando até 12000m, visto que o alcance máximo do foguete analisado é de 11010m.

Na aba *Initial Conditions*, conforme pode ser observado na Figura 58 apresentada no Apêndice B, o *software* permite ao usuário configurar velocidade de boca, posição inicial (eixos x, y e z), quadrante de elevação, condições meteorológicas, entre outros.

Com o intuito de prosseguir com a análise do foguete, buscou-se por tentativa e erro chegar a uma velocidade de boca de modo que os parâmetros da trajetória obtidos no *PRODAS* fossem condizentes com os dados apresentados no manual. Tal medida tornou-se necessária, uma vez que essa informação não era fornecida pelo fabricante. Além disso, buscou-se adotar a posição inicial do eixo z como 5m, sendo considerada a altura média da viatura ASTROS quando em posição de tiro.

Através da aba *Projectile Parameters*, o *PRODAS* fornece propriedades da massa inicial do foguete em estudo antes da combustão completa e após a combustão completa, conforme pode-se verificar na Figura 59 apresentada no Apêndice B.

Após a inserção dos parâmetros mencionados nos parágrafos anteriores, o usuário deve selecionar o comando *Run 4DOF Trajectory* apresentado na aba *Setup/Run*. Dessa forma, o *software* gera através da aba *Tabular Results* os dados da trajetória do foguete em estudo com 4-DOF, conforme ilustrado na Figura 60 apresentada no Apêndice B.

Além disso, pela aba *Formatted Results* o programa possibilita a reunião dos dados referentes às abas anteriores. Dentre os dados apresentados nesta aba, pode-se citar: velocidade, ângulo de trajetória, altitude, ângulo de ataque, entre outros.

Já na aba *Plotted Results*, o *software* permite que todos os dados já obtidos relativos a trajetória possam ser plotados em função do tempo, permitindo-se, dessa forma, que o usuário tenha uma melhor perspectiva dos dados levantados. Na Figura 38 e 39, pode-se visualizar o padrão de duas curvas exibidas pelo programa: Tempo *versus* Deslocamento(m) e Tempo(s) *versus* Velocidade(m/s), respectivamente.

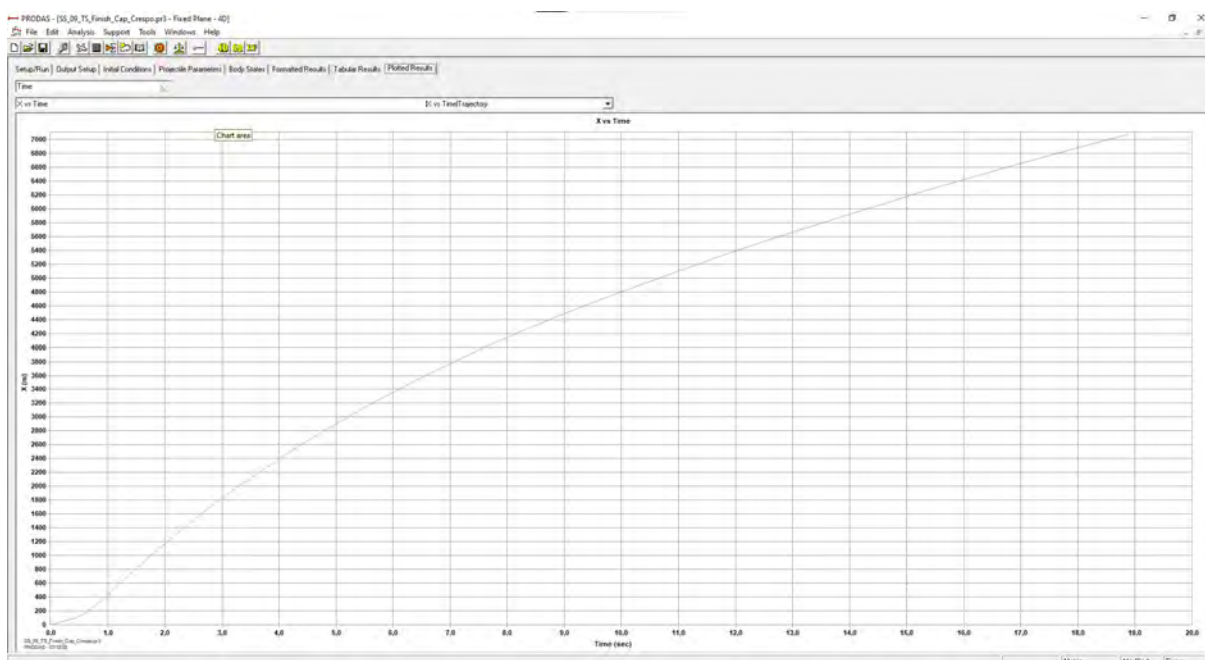


Figura 38 – Tempo x Deslocamento

Percebe-se na Figura 39 que a velocidade máxima obtida no gráfico é condizente com o valor de manual exposto pelo fabricante, cerca de 811 m/s, conforme exposto na Tabela 1. Além disso, constata-se que o tempo até atingir a velocidade máxima apresentada pelo *software*, cerca de 1 s, está em concordância com o apresentado na Tabela 1.

Posteriormente, será abordado o levantamento dos dados relativos a tabela de tiro do foguete em estudo através do *PRODAS*, no qual será possível verificar entre diversos

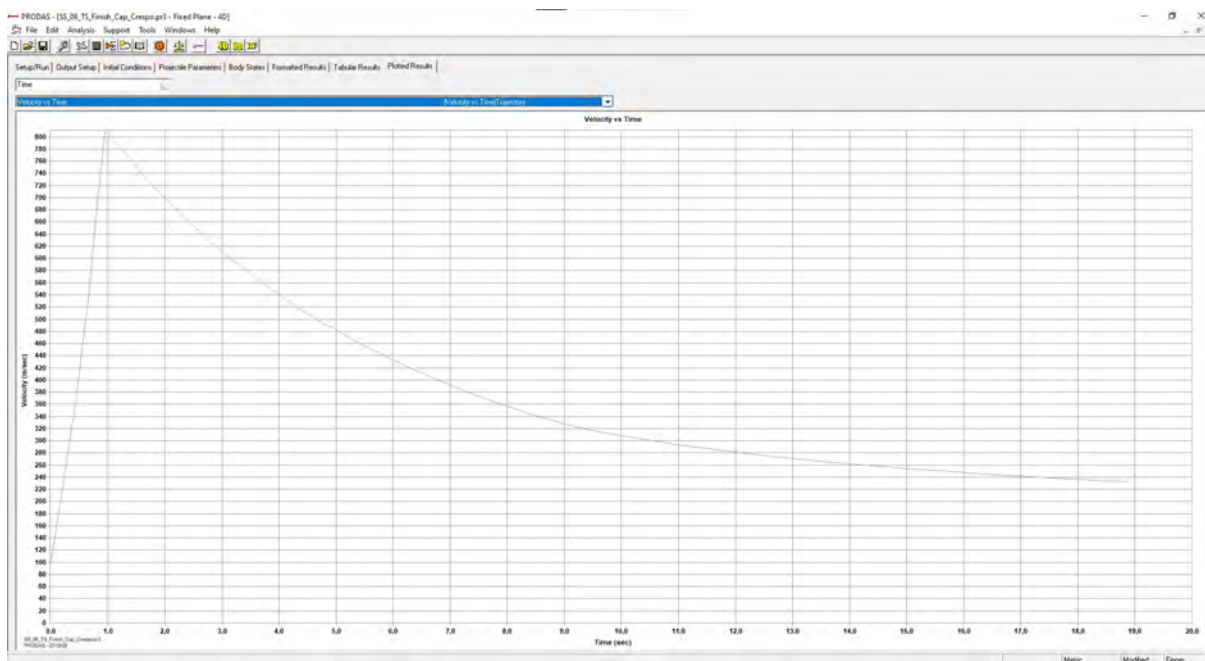


Figura 39 – Tempo x Velocidade

fatores, o alcance para cada intervalo de tempo, assim como a velocidade até aquele instante.

## 6.2 TABELA DE TIRO DO FOGUETE SS-09 TS PARA 4-DOF

Com o levantamento dos resultados provenientes da trajetória, pode-se obter a *Firing Table* (Tabela de Tiro) com 4-DOF para o foguete em análise. Para isso, deve-se selecionar no menu principal a opção *Analysis*, selecionar o menu *Firing Tables* e optar pela opção *Ballistic Tables*, conforme Figura 61 presente no Apêndice C.

O programa exibe uma nova página que permite ao usuário selecionar o tipo de trajetória que será feita a simulação (4-DOF ou 6-DOF), peso total, condições atmosféricas e, ainda, selecionar os fatores de forma dos coeficientes aerodinâmicos, conforme ilustrado na Figura 62 presente no Apêndice C.

Ao selecionar o comando *Run Analysis* o *PRODAS* fornece através da aba *Results Table* o tempo de voo, velocidade e energia cinética do foguete para cada alcance apresentado no modelo em estudo, conforme pode ser verificado na Figura 63 presente no Apêndice C.

Através dos dados fornecidos pelo *software* permite-se gerar a tabela de tiro do foguete em estudo com 4-DOF, conforme Figura 40.

Vale destacar que o arquivo gerado pelo *PRODAS* na aba *Formatted Output* com todos os dados fornecidos para o levantamento da tabela de tiro estão disponíveis no Anexo C do presente projeto.

\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
06/29/2022 16:37  
BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation		Angle of Descent		Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m
			deg.	G-mils	deg.	G-mils					
0.	95.6	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	54.4	0.000	0.000	0.0	0.0
100.	364.9	0.436	0.87	15.49	0.37	6.58	671.6	15.494	-0.005	0.2	40.4
200.	536.5	0.656	1.13	20.09	0.39	6.86	1320.2	20.091	-0.008	0.5	76.8
300.	686.6	0.816	1.28	22.83	0.38	6.76	2006.0	22.832	-0.009	0.7	111.0
400.	812.2	0.960	1.40	24.93	0.37	6.56	2610.2	24.927	-0.011	1.0	148.0
500.	802.0	1.076	1.48	26.30	0.37	6.63	2491.1	26.298	-0.012	1.2	179.6
600.	788.6	1.196	1.55	27.49	0.39	6.95	2408.7	27.487	-0.013	1.4	213.6
700.	774.0	1.331	1.61	28.66	0.42	7.50	2320.2	28.664	-0.014	1.7	255.1
800.	759.4	1.469	1.67	29.77	0.46	8.19	2233.8	29.767	-0.015	2.0	303.5
900.	746.7	1.594	1.73	30.71	0.50	8.90	2159.3	30.706	-0.016	2.3	354.3
1000.	732.8	1.733	1.78	31.71	0.55	9.77	2079.7	31.715	-0.017	2.7	419.2
1100.	719.9	1.865	1.84	32.65	0.60	10.66	2007.2	32.652	-0.018	3.1	480.6
1200.	706.4	2.008	1.89	33.64	0.66	11.67	1932.8	33.638	-0.019	3.6	543.7
1300.	693.0	2.153	1.95	34.63	0.72	12.75	1860.3	34.630	-0.020	4.2	605.9
1400.	680.7	2.291	2.00	35.57	0.78	13.83	1794.6	35.566	-0.021	4.7	663.4
1500.	667.7	2.441	2.06	36.57	0.85	15.04	1726.7	36.570	-0.022	5.4	723.8
1600.	654.8	2.594	2.11	37.60	0.92	16.32	1660.6	37.596	-0.023	6.2	784.1
1700.	642.0	2.751	2.17	38.64	1.00	17.69	1596.2	38.644	-0.025	7.0	844.4
1800.	629.3	2.911	2.23	39.71	1.08	19.14	1533.6	39.714	-0.026	7.9	904.6
1900.	618.1	3.057	2.29	40.69	1.15	20.50	1479.6	40.687	-0.027	8.8	958.4
2000.	605.7	3.222	2.35	41.80	1.24	22.09	1421.0	41.796	-0.028	9.9	1018.3
2100.	593.5	3.392	2.42	42.94	1.34	23.78	1364.1	42.936	-0.030	11.1	1078.5
2200.	581.3	3.565	2.48	44.11	1.44	25.56	1308.8	44.107	-0.031	12.4	1138.9
2300.	569.3	3.743	2.55	45.31	1.54	27.44	1255.2	45.310	-0.032	13.7	1199.6
2400.	557.4	3.924	2.62	46.54	1.65	29.41	1203.5	46.543	-0.034	15.2	1260.6
2500.	545.7	4.109	2.69	47.81	1.77	31.50	1153.5	47.808	-0.035	16.8	1321.6
2600.	534.2	4.297	2.76	49.10	1.89	33.68	1105.4	49.104	-0.037	18.6	1382.7
2700.	524.2	4.467	2.83	50.28	2.01	35.71	1064.2	50.282	-0.038	20.2	1437.0
2800.	512.9	4.665	2.91	51.66	2.15	38.14	1019.0	51.655	-0.039	22.2	1499.0
2900.	501.8	4.866	2.99	53.07	2.29	40.69	975.2	53.069	-0.041	24.3	1561.3
3000.	490.8	5.072	3.07	54.52	2.44	43.38	933.1	54.524	-0.043	26.6	1623.8

Figura 40 – Extrato da aba *Formatted Output*

### 6.3 RESULTADOS DA TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS PARA 6-DOF

Para o levantamento da trajetória com 6-DOF, o *software* simula a trajetória considerando os deslocamentos (x, y e z), a rotação, o ângulo de ataque e ângulo de *yaw* do foguete.

Na análise com 6-DOF, o programa apresenta interface semelhante ao caso já apresentado para 4-DOF com pequenas variações, conforme será visto adiante.

Com a finalidade de analisar a trajetória do modelo com 6-DOF, deve-se selecionar no menu principal a opção *Analysis*, selecionar o menu *Trajectories* e optar pela opção *Fixed Plane - 6D*, conforme Figura 64 apresentada no Apêndice D.

O programa exibe uma nova página que permite ao usuário exercer maior controle sobre a simulação, conforme ilustrado na Figura 65 apresentada no Apêndice D. Para tal, pode-se inserir tempo de parada da simulação, intervalo de integração e parâmetros de alcance e altitude. Outra opção contida nessa aba que não consta na mesma aba para 4-DOF é opção de considerar *coriolis*.

Na aba *Setup/Run* é possível, ainda, selecionar qual tipo de plataforma o mesmo está sendo lançado. No presente estudo, foi adotado um tempo de simulação de 90s com alcance variando até 12000m, visto que o alcance máximo do foguete analisado é de 11010m.

Na aba *Initial Conditions*, conforme pode ser observado na Figura 66 apresentada no Apêndice D, o *software* permite ao usuário configurar velocidade de boca, posição inicial (eixos x, y e z), quadrante de elevação, condições meteorológicas, entre outros.

Com o intuito de prosseguir com a análise do foguete, buscou-se por tentativa e erro chegar a uma velocidade de boca de modo que os parâmetros da trajetória obtidos no *PRODAS* fossem condizentes com os dados apresentados no manual. Tal medida tornou-se necessária, uma vez que essa informação não era fornecida pelo fabricante. Além disso, buscou-se adotar a posição inicial do eixo z como 5m, sendo considerada a altura média da viatura ASTROS quando em posição de tiro.

Através da aba *Projectile Parameters*, o *PRODAS* fornece propriedades da massa inicial do foguete em estudo antes da combustão completa e após a combustão completa, conforme pode-se verificar na Figura 67 apresentada no Apêndice D.

Após a inserção dos parâmetros mencionados nos parágrafos anteriores, o usuário deve selecionar o comando *Run 6DOF Trajectory* apresentado na aba *Setup/Run*. Dessa forma, o *software* gera através da aba *Tabular Results* os dados da trajetória do foguete em estudo com 6-DOF, conforme ilustrado na Figura 68 apresentada no Apêndice D.

Além disso, pela aba *Formatted Results* o programa possibilita a reunião dos dados referentes às abas anteriores. Vale ressaltar que para simulação com 6-DOF o *software* fornece além das informações já mencionadas para 4-DOF, informações mais detalhas nas quais podem-se citar:

- Condições iniciais;
- Parâmetros da trajetória; e
- Dados da trajetória de plano fixo com 6-DOF.

Já na aba *Plotted Results*, o *software* permite que todos os dados já obtidos relativos a trajetória possam ser plotados em função do tempo, permitindo-se, dessa forma, que o usuário tenha uma melhor perspectiva dos dados levantados. Na Figura 41 e 42, pode-se visualizar o padrão de duas curvas exibidas pelo programa: Tempo *versus* Deslocamento(m) e Tempo(s) *versus* Velocidade(m/s), respectivamente.

Percebe-se na Figura 42 que a velocidade máxima obtida no gráfico é condizente com o valor já encontrado para 4-DOF e com o dado de manual exposto pelo fabricante, cerca de 811 m/s, conforme exposto na Tabela 1. Além disso, constata-se que o tempo até atingir a velocidade máxima apresentada pelo *software*, cerca de 1 s, está em concordância

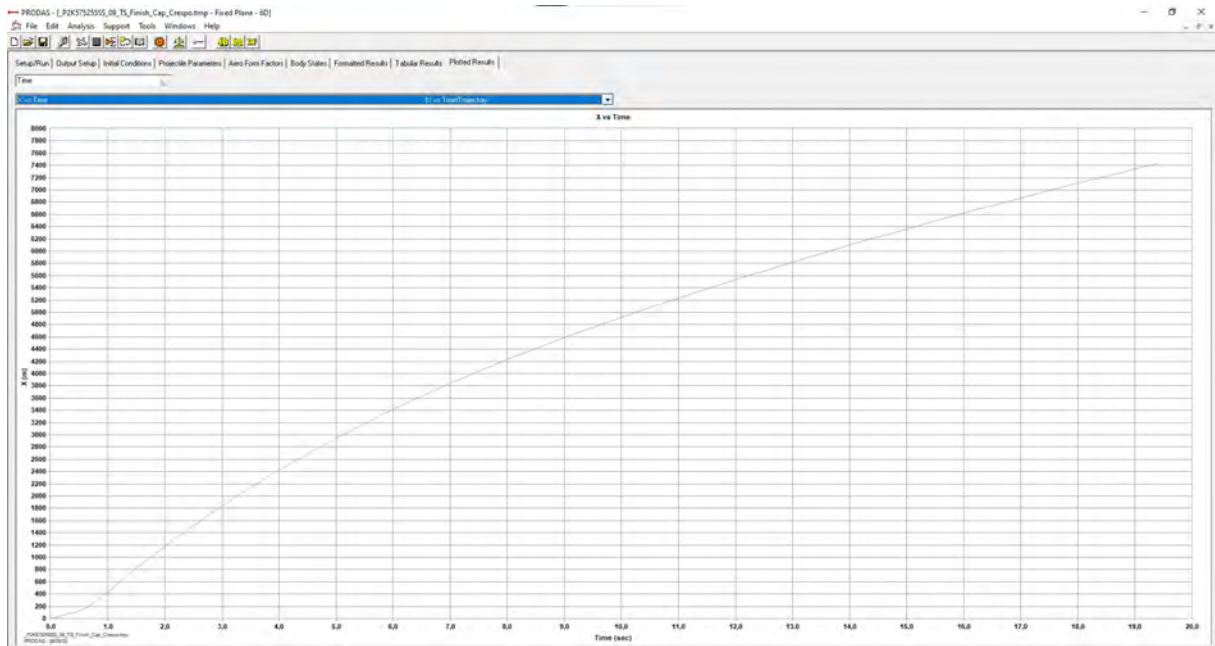


Figura 41 – Tempo x Deslocamento

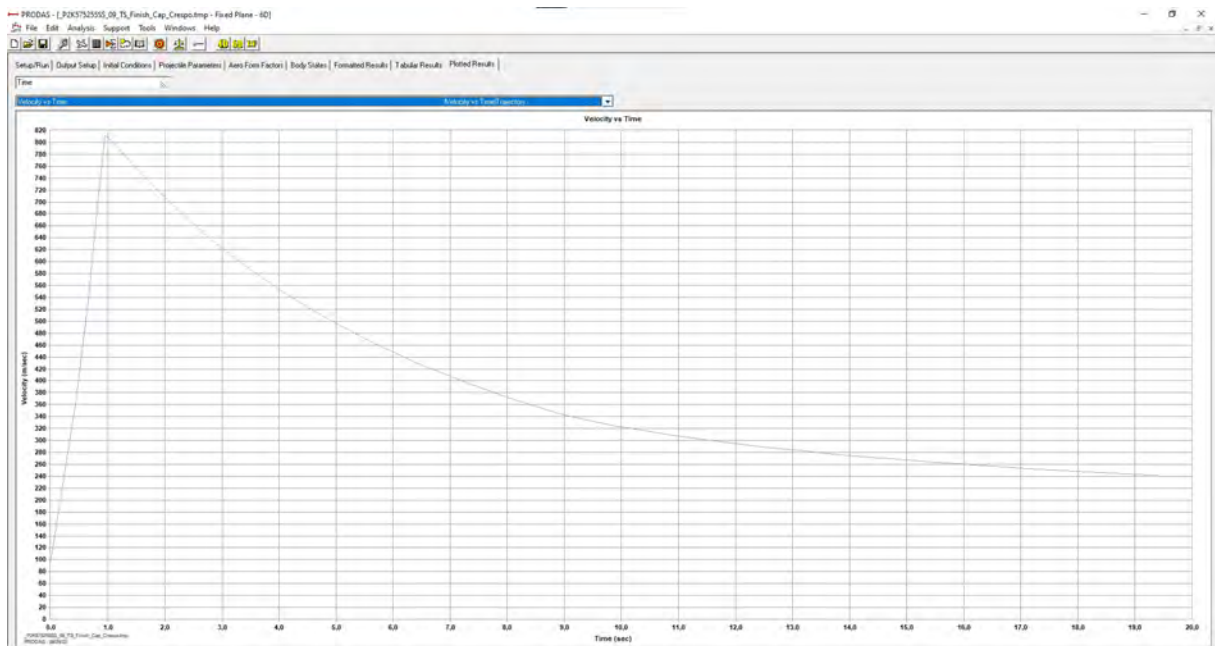


Figura 42 – Tempo x Velocidade

com o apresentado para 4-DOF e com a Tabela 1.

Posteriormente, será abordado o levantamento dos dados relativos a tabela de tiro do foguete em estudo através do *PRODAS*, no qual será possível verificar entre diversos fatores, o alcance para cada intervalo de tempo, assim como a velocidade até aquele instante.

## 6.4 TABELA DE TIRO DO FOGUETE SS-09 TS PARA 6-DOF

Com o levantamento dos resultados provenientes da trajetória, pode-se obter a *Firing Table* (Tabela de Tiro) com 6-DOF para o foguete em análise. Para isso, segue-se o mesmo caminho para o caso já mencionado com 4-DOF. Deve-se selecionar no menu principal a opção *Analysis*, selecionar o menu *Firing Tables* e optar pela opção *Ballistic Tables*, conforme Figura 61 presente no Apêndice C.

O programa exibe uma nova página que permite ao usuário selecionar o tipo de trajetória que será feita a simulação (4-DOF ou 6-DOF), condições atmosféricas, peso total e, ainda, selecionar os fatores de forma dos coeficientes aerodinâmicos, conforme ilustrado na Figura 62 presente no Apêndice C.

Ao selecionar o comando *Run Analysis* o *PRODAS* fornece através da aba *Results Table* o tempo de voo, velocidade e energia cinética do foguete para cada alcance apresentado no modelo em estudo, conforme pode ser verificado na Figura 69 apresentada no Apêndice E.

Através dos dados fornecidos pelo *software* permite-se gerar a tabela de tiro do foguete em estudo com 6-DOF, conforme Figura 43.

Vale destacar que o arquivo gerado pelo *PRODAS* na aba *Formatted Results* com todos os dados fornecidos para o levantamento da tabela de tiro estão disponíveis no Anexo D do presente projeto.

\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
06/29/2022 16:41  
BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation		Angle of Descent		Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m
			deg.	G-mils	deg.	G-mils					
0.	95.6	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	54.4	0.000	0.000	0.0	0.0
100.	363.9	0.434	0.70	12.51	0.35	6.30	668.3	12.507	-0.004	0.2	44.6
200.	542.1	0.663	0.97	17.19	0.38	6.71	1343.8	17.186	-0.006	0.5	77.6
300.	697.9	0.827	1.12	19.93	0.37	6.66	2061.0	19.931	-0.008	0.7	117.0
400.	811.2	0.955	1.22	21.76	0.36	6.49	2610.2	21.761	-0.009	1.0	146.2
500.	802.2	1.072	1.30	23.13	0.37	6.54	2492.3	23.131	-0.010	1.2	180.9
600.	786.8	1.210	1.38	24.47	0.39	6.93	2398.0	24.475	-0.011	1.4	217.7
700.	774.0	1.328	1.43	25.49	0.42	7.42	2320.4	25.495	-0.012	1.7	256.1
800.	759.6	1.465	1.50	26.58	0.46	8.11	2234.6	26.583	-0.013	2.0	302.1
900.	746.5	1.593	1.55	27.54	0.50	8.83	2158.3	27.540	-0.014	2.3	356.0
1000.	732.7	1.731	1.61	28.54	0.55	9.69	2079.2	28.537	-0.015	2.7	419.7
1100.	719.0	1.872	1.66	29.52	0.60	10.63	2002.3	29.523	-0.016	3.1	484.5
1200.	706.1	2.008	1.71	30.46	0.65	11.60	1930.9	30.465	-0.017	3.6	545.1
1300.	692.8	2.153	1.77	31.45	0.71	12.68	1859.0	31.445	-0.018	4.1	606.8
1400.	679.7	2.300	1.82	32.43	0.78	13.82	1789.4	32.433	-0.019	4.8	667.7
1500.	667.0	2.446	1.88	33.41	0.84	15.00	1723.2	33.410	-0.021	5.4	726.5
1600.	654.2	2.599	1.94	34.43	0.92	16.28	1657.5	34.427	-0.022	6.2	786.4
1700.	641.9	2.749	1.99	35.42	0.99	17.59	1596.0	35.424	-0.023	7.0	843.9
1800.	629.4	2.907	2.05	36.47	1.07	19.01	1534.3	36.474	-0.024	7.9	903.2
1900.	617.0	3.068	2.11	37.55	1.15	20.51	1474.3	37.552	-0.025	8.9	962.9
2000.	604.6	3.234	2.17	38.66	1.24	22.10	1416.0	38.657	-0.027	9.9	1022.6
2100.	592.4	3.403	2.24	39.79	1.34	23.78	1359.4	39.789	-0.028	11.1	1082.7
2200.	581.4	3.562	2.30	40.85	1.43	25.41	1309.1	40.854	-0.029	12.3	1137.9
2300.	569.5	3.737	2.36	42.04	1.53	27.26	1256.0	42.039	-0.030	13.6	1198.0
2400.	557.7	3.918	2.43	43.26	1.64	29.21	1204.6	43.259	-0.032	15.1	1258.3
2500.	546.0	4.102	2.50	44.52	1.76	31.28	1154.7	44.515	-0.033	16.7	1319.4
2600.	534.5	4.290	2.58	45.81	1.88	33.46	1106.5	45.806	-0.035	18.4	1380.6
2700.	523.1	4.483	2.65	47.13	2.01	35.75	1060.0	47.133	-0.036	20.2	1441.9
2800.	511.9	4.679	2.73	48.50	2.15	38.16	1015.1	48.496	-0.038	22.2	1503.3
2900.	500.9	4.879	2.81	49.89	2.29	40.69	972.0	49.894	-0.039	24.3	1565.0
3000.	491.0	5.066	2.88	51.21	2.43	43.11	933.9	51.206	-0.041	26.4	1621.5

{NEWPAGE}

Figura 43 – Extrato da aba *Formatted Results*

## 6.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Com a finalidade de analisar os dados fornecidos da tabela de tiro do fabricante para o foguete SS-09 TS com os resultados obtidos para 4-DOF e 6-DOF no *software PRODAS*, buscou-se realizar a comparação de ambos os valores conforme será visto a seguir.

No presente projeto, buscou-se estimar, por meio de tentativa e erro, a velocidade de boca do foguete ao ser lançado tanto para 4-DOF, quanto para 6-DOF para obter a velocidade máxima prevista em manual (811,64 m/s). Com isso, obteve-se resultados satisfatórios, conforme percebe-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Velocidade máxima.

Fabricante (m/s)	4-DOF (m/s)	6-DOF (m/s)
811,64	812,2	811,2

Além disso, ao estimar a velocidade de boca do foguete ao ser lançado para ambas as trajetórias, obteve-se o tempo até atingir a velocidade máxima. Com isso, gerou-se os



resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tempo até atingir velocidade máxima.

Fabricante (s)	4-DOF (s)	6-DOF (s)
1,17	0,96	0,955

Vale destacar que o foguete em estudo foi projetado para atender a velocidade máxima prevista em manual (811,64m/s), assim como o tempo até atingir essa velocidade máxima (1,17s), tendo sido esses parâmetros levados em consideração para gerar a tabela de tiro no *PRODAS*.

Com os resultados obtidos por meio do *software*, percebeu-se que existem divergências quanto ao tempo de voo estimado pelo manual técnico/tabela de tiro do foguete SS-09 TS. Como forma de mitigar tal divergência, buscou-se comparar a velocidade obtida para cada alcance. Contudo, o fabricante não disponibiliza tal informação na tabela de tiro fornecida, tornando-se, desta forma, a comparação com o tempo obtido nas tabelas de tiro do *PRODAS* inviável.

Como forma de prosseguir com a análise e validar os resultados encontrados no *software*, buscou-se comparar dados como: elevação, velocidade e alcance da flecha. Optou-se pela análise de tais parâmetros por serem dados significativos para o referido projeto do foguete em análise.

A tabela de tiro do fabricante é disponibilizada com alcance variando de 6300m a 10600m com altitude da viatura lançadora de 0m. Como forma de ser fidedigno ao comparar os dados obtidos pelo *software*, buscou-se restringir os resultados obtidos no programa para o mesmo intervalo de alcance utilizado pelo fabricante, gerando-se desta forma a Figura 51.

Ao comparar as tabelas de tiro geradas pelo *PRODAS* com os dados fornecidos pelo fabricante, percebe-se para o alcance da flecha um erro percentual inferior a 0,02% para um alcance de 6300m e um erro percentual inferior a 1,5% para um alcance de 8000m, conforme pode ser verificado nas Figuras 44 e 45. Optou-se pela análise gráfica do erro até 8000m, pois a partir desse alcance a tabela de tiro do fabricante passa a variar a cada 200m, ao invés de 100m, como vinha sendo feito.

Contudo, ao comparar-se o alcance da flecha com os dados obtidos por *software* para 4-DOF e 6-DOF, obtém-se resultados com erros percentuais inferiores a 0,06%, conforme ilustrado na Figura 46.

Na comparação da elevação fornecida pelo fabricante com a obtida no *software* percebe-se que há um erro percentual inicial de cerca de 5% e 7% para 4-DOF e 6-DOF, respectivamente que tende a se propagar com o aumento do alcance, conforme pode ser verificado nas Figuras 47 e 48. Uma possível solução para este erro seria enquadrar a

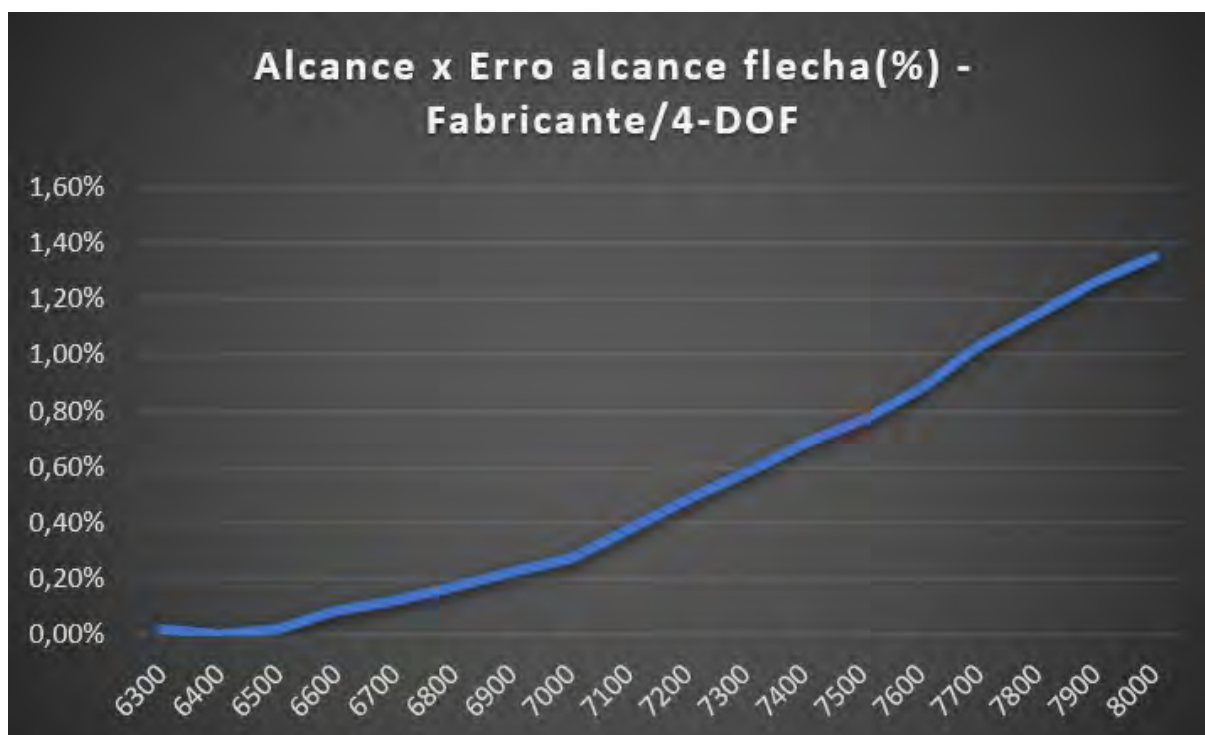


Figura 44 – Comparação do alcance *versus* erro percentual de alcance da flecha entre Fabricante e 4-DOF



Figura 45 – Comparação do alcance *versus* erro percentual de alcance da flecha entre Fabricante e 6-DOF

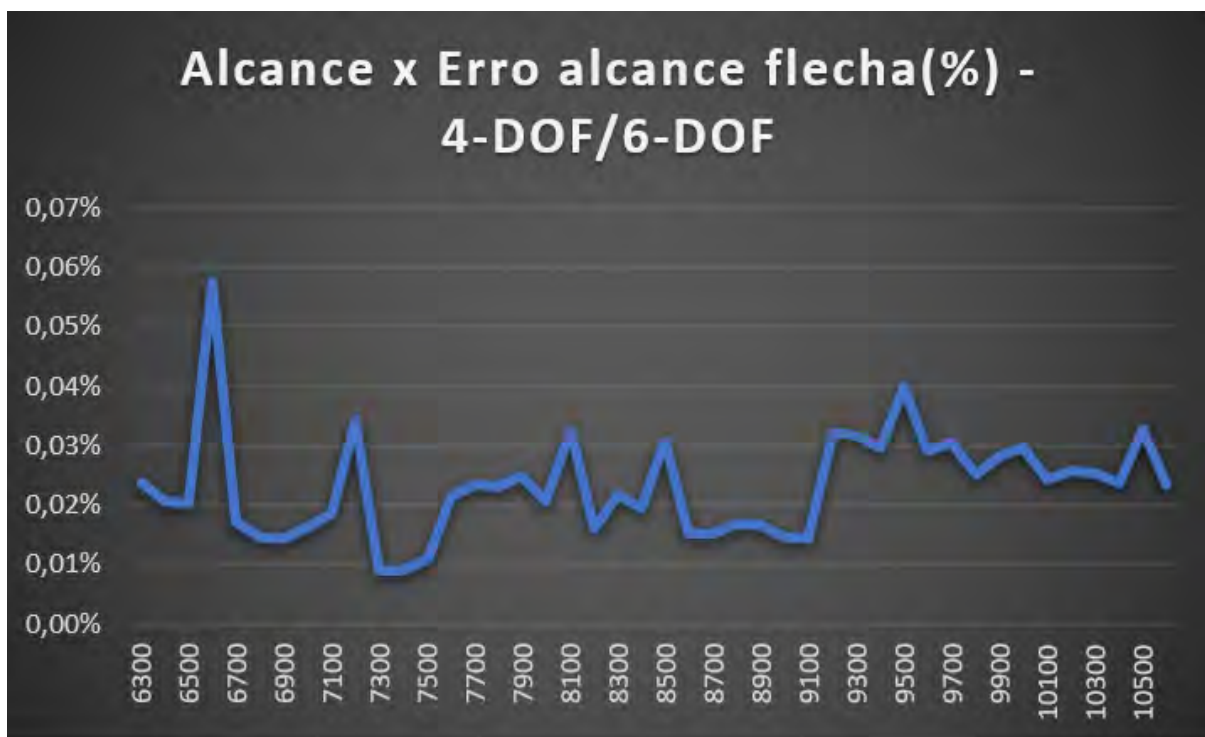


Figura 46 – Comparação do alcance *versus* erro percentual de alcance da flecha entre 4-DOF e 6-DOF

simulação dentro do quadrante de elevação e das condições meteorológicas estabelecida pelo fabricante, visto que esses fatores também são levados em consideração para gerar a tabela de tiro. Entretanto, tornou-se inviável de ser estabelecida no *PRODAS* devido a dificuldade de acesso a essas informações.

Ao comparar-se a elevação obtida por *software* para 4-DOF e 6-DOF, obtém-se resultado com erro percentual inicial inferior a 2,6% que diminui ao decorrer da trajetória, chegando a ser inferior a 1% após 10400m, conforme ilustrado na Figura 49.

Vale lembrar que como o fabricante inicia a tabela de tiro para o alcance de 6300m, a comparação com os dados relativos a velocidade máxima viu-se impossibilitada, pois de acordo com a simulação gerada no *PRODAS* a velocidade máxima é encontrada para o alcance de 400m, conforme Anexo C e D. Porém, com a finalidade de prosseguir com a análise, buscou-se comparar as velocidade geradas por *software* nos alcances já mencionados, obtendo-se uma média de erro de 0,04% com erros mais pontuais nos extremos do intervalo do alcance considerado, conforme Figura 50.

De acordo com as Figuras 46, 50 e 51, percebe-se que o método com 4-DOF e 6-DOF possuem uma boa aproximação. Da literatura, sabe-se que o método com 6-DOF é o mais preciso para cálculo das trajetórias. Contudo, o mesmo exige grande custo computacional para ser executado, podendo ser aproximado por um modelo de 4-DOF que permite ao projeto deslocar-se na quantidade adequada sem perder tanta precisão, visto que a variação



Figura 47 – Comparação do alcance *versus* erro percentual de elevação entre Fabricante e 4-DOF

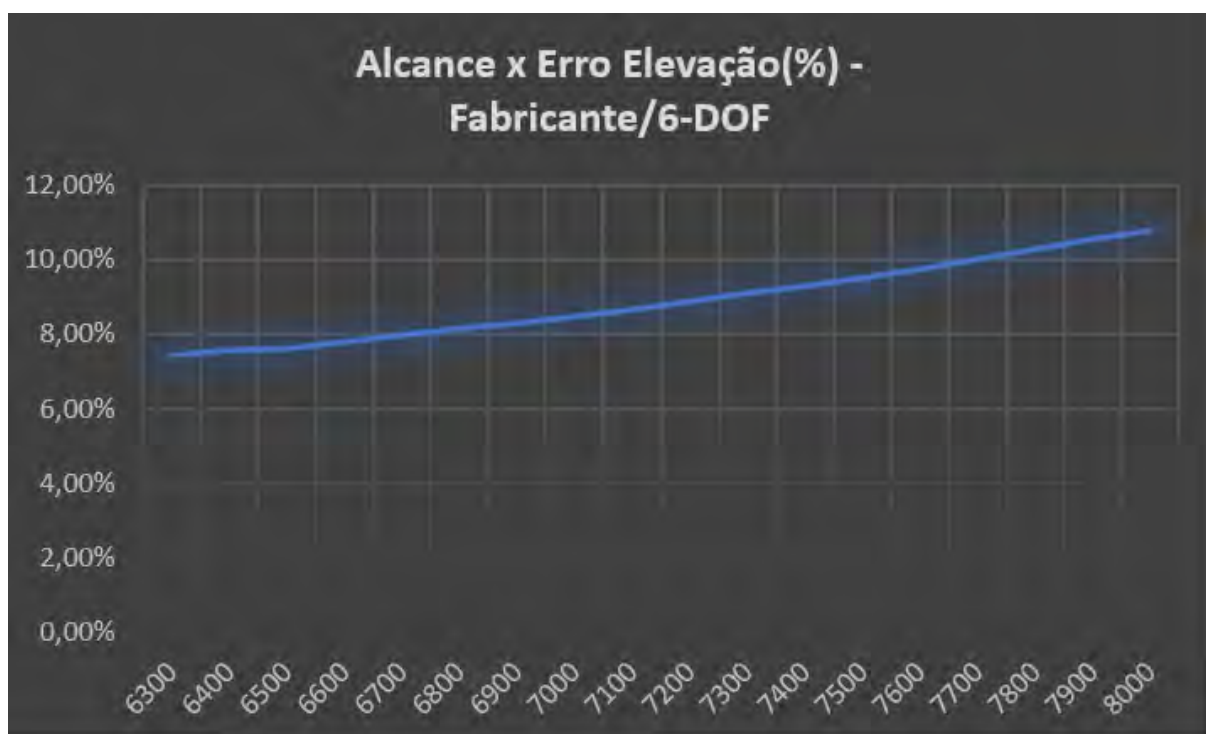


Figura 48 – Comparação do alcance *versus* erro percentual de elevação entre Fabricante e 6-DOF

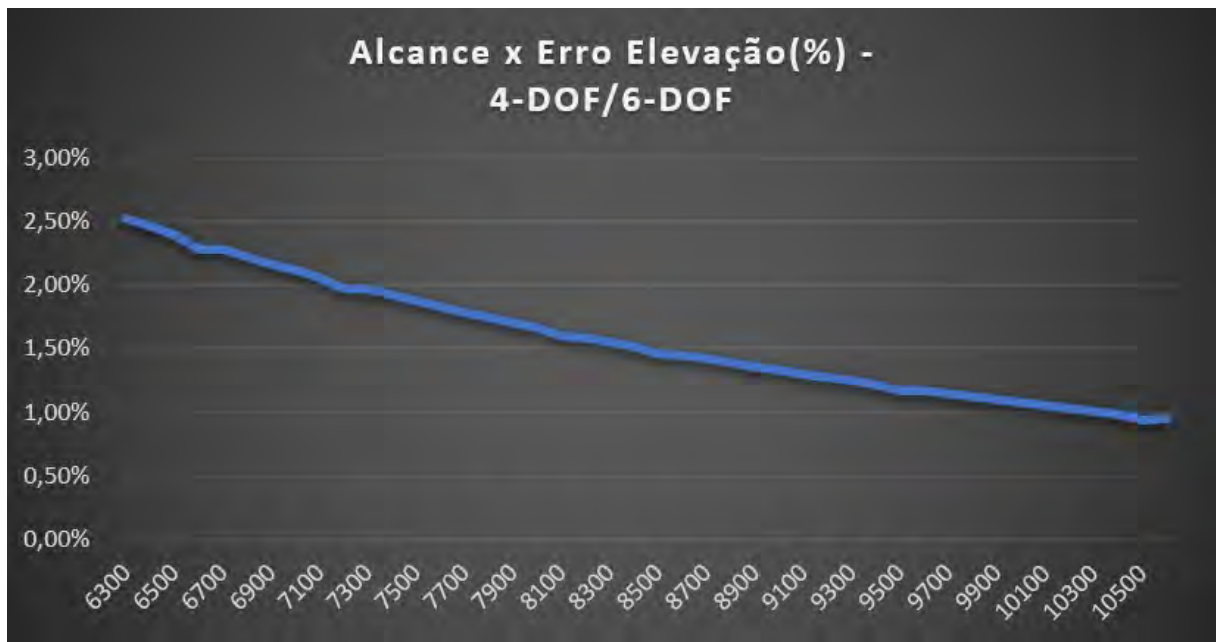


Figura 49 – Comparação do alcance *versus* erro percentual de elevação entre 4-DOF e 6-DOF

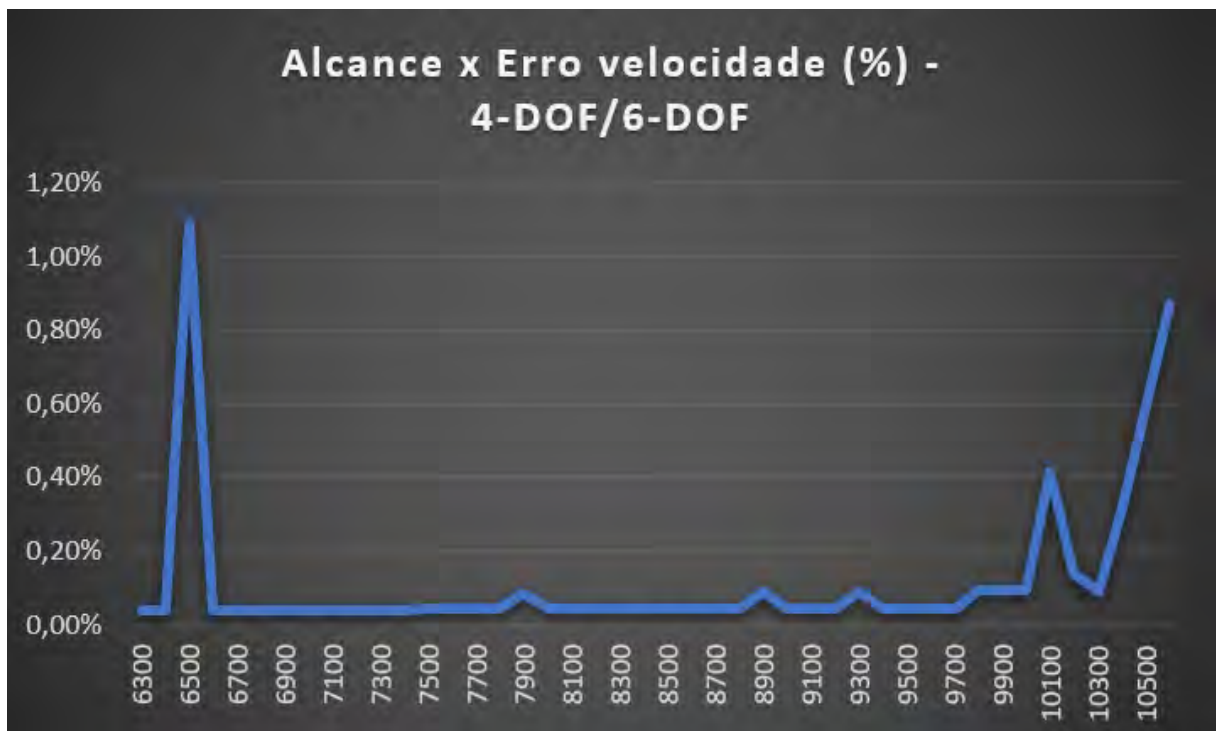


Figura 50 – Comparação do alcance *versus* erro percentual de velocidade entre 4-DOF e 6-DOF

Alcance (m)	Velocidade (m/s)			Alcance da flecha (m)			Elevação (mils)		
	Fabricante	4-DOF	6-DOF	Fabricante	4-DOF	6-DOF	Fabricante	4-DOF	6-DOF
6300		269.1	269.0	3811	3810.1	3811.0	145.7	138.41	134.91
6400		266.2	266.1	3877	3876.8	3877.6	150.3	142.46	138.95
6500		263.4	263.3	3944	3943.1	3943.9	154.9	146.61	143.09
6600		260.7	260.6	4011	4007.5	4009.8	159.8	150.78	147.34
6700		258.1	258.0	4078	4073.0	4073.7	164.7	155.14	151.60
6800		255.5	255.4	4145	4138.0	4138.6	169.9	159.61	156.06
6900		253.1	253.0	4212	4202.4	4203.0	175.1	164.19	160.63
7000		250.7	250.6	4278	4266.3	4267.0	180.6	168.88	165.31
7100		248.4	248.3	4346	4329.7	4330.5	186.2	173.68	170.10
7200		246.2	246.1	4413	4391.6	4393.1	192.0	178.51	175.00
7300		244.1	244.0	4480	4454.0	4454.4	197.9	183.54	179.93
7400		242.0	241.9	4547	4516.0	4516.4	204.0	188.69	185.07
7500		240.1	240.0	4613	4577.5	4578.0	210.3	193.96	190.33
7600		238.2	238.1	4680	4638.8	4639.8	216.8	199.34	195.70
7700		236.4	236.3	4748	4698.9	4700.0	223.5	204.78	201.13
7800		234.7	234.6	4815	4759.8	4760.9	230.4	210.42	206.75
7900		233.1	232.9	4882	4820.5	4821.7	237.5	216.20	212.51
8000		231.5	231.4	4948	4881.1	4882.1	244.8	222.10	218.40
8100		230.0	229.9	NO	4941.0	4942.6	NO	228.06	224.43
8200		228.6	228.5	5083	5001.5	5002.3	260.2	234.24	230.52
8300		227.3	227.2	NO	5062.0	5063.1	NO	240.56	236.83
8400		226.1	226.0	5216	5122.5	5123.5	276.5	247.03	243.28
8500	NO	224.9	224.8	NO	5182.4	5184.0	NO	253.57	249.88
8600		223.8	223.7	5350	5242.8	5243.6	293.9	260.34	256.56
8700		222.8	222.7	NO	5303.3	5304.1	NO	267.27	263.47
8800		221.9	221.8	5483	5363.7	5364.6	312.5	274.35	270.55
8900		221.1	220.9	NO	5423.5	5424.4	NO	281.54	277.72
9000		220.3	220.2	5616	5484.0	5484.8	332.4	288.98	285.14
9100		219.6	219.5	NO	5544.4	5545.2	NO	296.59	292.74
9200		219.0	218.9	5748	5604.1	5605.9	353.9	304.31	300.44
9300		218.5	218.3	NO	5664.5	5666.3	NO	312.31	308.42
9400		218.0	217.9	5879	5724.8	5726.5	377.1	320.50	316.61
9500		217.6	217.5	NO	5784.5	5786.8	NO	328.83	324.99
9600		217.3	217.2	6010	5844.8	5846.5	402.4	337.47	333.53
9700		217.1	217.0	NO	5905.0	5906.8	NO	346.33	342.38
9800		217.0	216.8	6139	5964.6	5966.1	430.2	355.35	351.38
9900		216.9	216.7	NO	6024.7	6026.4	NO	364.72	360.73
10000		216.9	216.7	6267	6084.7	6086.5	461.3	374.36	370.35
10100		217.0	216.4	NO	6144.1	6145.6	NO	384.20	380.17
10200		217.2	216.1	6393	6204.0	6205.6	496.8	394.45	390.40
10300		217.4	215.7	NO	6263.1	6264.7	NO	404.91	400.84
10400		217.7	215.3	6515	6322.7	6324.2	539.2	415.85	411.75
10500		218.1	214.8	NO	6381.4	6383.5	NO	427.04	423.04
10600		218.6	214.4	6631	6440.6	6442.1	594.6	438.79	434.64

Figura 51 – Comparação das tabelas de tiro

do ângulo de guinada do foguete em estudo é relativamente baixa.

Pode-se dizer, ainda, que mesmo com as restrições impostas ao estudo do foguete proposto foi possível o levantamento de informações relevantes que podem servir como parâmetros a serem refinados para análises futuras.

## 7 CONCLUSÃO

O presente trabalho passou pelas diversas áreas que abrangem a teoria conceitual de um foguete balístico. Tal projeto demonstra sua importância em aspectos ligados a segurança no monitoramento das fronteiras, florestas e recursos naturais, bem como de garantir a hegemonia frente a países vizinhos, elevando o Brasil a um novo nível de reconhecimento internacional, diante de pesquisas em segmentos do setor espacial.

Buscou-se realizar a modelagem tridimensional do foguete SS-09 TS, utilizando-se das ferramentas que compõem o programa *Solidworks*. Gerando-se, dessa forma, uma estimativa do desenho técnico do foguete SS-09 TS que foi implementada posteriormente no *PRODAS*.

Com o desenho gerado por meio do *software Solidworks* e de parâmetros adaptados do foguete *Hydra - 70*, procurou-se determinar os coeficientes aerodinâmicos do foguete em análise, gerando-se diversos dados tais como: coeficiente de guinada zero, coeficiente da força normal, centro de pressão da força normal, coeficiente de força axial da parte traseira do corpo, entre outros.

Através do levantamento dos parâmetros de interesse para a simulação, foi possível realizar o cálculo da trajetória utilizando-se tanto o modelo massa-ponto modificado (4-DOF), quanto o modelo com seis graus de liberdade (6-DOF). Com a obtenção dos dados relativos a trajetória do foguete em estudo, foi possível comparar os resultados alcançados com o estabelecido pelo fabricante através da tabela de tiro.

Vale ressaltar que o método com 4-DOF e 6-DOF possuem uma boa aproximação. Contudo, como 6-DOF exige grande custo computacional para ser executado, pode-se aproximar o foguete em estudo por um modelo de 4-DOF, visto que a variação do ângulo de guinada do foguete em estudo é relativamente baixa.

Portanto, pode-se dizer que mesmo com as restrições de dados técnicos impostas ao estudo do foguete proposto, foi possível realizar desde a modelagem tridimensional, levantamento dos coeficientes aerodinâmicos e geração de tabelas de tiro que podem servir como parâmetros base de comparação e refinamento para trabalhos futuros.



## REFERÊNCIAS

- BARANOWSKI, L.; FRANT, M. Calculation of aerodynamic characteristics of flying objects using prodas and fluent environments. *MECHANIK*, n. 1, p. 591–593, 2017.
- BARBOSA, L.; BLANCO, A.; DUTRA, D.; SANTANA, W.; ABRUNHOSA, J. A critical evaluation of three models of external ballistics. In: *Proceedings of the COBEM 2005: 18 th International Congress of Mechanical Engineering*. [S.l.: s.n.], 2005.
- C 6-40. *Técnica de Tiro de Artilharia de Campanha - Volume 1*. BRASIL, 2001.
- CARLUCCI, D. E.; JACOBSON, S. S. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. New York: CRC Press, 2008.
- DUPIUS, A. Aerodynamic characteristic and analysis of a mk82 bomb configuration from free-flight tests. p. 4325, 2001.
- EB70-MT-11.000. *Manual Técnico: Munições do sistema astros*. [S.l.], 2020. 105 p.
- FOSTER, N. *The Effects Of The Meplat On Terminal Ballistics*. 2016. 13 jul. de 2022. Disponível em: <<https://www.ballisticstudies.com/Knowledgebase/The+Effects+Of+The+Meplat+On+Terminal+Ballistics.html>>.
- MAAG, H. J.; KLINGENBERG, G. *Gun Propulsion Concepts. Part II: Solid and Liquid Propellants*. [S.l.: s.n.], 1996.
- MARTHO, A. G. *Nota de aula - Propelentes*. [S.l.: s.n.], 2020.
- MCCOY, R. L. *Modern Exterior Ballistics: The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles*. Atglen, PA, USA: Schiffler Military Story, 1998.
- MEYER, R.; HOMBURG, A.; KÖHLER, J. *Explosives*. [S.l.: s.n.], 2007.
- PARSCH, A. *Directory of U.S. Military Rockets and Missiles*. 2009. 06 jul. de 2022. Disponível em: <<https://www.designation-systems.net/dusrm/app4/275in-rockets.html>>.
- STEPHANI, E. C. B. Evolução mísseis brasileiros. *DaCultura*, n. 1, p. 18–29, 2014.

## APÊNDICE A – COEFICIENTES AERODINÂMICOS - PRODAS

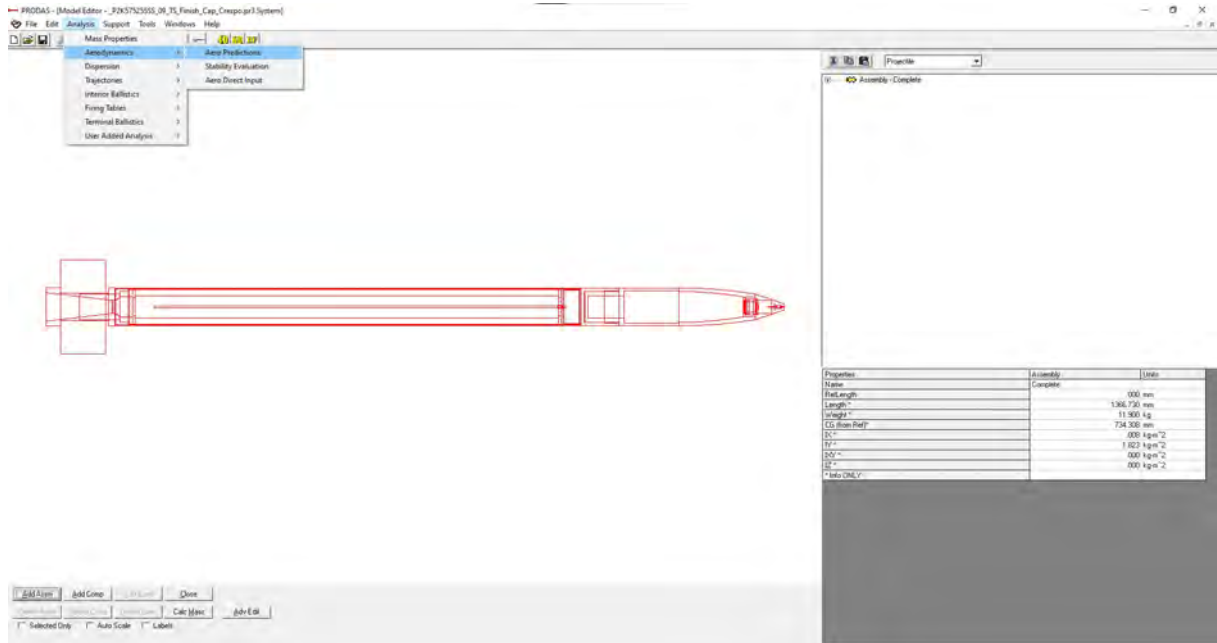


Figura 52 – Extrato tela *PRODAS - Analysis - Aerodynamics*

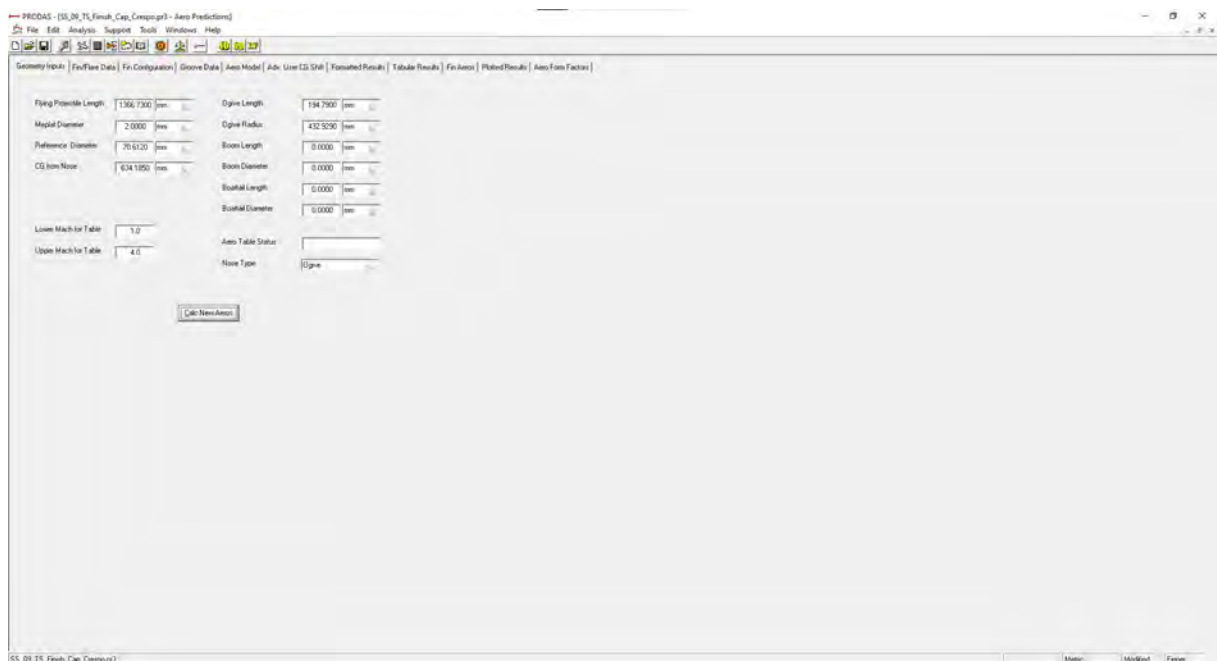


Figura 53 – Aba *Geometry inputs*

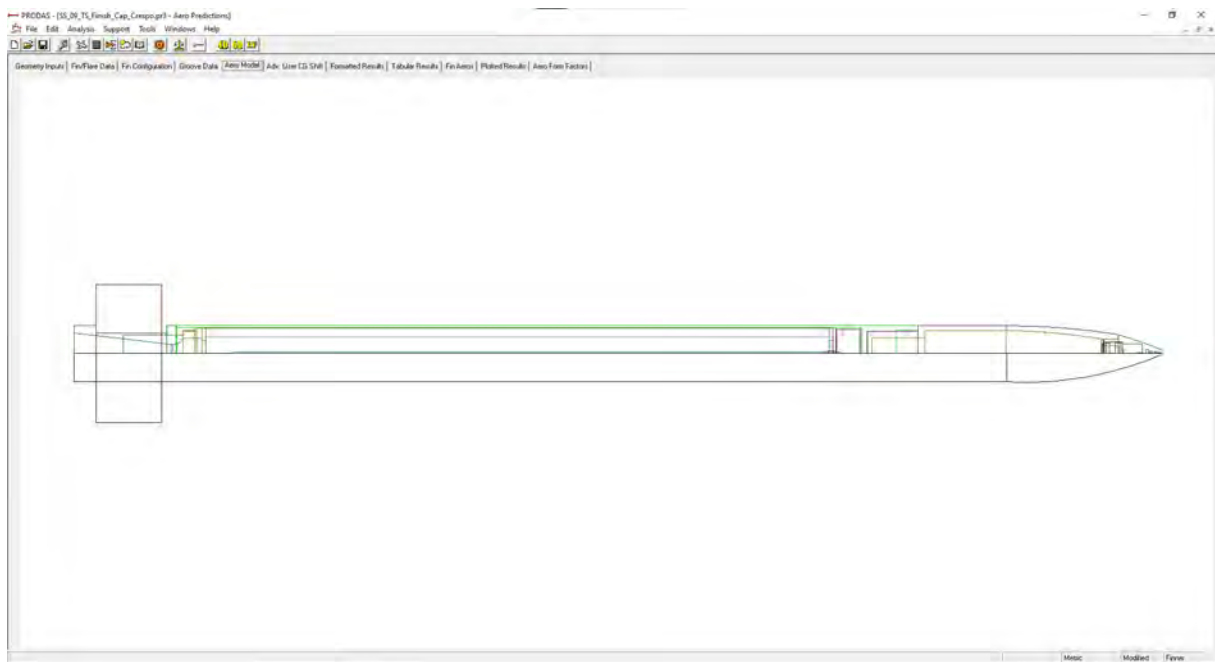


Figura 54 – Aba Aero Model

	Mach	CDP	CD2	CD4	CD6	CD8	CD10	CD12	CD14	CD16	CD18
1.000	0.4178	5.40	0	3.790	0.0	0.01	0.2727	0.0000	250.13		
0.400	0.4190	5.40	0	10.375	0.0	0.00	0.2668	0.0000	279.14		
0.600	0.4198	5.40	0	10.825	0.0	0.00	0.2638	0.0000	289.89		
0.700	0.4203	5.54	0	11.086	0.0	0.00	0.2606	0.0000	304.27		
0.750	0.4211	5.76	0	11.294	0.0	0.00	0.2589	0.0000	311.46		
0.800	0.4218	5.89	0	11.500	0.0	0.00	0.2573	0.0000	318.66		
0.850	0.5001	6.13	0	11.862	0.0	0.00	0.2323	0.0000	321.01		
0.875	0.5152	6.26	0	12.074	0.0	0.00	0.2313	0.0000	327.10		
0.900	0.5384	6.30	0	12.305	0.0	0.00	0.2303	0.0000	343.38		
0.925	0.6662	6.62	0	12.498	0.0	0.00	0.2299	0.0000	349.42		
0.950	0.9529	6.97	0	12.852	0.0	0.00	0.4026	0.0000	355.49		
0.975	0.6763	7.49	0	12.948	0.0	0.00	0.4026	0.0000	361.49		
1.000	0.7995	8.11	0	13.044	0.0	0.00	0.5444	0.0000	367.47		
1.025	0.7999	8.98	0	13.072	0.0	0.00	0.9532	0.0000	377.09		
1.050	0.8932	9.67	0	13.101	0.0	0.00	0.6020	0.0000	386.62		
1.100	0.9139	10.03	0	13.436	0.0	0.00	0.6020	0.0000	436.32		
1.200	0.7921	12.76	0	12.701	0.0	0.00	0.9467	0.0000	378.81		
1.250	0.7454	12.15	0	11.598	0.0	0.00	0.5441	0.0000	340.49		
1.500	0.7945	11.48	0	11.457	0.0	0.00	0.5204	0.0000	322.56		
1.750	0.6706	10.85	0	11.322	0.0	0.00	0.4999	0.0000	312.98		
2.000	0.6191	10.19	0	9.222	0.0	0.00	0.4649	0.0000	286.00		
2.250	0.5960	9.84	0	8.695	0.0	0.00	0.4426	0.0000	271.60		
2.500	0.5970	9.40	0	8.168	0.0	0.00	0.4201	0.0000	177.29		
3.000	0.4860	8.78	0	7.274	0.0	0.00	0.3750	0.0000	146.56		
3.500	0.4801	7.60	0	6.768	0.0	0.00	0.3679	0.0000	120.08		
4.000	0.4762	7.02	0	6.191	0.0	0.00	0.3617	0.0000	109.75		
4.500	0.4738	6.44	0	5.796	0.0	0.00	0.3577	0.0000	89.67		
5.000	0.4343	5.86	0	5.426	0.0	0.00	0.3537	0.0000	77.60		
6.000	0.3940	5.28	0	5.072	0.0	0.00	0.3474	0.0000	65.54		
8.000	0.3715	5.04	0	4.864	0.0	0.00	0.3402	0.0000	62.11		

Figura 55 – Aba Tabular Results

## APÊNDICE B – TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS PARA 4-DOF - PRODAS

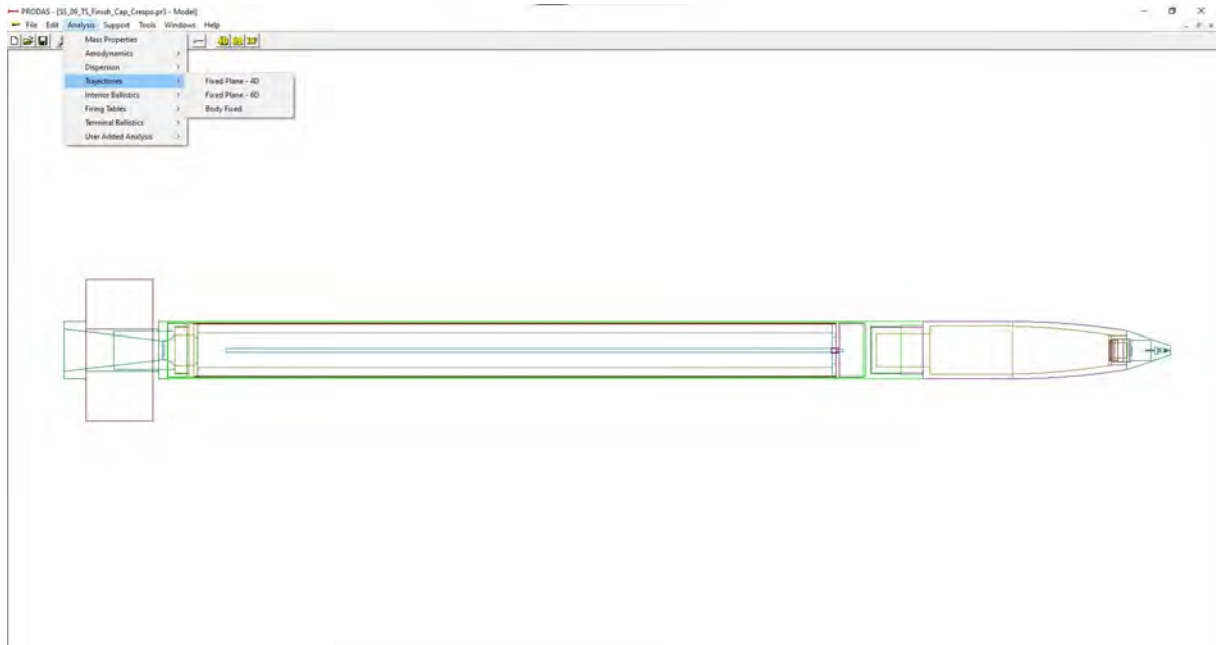


Figura 56 – Extrato tela *PRODAS - Analysis - Trajectories*

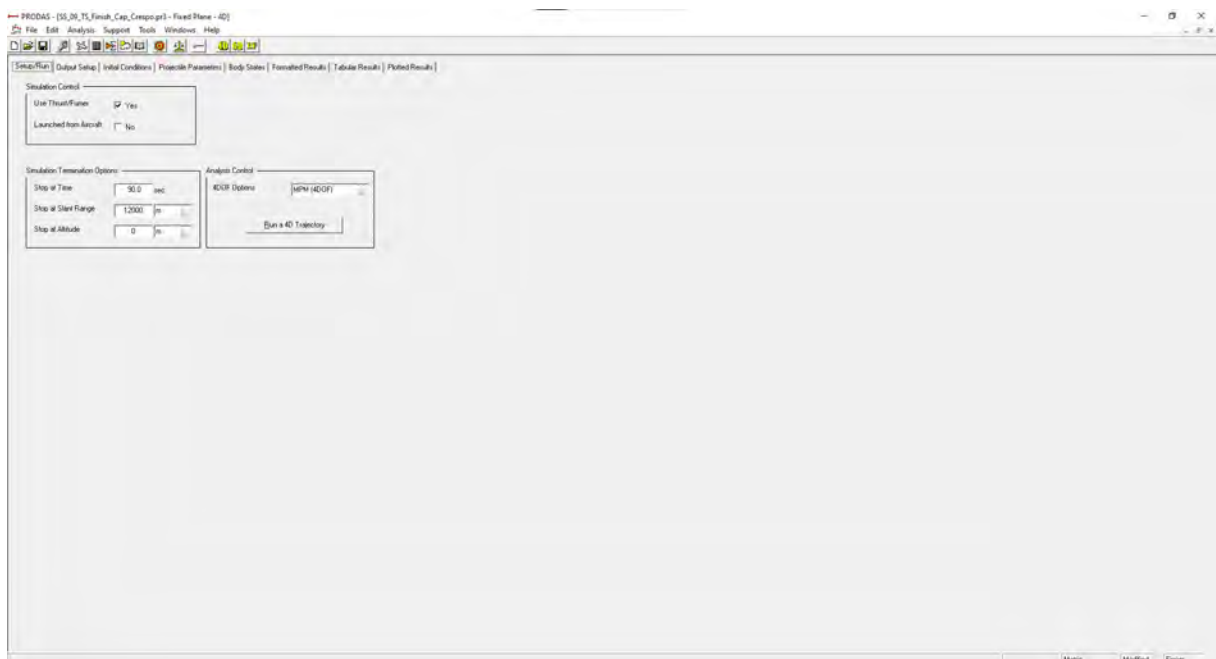


Figura 57 – Aba *Setup/Run*

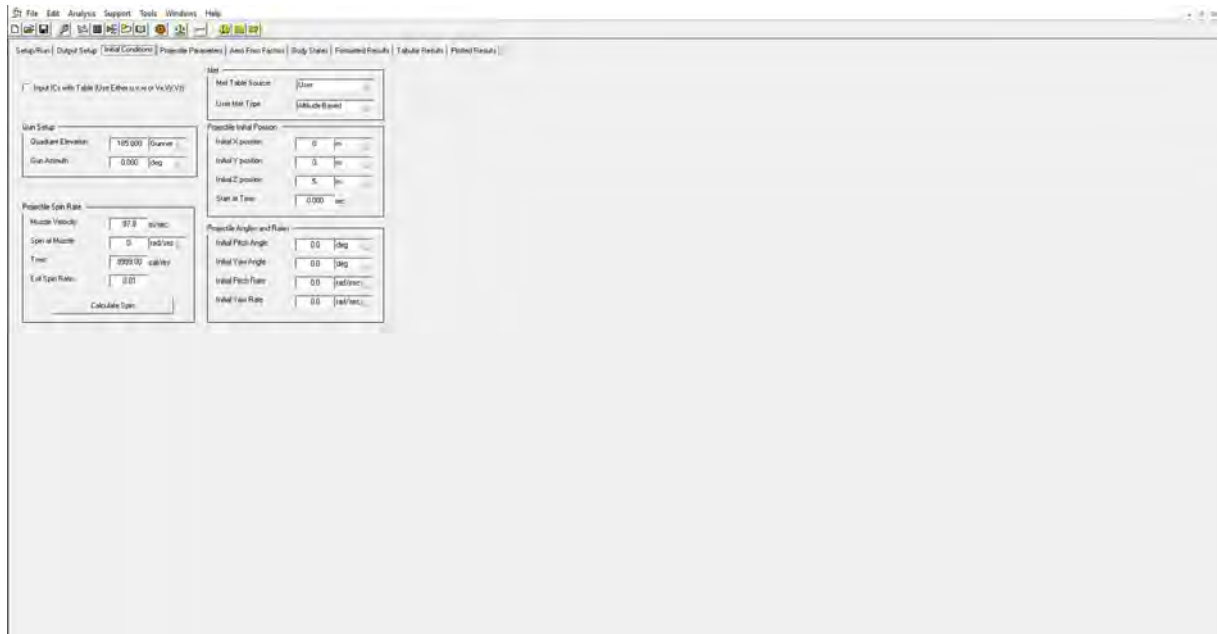


Figura 58 – Aba *Initial Conditions*

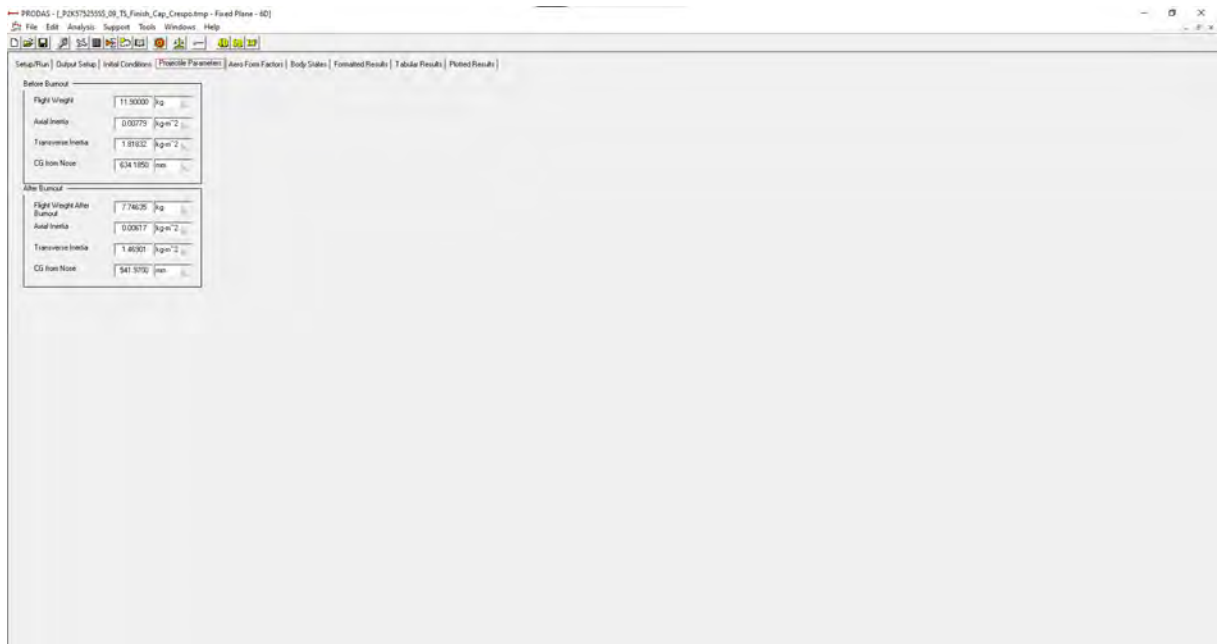


Figura 59 – Aba *Projectile Parameters*

PRODAS - [SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Crespo.pr3 - Fixed Plane - 4D]

File Edit Analysis Support Tools Windows Help

Setup/Run | Output Setup | Initial Conditions | Projectile Parameters | Body States | Formatted Results | Tabular Results | Plotted Results

Units	Time sec	X m	Y m	Z m	Start m	Velocity m/sec	Spin rad/sec	AlphaBar deg	Alpha deg	Beta deg	Mach	Dip milrad	Drift milrad	Gyro	FastFreq deg/m	KineticEner kJoule	SlowFreq deg/m	SpinDegM deg/m	InstAmMag deg	slowAmMag deg	DvDx m/sec/1000
Red-Loch	0.0000	0.00	0.00	10.00	0.00	97.80	0.01	0.04	0.00	0.00	0.295	0.00	0.00	0.00	4.00	56.9	-4.00	0.01	0.029	0.029	-26.801
	0.0000	0.00	0.00	10.00	0.00	97.80	0.01	0.04	0.00	0.00	0.295	0.00	0.00	0.00	4.00	56.9	-4.00	0.01	0.029	0.029	-26.817
	0.4367	59.61	0.00	26.61	100.00	366.42	49.45	0.04	0.00	0.00	1.106	14.74	0.01	0.00	5.60	694.1	-5.57	7.73	0.029	0.029	1936.900
	0.8592	197.37	0.00	42.33	200.00	539.01	123.09	0.04	0.00	0.00	1.627	19.28	0.01	0.00	5.00	1335.1	-4.94	13.08	0.029	0.029	1600.690
	0.8222	296.18	0.00	57.69	300.00	691.75	191.24	0.04	0.00	0.00	2.088	21.96	0.01	0.00	3.99	2002.7	-3.93	15.84	0.029	0.029	1467.190
	0.9541	395.03	0.00	72.86	400.00	809.08	248.69	0.04	0.00	0.00	2.443	23.63	0.01	0.00	3.57	2545.9	-3.50	17.62	0.029	0.029	244.397
	1.0782	493.90	0.01	87.87	500.00	798.82	297.40	0.04	0.00	0.00	2.412	25.25	0.01	0.00	3.64	2471.6	-3.95	21.33	0.029	0.029	-149.132
	1.2045	592.78	0.01	102.73	600.00	783.97	334.89	0.04	0.00	0.00	2.367	26.46	0.01	0.00	3.72	2380.5	-3.62	24.49	0.029	0.029	147.845
	1.3325	691.71	0.01	117.42	700.00	769.26	363.82	0.04	0.00	0.00	2.323	27.55	0.01	0.00	3.80	2282.0	-3.68	27.02	0.029	0.029	-146.513
	1.4646	790.65	0.01	131.97	800.00	754.67	384.06	0.04	0.00	0.00	2.279	28.56	0.01	0.00	3.87	2205.9	-3.75	29.16	0.029	0.029	-145.136
	1.5985	889.61	0.01	146.34	900.00	740.24	398.58	0.04	0.00	0.00	2.235	29.55	0.02	0.00	3.94	2122.3	-3.81	30.85	0.029	0.029	-143.716
	1.7349	988.61	0.02	160.54	1000.00	725.94	408.50	0.04	0.00	0.00	2.192	30.51	0.02	0.00	4.00	2041.1	-3.87	32.24	0.029	0.029	-142.254
	1.8740	1087.62	0.02	174.55	1100.00	711.78	414.45	0.04	0.00	0.00	2.150	31.46	0.02	0.00	4.07	1962.3	-3.93	33.36	0.029	0.029	-140.754
	2.0160	1186.57	0.02	188.37	1200.00	697.79	417.06	0.04	0.00	0.00	2.108	32.43	0.02	0.00	4.13	1885.9	-3.99	34.24	0.029	0.029	-139.219
	2.1606	1285.74	0.03	202.01	1300.00	683.93	417.37	0.04	0.00	0.00	2.066	33.38	0.02	0.00	4.19	1811.7	-4.04	34.96	0.029	0.029	-137.647
	2.3085	1384.85	0.03	215.43	1400.00	670.26	415.49	0.04	0.00	0.00	2.025	34.35	0.02	0.00	4.25	1740.0	-4.10	35.52	0.029	0.029	-136.048
	2.4590	1483.98	0.03	228.65	1500.00	656.72	413.23	0.04	0.00	0.00	1.984	35.34	0.02	0.00	4.36	1670.4	-4.21	35.96	0.029	0.029	-134.452
	2.6131	1583.15	0.04	241.62	1600.00	643.36	407.60	0.04	0.00	0.00	1.944	36.35	0.02	0.00	4.54	1603.2	-4.38	36.30	0.029	0.029	-132.879
	2.7700	1682.34	0.04	254.38	1700.00	630.15	402.03	0.04	0.00	0.00	1.904	37.37	0.03	0.00	4.70	1538.0	-4.55	36.55	0.029	0.029	-131.274
	2.9305	1781.58	0.05	266.89	1800.00	617.10	396.63	0.04	0.00	0.00	1.864	38.42	0.03	0.00	4.86	1475.0	-4.71	36.73	0.029	0.029	-129.641
	3.0943	1880.94	0.05	279.14	1900.00	604.22	388.85	0.04	0.00	0.00	1.825	39.49	0.03	0.00	5.02	1414.0	-4.86	36.85	0.029	0.029	-127.981
	3.2615	1980.14	0.06	291.14	2000.00	591.50	381.27	0.04	0.00	0.00	1.787	40.59	0.03	0.00	5.16	1355.1	-5.01	36.93	0.029	0.029	-126.295
	3.4325	2079.48	0.06	302.85	2100.00	578.95	373.60	0.04	0.00	0.00	1.749	41.72	0.03	0.00	5.30	1298.2	-5.15	36.97	0.029	0.029	-124.591
	3.6072	2178.86	0.07	314.27	2200.00	566.57	365.85	0.04	0.00	0.00	1.712	42.87	0.03	0.00	5.32	1243.3	-5.16	37.00	0.029	0.029	-122.862
	3.7857	2278.27	0.08	325.40	2300.00	554.36	358.12	0.04	0.00	0.00	1.675	44.06	0.03	0.00	5.34	1190.2	-5.18	37.01	0.029	0.029	-121.345
	3.9681	2377.73	0.08	336.22	2400.00	542.29	350.46	0.04	0.00	0.00	1.639	45.28	0.04	0.00	5.35	1139.0	-5.20	37.03	0.029	0.029	-119.883
	4.1546	2477.22	0.09	346.70	2500.00	530.40	342.86	0.04	0.00	0.00	1.603	46.53	0.04	0.00	5.37	1089.6	-5.21	37.04	0.029	0.029	-117.999
	4.3454	2576.76	0.10	356.69	2600.00	518.68	335.35	0.04	0.00	0.00	1.569	47.83	0.04	0.00	5.39	1042.0	-5.23	37.04	0.029	0.029	-116.294
	4.5405	2676.35	0.11	366.61	2700.00	507.13	327.94	0.04	0.00	0.00	1.533	49.16	0.04	0.00	5.40	996.1	-5.24	37.05	0.029	0.029	-114.570
	4.7401	2775.98	0.11	376.01	2800.00	495.75	320.62	0.04	0.00	0.00	1.499	50.53	0.04	0.00	5.42	951.9	-5.26	37.05	0.029	0.029	-112.836
	4.9443	2875.65	0.12	386.01	2900.00	484.54	313.40	0.04	0.00	0.00	1.465	51.95	0.04	0.00	5.48	909.3	-5.32	37.06	0.029	0.029	-111.232
	5.1533	2975.37	0.13	393.60	3000.00	473.48	306.20	0.04	0.00	0.00	1.431	53.40	0.04	0.00	5.53	868.3	-5.38	37.05	0.029	0.029	-109.603
	5.3672	3075.15	0.14	401.76	3100.00	462.60	299.12	0.04	0.00	0.00	1.398	54.91	0.05	0.00	5.59	828.8	-5.43	37.05	0.029	0.029	-107.950
	5.5862	3174.97	0.15	409.45	3200.00	451.87	292.13	0.04	0.00	0.00	1.366	56.47	0.05	0.00	5.64	790.9	-5.48	37.04	0.029	0.029	-106.276
	5.8105	3274.86	0.16	416.67	3300.00	441.32	285.24	0.04	0.00	0.00	1.334	58.08	0.05	0.00	5.70	754.3	-5.54	37.03	0.029	0.029	-104.537
	6.0401	3374.77	0.17	423.39	3400.00	430.94	278.43	0.04	0.00	0.00	1.303	59.74	0.05	0.00	5.77	719.3	-5.61	37.02	0.029	0.029	-102.739
	6.2753	3474.76	0.19	429.59	3500.00	420.73	271.74	0.04	0.00	0.00	1.272	61.45	0.05	0.00	5.83	685.6	-5.68	37.00	0.029	0.029	-100.930
	6.5164	3574.80	0.20	435.22	3600.00	410.71	265.15	0.04	0.00	0.00	1.242	63.23	0.06	0.00	5.90	653.4	-5.74	36.99	0.029	0.029	-99.112
	6.7633	3674.89	0.21	440.29	3700.00	400.87	258.68	0.04	0.00	0.00	1.212	65.06	0.06	0.00	5.95	622.4	-5.80	36.97	0.029	0.029	-97.295
	7.0166	3775.05	0.22	444.73	3800.00	391.20	252.33	0.04	0.00	0.00	1.183	66.97	0.06	0.00	6.03	592.7	-5.87	36.96	0.029	0.029	-95.912
	7.2761	3875.26	0.24	448.95	3900.00	381.63	246.09	0.04	0.00	0.00	1.154	68.94	0.06	0.00	6.10	564.1	-5.95	36.95	0.029	0.029	-94.804
	7.5423	3975.54	0.25	453.09	4000.00	372.18	239.95	0.04	0.00	0.00	1.125	70.96	0.06	0.00	6.18	536.5	-6.02	36.94	0.029	0.029	-93.630
	7.8155	4075.88	0.27	454.09	4100.00	362.84	233.91	0.04	0.00	0.00	1.097	73.09	0.07	0.00	6.23	509.9	-6.08	36.94	0.029	0.029	-92.385
	8.0958	4176.28	0.28	455.77	4200.00	353.63	228.02	0.04	0.00	0.00	1.069	75.29	0.07	0.00	6.15	484.4	-5.99	36.94	0.029	0.029	-91.026
	8.3836	4276.74	0.30	456.65	4300.00	344.59	222.28	0.04	0.00	0.00	1.042	77.56	0.07	0.00	6.05	459.9	-5.90	36.96	0.029	0.029	-87.988
	8.6790	4377.27	0.32	456.70	4400.00	336.07	216.72	0.04	0.00	0.00	1.016	79.93	0.07	0.00	5.94	437.4	-5.79	36.95	0.029	0.029	-81.561
	8.9820	4477.86	0.34	456.86	4500.00	328.19	211.39	0.04	0.00	0.00	0.992	82.38	0.07	0.00	5.86	417.2	-5.70	36.90	0.029	0.029	-74.354
	9.2921	4578.51	0.35	456.11	4600.00	321.16	206.35	0.04	0.00	0.00	0.971	84.93	0.08	0.00	5.81	398.5	-5.66	36.91	0.029	0.029	-65.494
	9.6090	4679.23	0.38	451.39	4700.00	314.96	201.67	0.04	0.00	0.00	0.952	87.57	0.08	0.00	5.78	384.2	-5.62	36.89	0.029	0.029	-57.869
	9.9321	4780.01	0.40	447.66	4800.00	309.33	197.38	0.04	0.00	0.00	0.935	90.32	0.08	0.00	5.74	370.6	-5.69	36.86	0.029	0.029	-54.193
	10.2613	4880.84	0.42	442.90	4900.00	304.01	193.46	0.04	0.00	0.00	0.919	93.16	0.09	0.00	5.71	358.0	-5.65	36.46	0.029	0.029	-51.215
	10.5966	4981.73	0.44	437.03	5000.00	298.98	189.82	0.04	0.00	0.00	0.904	96.11	0.09	0.00	5.67	346.2	-5.62	36.38	0.029	0.029	-48.418
	10.9377	5082.67	0.47	430.05	5100.00	294.20	186.43	0.04	0.00	0.00	0.889	99.17	0.09	0.00	5.64	335.2	-5.49	36.31	0.029	0.029	-45.100

Figura 60 – Aba Tabular Results

## APÊNDICE C – TABELA DE TIRO DO FOGUETE SS-09 TS PARA 4-DOF - PRODAS

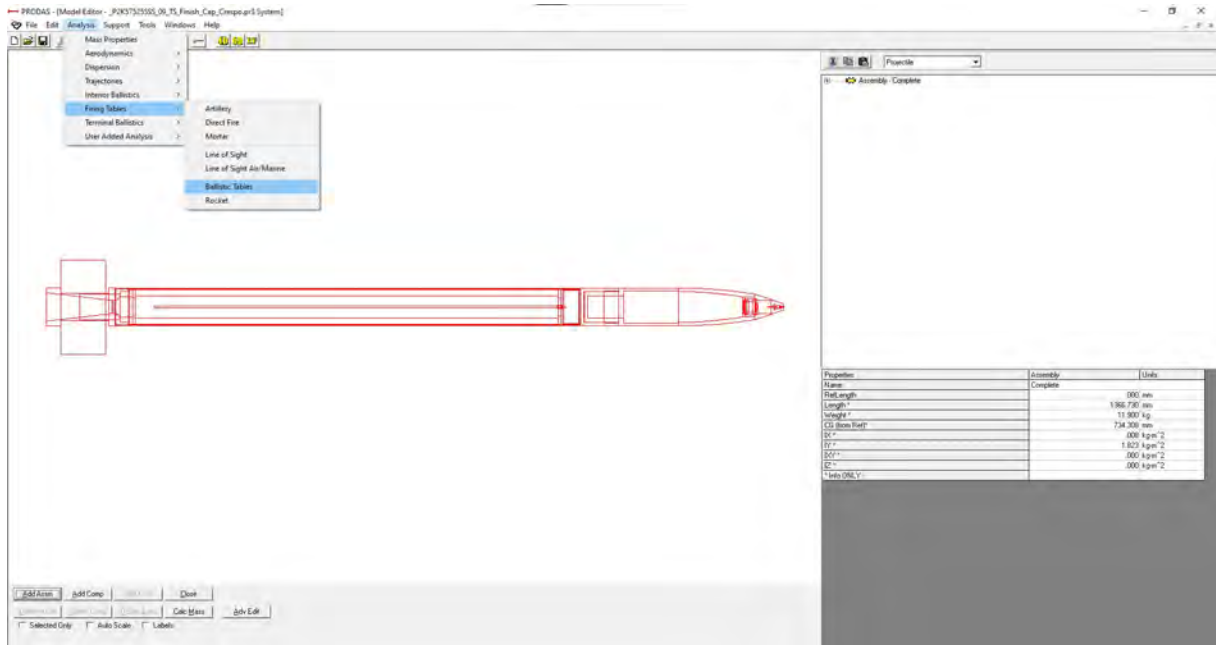


Figura 61 – Extrato tela *PRODAS - Analysis - Ballistic Tables*

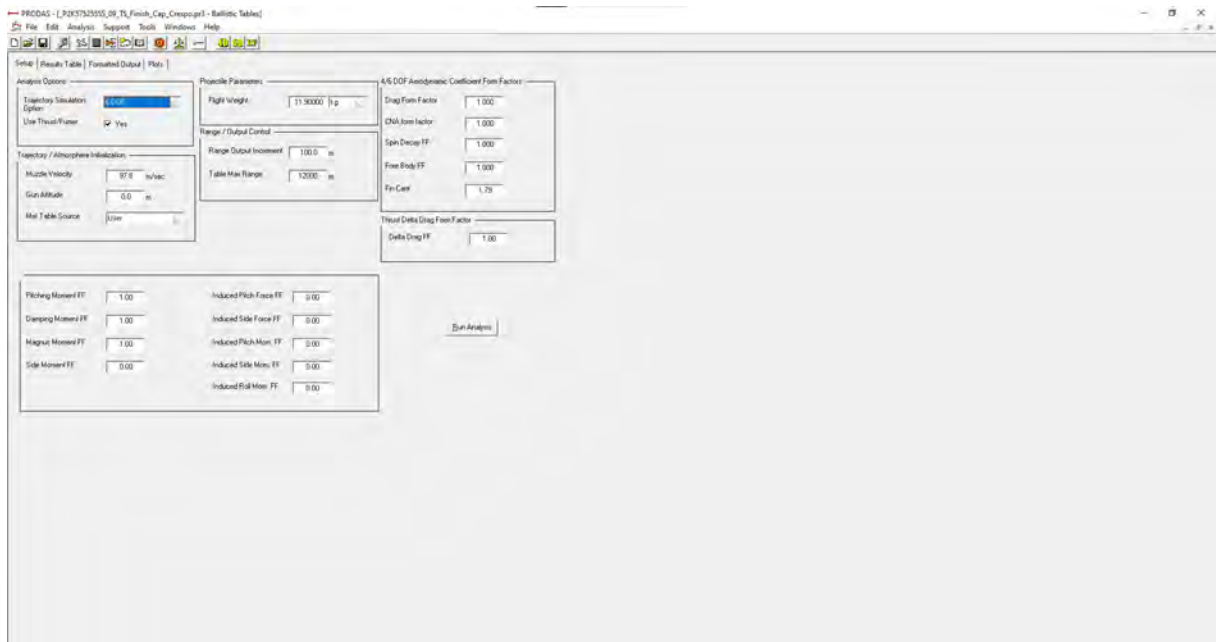


Figura 62 – Aba *Setup*

PRODAS - [\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Crespo.pr3 - Ballistic Tables]

File Edit Analysis Support Tools Windows Help

Setup Results Table Formatted Output Plots

	Range	RemainingV	TimeOfFlight	DE	AngleOfDes	KineticEnerg	Drop	Drift	VertexHeigh	VertexRang
Units	m	m/sec	sec	Gunner Mil	deg	kilojoule	deg	deg	m	m
Red=Lock										
	0.0	95.60	0.0000	0.00	0.00	54.4	0.00	0.00	0.0	0.0
	100.0	364.92	0.4365	15.49	0.37	671.6	0.87	0.00	0.2	40.4
	200.0	536.45	0.6560	20.09	0.39	1320.2	1.13	0.00	0.5	76.8
	300.0	686.61	0.8161	22.83	0.38	2006.0	1.28	0.00	0.7	111.0
	400.0	812.22	0.9598	24.93	0.37	2610.2	1.40	0.00	1.0	148.0
	500.0	801.98	1.0759	26.30	0.37	2491.1	1.46	0.00	1.2	179.6
	600.0	788.61	1.1963	27.49	0.39	2408.7	1.55	0.00	1.4	213.6
	700.0	773.98	1.3314	28.66	0.42	2320.2	1.61	0.00	1.7	255.1
	800.0	759.42	1.4695	29.77	0.46	2233.8	1.67	0.00	2.0	303.5
	900.0	746.67	1.5937	30.71	0.50	2159.3	1.73	0.00	2.3	354.3
	1000.0	732.78	1.7327	31.71	0.55	2079.8	1.78	0.00	2.7	419.2
	1100.0	719.88	1.8653	32.65	0.60	2007.2	1.84	0.00	3.1	480.6
	1200.0	706.41	2.0076	33.64	0.66	1932.8	1.89	0.00	3.6	543.7
	1300.0	693.04	2.1531	34.63	0.72	1860.3	1.95	0.00	4.2	605.9
	1400.0	680.69	2.2913	35.57	0.78	1794.6	2.00	0.00	4.7	663.4
	1500.0	667.70	2.4409	36.57	0.85	1726.7	2.06	0.00	5.4	723.8
	1600.0	654.78	2.5941	37.60	0.92	1660.6	2.11	0.00	6.2	784.1
	1700.0	641.96	2.7509	38.64	1.00	1596.2	2.17	0.00	7.0	844.4
	1800.0	629.25	2.9112	39.71	1.08	1533.6	2.23	0.00	7.9	904.6
	1900.0	618.07	3.0566	40.69	1.15	1479.6	2.29	0.00	8.8	958.4
	2000.0	605.71	3.2222	41.80	1.24	1421.0	2.35	0.00	9.9	1018.3
	2100.0	593.45	3.3918	42.94	1.34	1364.1	2.42	0.00	11.1	1078.5
	2200.0	581.31	3.5654	44.11	1.44	1308.8	2.48	0.00	12.4	1138.9
	2300.0	569.29	3.7430	45.31	1.54	1255.3	2.55	0.00	13.7	1199.6
	2400.0	557.43	3.9242	46.54	1.65	1203.5	2.62	0.00	15.2	1260.6
	2500.0	545.74	4.1090	47.81	1.77	1153.5	2.69	0.00	16.8	1321.6
	2600.0	534.24	4.2973	49.10	1.89	1105.4	2.76	0.00	18.6	1382.7
	2700.0	524.18	4.4674	50.28	2.01	1064.2	2.83	0.00	20.2	1437.0
	2800.0	512.91	4.6646	51.66	2.15	1019.0	2.91	0.00	22.2	1499.0
	2900.0	501.79	4.8663	53.07	2.29	975.2	2.99	0.00	24.3	1561.3
	3000.0	490.83	5.0722	54.52	2.44	933.1	3.07	0.00	26.6	1623.8
	3100.0	480.05	5.2824	56.02	2.60	892.6	3.15	0.00	29.0	1686.5
	3200.0	469.45	5.4966	57.55	2.77	853.6	3.24	0.00	31.6	1749.4
	3300.0	459.06	5.7148	59.13	2.94	816.2	3.33	0.00	34.4	1812.3
	3400.0	449.82	5.9161	60.60	3.11	783.7	3.41	0.00	37.0	1869.4
	3500.0	439.71	6.1448	62.27	3.30	748.9	3.50	0.00	40.1	1933.3
	3600.0	429.77	6.3788	64.00	3.51	715.4	3.60	0.00	43.5	1997.6
	3700.0	420.02	6.6181	65.79	3.72	683.3	3.70	0.00	47.0	2062.2
	3800.0	410.45	6.8623	67.63	3.95	652.5	3.80	0.00	50.8	2126.9
	3900.0	401.02	7.1114	69.52	4.19	622.9	3.91	0.00	54.8	2191.9
	4000.0	392.24	7.3516	71.36	4.42	595.9	4.01	0.00	58.9	2253.4
	4100.0	382.99	7.6134	73.38	4.69	568.1	4.13	0.00	63.4	2319.3
	4200.0	373.86	7.8815	75.47	4.96	541.4	4.25	0.00	68.3	2385.6
	4300.0	364.89	8.1557	77.63	5.26	515.7	4.37	0.00	73.4	2452.2
	4400.0	356.25	8.4358	79.86	5.57	491.5	4.49	0.00	78.8	2519.0
	4500.0	348.46	8.7132	82.09	5.88	470.3	4.62	0.00	84.4	2584.0
	4600.0	341.05	9.0065	84.47	6.22	450.5	4.75	0.00	90.6	2651.6
	4700.0	334.47	9.3057	86.93	6.58	433.3	4.89	0.00	97.1	2719.5
	4800.0	328.64	9.6100	89.47	6.95	418.3	5.03	0.00	104.0	2787.6
	4900.0	323.37	9.9143	92.06	7.32	405.0	5.18	0.00	111.1	2854.8
	5000.0	318.28	10.2294	94.77	7.72	392.4	5.33	0.00	118.8	2923.4
	5100.0	313.44	10.5498	97.58	8.13	380.5	5.49	0.00	127.0	2992.3
	5200.0	308.91	10.8696	100.43	8.54	369.6	5.65	-0.01	135.5	3060.0

Figura 63 – Aba Results Tables



## APÊNDICE D – TRAJETÓRIA DO FOGUETE SS-09 TS PARA 6-DOF

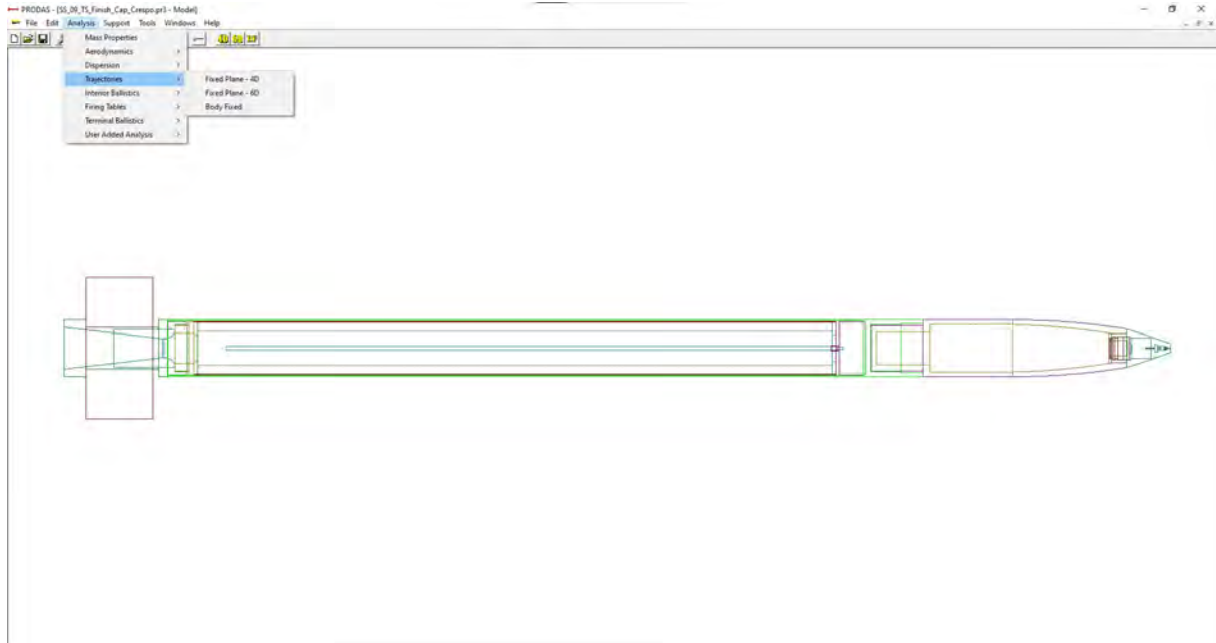


Figura 64 – Extrato tela *PRODAS - Analysis - Trajectories*

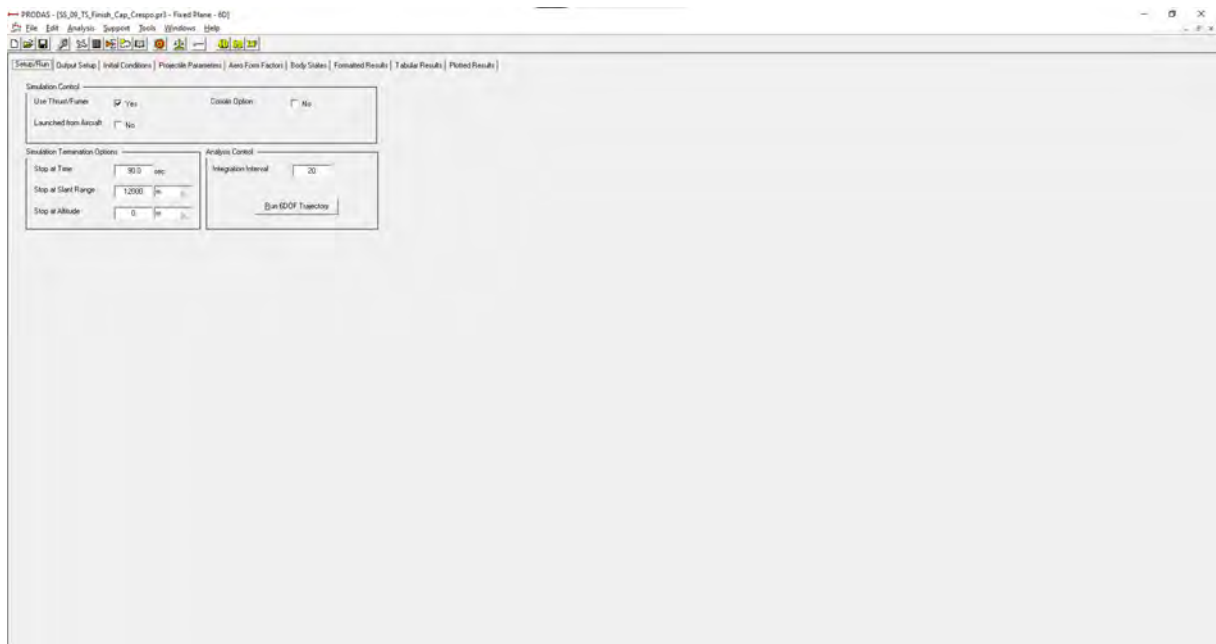


Figura 65 – Aba *Setup/Run*

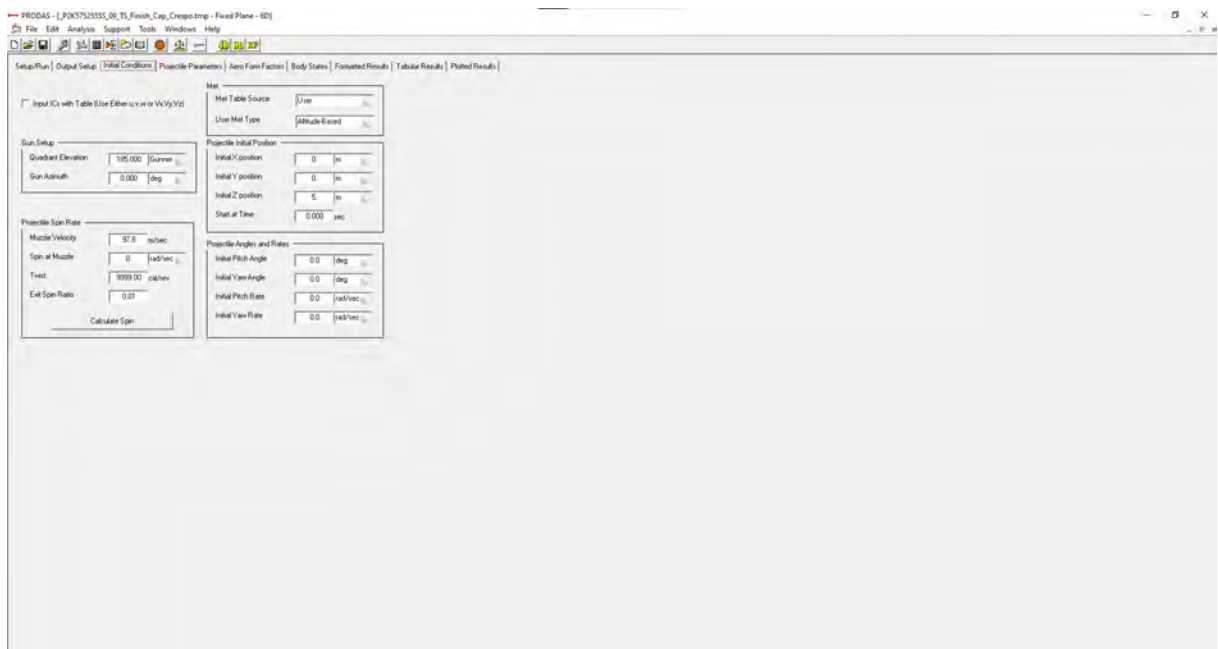


Figura 66 – Aba *Initial Conditions*

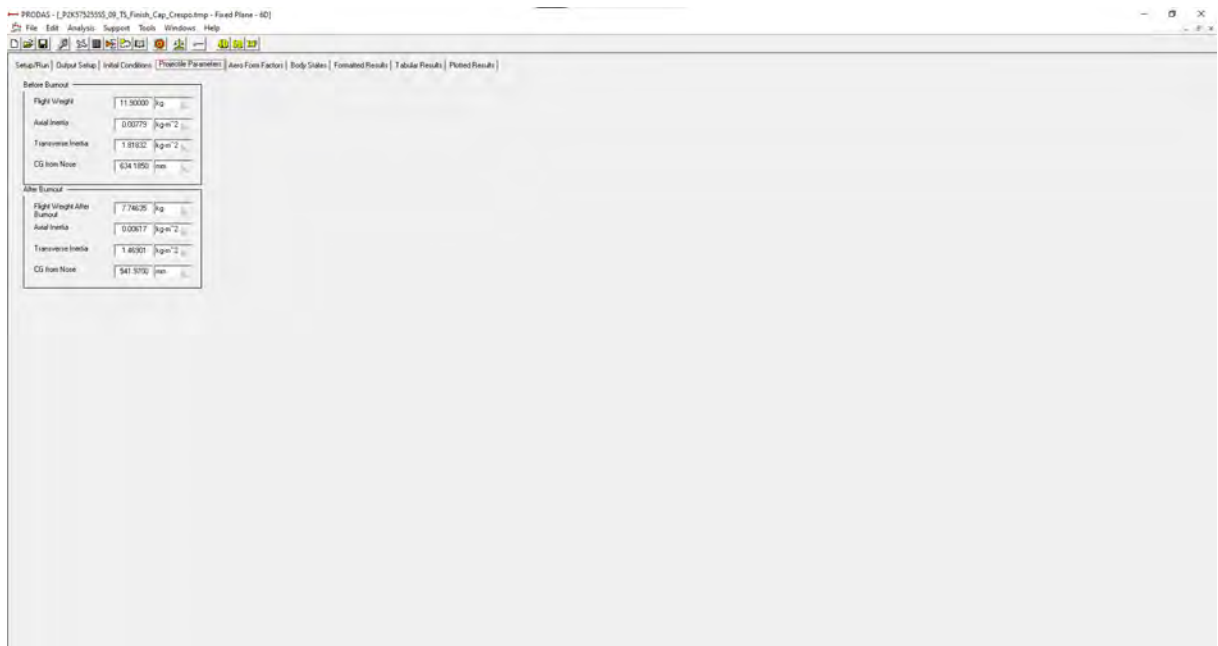


Figura 67 – Aba *Projectile Parameters*

PRODAS - ( POK57525555 08 TS, Finish, Cap, Chesno,mp - Fixed Plane - 6D)

File Edit Analysis Support Tools Windows Help

Simulation Output Setup Initial Conditions Projectile Parameters Aero Form Factors Body States Formatted Results Tabular Results Plotted Results

Units	Time sec	X m	Y m	Z m	Altitude m	Velocity m/sec	Spin rad/sec	AlphaElev deg	AlphaAzim deg	Roll deg	Yaw deg	Pitch deg	Drop m/rad	Drift m/rad	Eyep deg/m	YawRate deg/m	RollRate deg/m	PitchRate deg/m	YawAccel deg	RollAccel deg	PitchAccel deg	Dv/Dx m/sec/1000
Real-Loch	0.0000	0.00	0.00	5.00	0.00	99.90	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.283	0.00	0.00	0.00	3.82	56.9	3.82	0.01	0.000	0.000	-26.077
	0.4366	39.57	0.00	21.90	100.00	356.73	44.20	0.00	0.00	0.00	0.00	1.050	12.03	0.00	0.00	5.36	395.5	-5.23	7.03	0.054	0.050	-1092.246
	0.8899	197.26	0.00	37.93	200.00	329.83	116.44	0.00	-0.02	0.00	1.930	16.42	0.01	0.00	1.82	1336.9	-4.77	12.26	0.052	0.034	1804.610	
	0.8210	296.04	0.00	53.56	300.00	652.94	185.32	0.00	0.00	0.00	2.003	13.05	0.01	0.00	3.94	2003.7	-3.00	15.33	0.001	0.003	1472.200	
	0.8652	294.94	0.00	69.02	400.00	911.55	242.38	0.00	0.00	0.00	2.316	20.89	0.01	0.00	3.06	2662.3	-2.51	17.11	0.002	0.002	263.320	
	1.0769	483.67	0.00	84.33	500.00	802.20	291.05	0.00	0.00	0.00	2.200	22.28	0.01	0.00	3.64	2482.5	-3.85	20.79	0.004	0.004	140.864	
	1.2027	592.51	0.01	99.50	600.00	799.17	303.07	0.00	0.00	0.00	2.200	23.47	0.01	0.00	3.70	2406.1	-3.60	23.92	0.005	0.005	-120.629	
	1.3301	691.36	0.01	114.51	700.00	774.27	308.24	0.00	0.00	0.00	2.240	24.54	0.01	0.00	3.77	2321.9	-3.83	26.51	0.006	0.006	-138.381	
	1.4610	790.36	0.01	129.38	800.00	760.43	301.10	0.00	0.00	0.00	2.200	25.54	0.01	0.00	3.65	2240.1	-3.71	29.64	0.007	0.007	-137.089	
	1.5937	909.19	0.01	144.05	900.00	746.05	295.90	0.00	0.00	0.00	2.151	26.51	0.01	0.00	3.69	2150.4	-3.76	30.30	0.007	0.007	-135.767	
	1.7289	988.14	0.01	158.56	1000.00	733.34	408.99	0.00	0.00	0.00	2.122	27.45	0.01	0.00	3.94	2063.0	-3.81	31.80	0.007	0.008	-134.414	
	1.8654	1067.11	0.02	172.90	1100.00	719.37	414.64	0.00	0.00	0.00	2.084	28.39	0.02	0.00	4.00	2007.2	-3.88	32.35	0.008	0.008	-133.054	
	2.0036	1186.11	0.02	187.05	1200.00	706.73	417.92	0.00	0.00	0.00	2.046	29.32	0.02	0.00	4.05	1934.5	-3.91	33.98	0.008	0.008	-131.627	
	2.1435	1265.14	0.02	201.01	1300.00	693.84	418.25	0.00	0.00	0.00	2.009	30.27	0.02	0.00	4.10	1863.5	-3.96	34.63	0.008	0.008	-130.186	
	2.2850	1364.19	0.03	214.73	1400.00	680.63	419.58	0.00	0.00	0.00	1.971	31.22	0.02	0.00	4.24	1794.6	-4.09	35.23	0.009	0.009	-129.001	
	2.4282	1483.28	0.03	228.33	1500.00	667.39	416.29	0.00	0.00	0.00	1.935	32.18	0.02	0.00	4.38	1727.7	-4.24	35.71	0.009	0.009	-127.289	
	2.5848	1602.40	0.03	241.87	1600.00	655.21	412.65	0.00	0.00	0.00	1.899	33.16	0.02	0.00	4.54	1662.8	-4.39	36.08	0.009	0.009	-125.972	
	2.7447	1691.55	0.04	254.73	1700.00	643.09	407.92	0.00	0.00	0.00	1.862	34.15	0.02	0.00	4.60	1599.0	-4.53	36.37	0.009	0.009	-124.522	
	2.9068	1780.73	0.04	267.68	1800.00	630.30	402.31	0.00	0.00	0.00	1.827	35.17	0.02	0.00	4.82	1538.7	-4.68	36.57	0.009	0.009	-123.040	
	3.0800	1879.95	0.05	280.32	1900.00	618.07	396.12	0.00	0.00	0.00	1.791	36.21	0.02	0.00	4.94	1478.2	-4.79	36.72	0.008	0.008	-121.589	
	3.2295	1979.20	0.05	292.71	2000.00	605.99	389.42	0.00	0.00	0.00	1.757	37.27	0.03	0.00	5.07	1422.3	-4.91	36.82	0.009	0.009	-120.650	
	3.3892	2078.48	0.06	304.84	2100.00	594.05	382.43	0.00	0.00	0.00	1.722	38.35	0.03	0.00	5.10	1368.8	-4.95	36.89	0.009	0.009	-119.607	
	3.5563	2177.91	0.06	316.70	2200.00	582.25	375.20	0.00	0.00	0.00	1.686	39.46	0.03	0.00	5.12	1313.1	-4.95	36.93	0.009	0.010	-117.163	
	3.7389	2277.17	0.07	328.28	2300.00	570.61	368.17	0.00	0.00	0.00	1.650	40.60	0.03	0.00	5.13	1261.1	-4.98	36.97	0.009	0.010	-115.699	
	3.9168	2376.57	0.07	339.56	2400.00	559.11	361.00	0.00	0.00	0.00	1.622	41.77	0.03	0.00	5.15	1210.8	-4.99	36.99	0.010	0.010	-114.216	
	4.0997	2476.01	0.08	350.53	2500.00	547.76	353.66	0.00	0.00	0.00	1.599	42.97	0.03	0.00	5.16	1162.1	-5.01	37.01	0.010	0.011	-112.715	
	4.2823	2575.49	0.08	361.17	2600.00	536.58	346.76	0.00	0.00	0.00	1.587	44.20	0.03	0.00	5.18	1115.1	-5.02	37.02	0.011	0.011	-111.198	
	4.4707	2675.01	0.10	371.45	2700.00	525.51	339.72	0.00	0.00	0.00	1.575	45.47	0.04	0.00	5.19	1069.6	-5.03	37.04	0.011	0.012	-109.667	
	4.6631	2774.50	0.10	381.45	2800.00	514.51	332.75	0.00	0.00	0.00	1.452	46.77	0.04	0.00	5.21	1025.7	-5.06	37.05	0.011	0.012	-108.151	
	4.8596	2874.13	0.11	391.05	2900.00	503.66	325.83	0.00	0.00	0.00	1.462	48.11	0.04	0.00	5.26	983.3	-5.11	37.05	0.012	0.013	-106.728	
	5.0604	2973.95	0.12	400.27	3000.00	493.25	318.95	0.00	0.00	0.00	1.432	49.49	0.04	0.00	5.31	942.3	-5.16	37.05	0.012	0.013	-105.290	
	5.2655	3073.95	0.13	409.09	3100.00	482.73	312.17	0.00	0.00	0.00	1.401	50.90	0.04	0.00	5.36	902.9	-5.20	37.05	0.013	0.013	-103.824	
	5.4751	3173.30	0.14	417.49	3200.00	472.47	305.45	0.00	0.00	0.00	1.371	52.36	0.04	0.00	5.41	864.6	-5.25	37.04	0.013	0.014	-102.345	
	5.6893	3273.10	0.15	425.46	3300.00	462.29	298.02	0.00	0.00	0.00	1.342	53.86	0.04	0.00	5.46	827.8	-5.30	37.04	0.014	0.014	-100.827	
	5.9083	3372.96	0.16	432.98	3400.00	452.28	290.27	0.00	0.00	0.00	1.313	55.41	0.05	0.00	5.52	792.3	-5.36	37.03	0.014	0.015	-99.259	
	6.1325	3472.85	0.17	440.03	3500.00	442.42	282.00	0.00	0.00	0.00	1.285	57.01	0.05	0.00	5.59	758.1	-5.42	37.03	0.015	0.015	-97.642	
	6.3612	3572.82	0.18	446.56	3600.00	432.72	273.43	0.00	0.00	0.00	1.257	58.65	0.05	0.00	5.63	725.2	-5.48	37.00	0.015	0.016	-95.960	
	6.5949	3672.89	0.19	452.58	3700.00	423.18	273.16	0.00	0.00	0.00	1.229	60.36	0.06	0.00	5.69	693.6	-5.53	36.99	0.016	0.016	-94.426	
	6.8348	3772.90	0.20	458.05	3800.00	413.79	268.99	0.00	0.00	0.00	1.202	62.11	0.06	0.00	5.74	663.2	-5.59	36.97	0.016	0.017	-92.908	
	7.0799	3873.02	0.21	462.97	3900.00	404.54	260.99	0.00	0.00	0.00	1.176	63.92	0.06	0.00	5.81	633.9	-5.65	36.96	0.017	0.017	-91.522	
	7.3305	3973.20	0.22	467.28	4000.00	395.38	254.37	0.00	0.00	0.00	1.148	65.80	0.06	0.00	5.87	605.6	-5.72	36.95	0.017	0.018	-90.207	
	7.5872	4073.44	0.24	470.95	4100.00	386.33	249.09	0.00	0.00	0.00	1.122	67.73	0.06	0.00	5.94	578.1	-5.76	36.94	0.018	0.019	-88.979	
	7.8500	4173.73	0.26	473.89	4200.00	377.37	243.20	0.00	0.00	0.00	1.096	69.72	0.06	0.00	5.98	551.6	-5.82	36.94	0.019	0.020	-87.810	
	8.1192	4274.08	0.27	476.32	4300.00	368.93	237.64	0.00	0.00	0.00	1.071	71.76	0.06	0.00	5.90	526.0	-5.75	36.95	0.020	0.021	-87.468	
	8.3950	4374.51	0.29	477.94	4400.00	359.92	232.13	0.00	0.00	0.00	1.045	73.93	0.07	0.00	5.92	501.5	-5.67	36.96	0.021	0.022	-86.283	
	8.6776	4474.93	0.30	478.79	4500.00	351.54	226.75	0.01	0.00	0.00	1.021	76.14	0.07	0.00	5.73	478.6	-5.57	36.96	0.022	0.024	-85.191	
	8.9668	4575.53	0.32	478.84	4600.00	343.80	221.58	0.01	0.00	0.00	0.999	78.43	0.07	0.00	5.64	457.8	-5.48	36.93	0.024	0.025	-84.109	
	9.2625	4676.17	0.34	478.06	4700.00	336.79	216.64	0.01	0.01	0.00	0.979	80.80	0.07	0.00	5.60	439.3	-5.44	36.95	0.025	0.026	-83.099	
	9.5648	4776.80	0.36	476.40	4800.00	330.54	212.00	0.01	0.01	0.00	0.960	83.26	0.07	0.00	5.56	423.2	-5.40	36.78	0.026	0.028	-82.166	
	9.8710	4877.52	0.38	473.04	4900.00	324.92	207.71	0.01	0.01	0.00	0.944	85.79	0.08	0.00	5.53	409.9	-5.37	36.63	0.027	0.029	-81.313	
	10.1847	4978.30	0.40	470.34	5000.00	319.69	204.76	0.01	0.01	0.00	0.928	88.42	0.08	0.00	5.50	399.9	-5.34	36.52	0.028	0.030	-80.500	
	10.5090	5079.14	0.42	466.86	5100.00	314.85	200.10	0.01	0.01	0.00	0.914	91.14	0.08	0.00	5.47	393.5	-5.31	36.44	0.029	0.031	-79.799	
	10.8356	5180.02	0.44	462.37	5200.00	309.99	195.60	0.01	0.01	0.00	0.900	93.94	0.09	0.00	5.44	371.9	-5.29	36.35	0.030	0.032	-79.190	

Figura 68 – Aba Tabular Results

# APÊNDICE E – TABELA DE TIRO DO FOGUETE SS-09 TS PARA 6-DOF - PRODAS

PRODAS - [\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Crespo.pr3 - Ballistic Tables]

File Edit Analysis Support Tools Windows Help

Setup Results Table Formatted Output Plots

	Range	RemainingV	TimeOfFlight	QE	AngleOfDes	KineticEner	Drop	Drift	VertexHeigh	VertexRang
Units	m	m/sec	sec	Gunner Mil	deg	kilojoule	deg	deg	m	m
Red=Lock	0.0	95.60	0.0000	0.00	0.00	54.4	0.00	0.00	0.0	0.0
	100.0	363.86	0.4345	12.51	0.35	868.3	0.70	0.00	0.2	44.6
	200.0	542.05	0.6627	17.19	0.38	1343.8	0.97	0.00	0.5	77.6
	300.0	697.88	0.8274	19.93	0.37	2061.0	1.12	0.00	0.7	117.0
	400.0	811.20	0.9551	21.76	0.36	2610.2	1.22	0.00	1.0	146.2
	500.0	802.17	1.0715	23.13	0.37	2492.3	1.30	0.00	1.2	180.9
	600.0	786.85	1.2096	24.47	0.39	2398.0	1.38	0.00	1.4	217.7
	700.0	774.02	1.3282	25.49	0.42	2320.4	1.43	0.00	1.7	256.1
	800.0	759.57	1.4653	26.58	0.46	2234.6	1.50	0.00	2.0	302.1
	900.0	746.48	1.5928	27.54	0.50	2158.3	1.55	0.00	2.3	356.0
	1000.0	732.67	1.7310	28.54	0.55	2079.2	1.61	0.00	2.7	419.7
	1100.0	719.01	1.8716	29.52	0.60	2002.3	1.66	0.00	3.1	484.5
	1200.0	706.07	2.0085	30.46	0.65	1930.9	1.71	0.00	3.6	545.1
	1300.0	692.80	2.1529	31.45	0.71	1859.0	1.77	0.00	4.1	606.8
	1400.0	679.70	2.2998	32.43	0.78	1789.4	1.82	0.00	4.8	667.7
	1500.0	667.02	2.4460	33.41	0.84	1723.3	1.88	0.00	5.4	726.5
	1600.0	654.17	2.5987	34.43	0.92	1657.5	1.94	0.00	6.2	786.4
	1700.0	641.92	2.7486	35.42	0.99	1596.0	1.99	0.00	7.0	843.9
	1800.0	629.40	2.9065	36.47	1.07	1534.3	2.05	0.00	7.9	903.2
	1900.0	616.96	3.0684	37.55	1.15	1474.3	2.11	0.00	8.9	962.9
	2000.0	604.64	3.2340	38.66	1.24	1416.0	2.17	0.00	9.9	1022.6
	2100.0	592.44	3.4033	39.79	1.34	1359.4	2.24	0.00	11.1	1082.7
	2200.0	581.36	3.5618	40.85	1.43	1309.1	2.30	0.00	12.3	1137.9
	2300.0	569.47	3.7375	42.04	1.53	1256.0	2.36	0.00	13.6	1198.0
	2400.0	557.67	3.9176	43.26	1.64	1204.6	2.43	0.00	15.1	1258.3
	2500.0	546.01	4.1019	44.52	1.76	1154.7	2.50	0.00	16.7	1319.4
	2600.0	534.49	4.2903	45.81	1.88	1106.5	2.58	0.00	18.4	1380.6
	2700.0	523.13	4.4827	47.13	2.01	1060.0	2.65	0.00	20.2	1441.9
	2800.0	511.95	4.6790	48.50	2.15	1015.1	2.73	0.00	22.2	1503.3
	2900.0	500.95	4.8790	49.89	2.29	972.0	2.81	0.00	24.3	1565.0
	3000.0	491.03	5.0656	51.21	2.43	933.9	2.88	0.00	26.4	1621.5
	3100.0	480.23	5.2758	52.70	2.58	893.2	2.96	0.00	28.8	1684.3
	3200.0	469.60	5.4907	54.23	2.75	854.1	3.05	0.00	31.4	1747.5
	3300.0	459.15	5.7101	55.81	2.93	816.5	3.14	0.00	34.1	1810.7
	3400.0	448.89	5.9339	57.43	3.11	780.5	3.23	0.00	37.1	1874.3
	3500.0	438.85	6.1619	59.10	3.30	745.9	3.32	0.00	40.2	1937.9
	3600.0	429.78	6.3758	60.68	3.49	715.4	3.41	0.00	43.2	1996.6
	3700.0	420.02	6.6149	62.45	3.70	683.3	3.51	0.00	46.8	2061.0
	3800.0	410.43	6.8597	64.29	3.93	652.5	3.62	0.00	50.6	2125.9
	3900.0	400.96	7.1100	66.18	4.17	622.7	3.72	0.00	54.6	2191.1
	4000.0	391.62	7.3656	68.13	4.42	594.0	3.83	0.00	58.9	2256.6
	4100.0	382.88	7.6133	70.04	4.67	567.8	3.94	0.00	63.1	2318.8
	4200.0	373.77	7.8811	72.12	4.94	541.1	4.06	0.00	68.0	2385.4
	4300.0	364.78	8.1557	74.28	5.24	515.4	4.18	0.00	73.1	2452.0
	4400.0	356.13	8.4367	76.50	5.55	491.2	4.30	0.00	78.5	2518.9
	4500.0	348.09	8.7238	78.80	5.87	469.3	4.43	0.00	84.3	2586.1
	4600.0	340.91	9.0092	81.11	6.20	450.1	4.56	0.00	90.2	2651.8
	4700.0	334.35	9.3084	83.57	6.56	433.0	4.70	0.00	96.7	2719.7
	4800.0	328.53	9.6131	86.10	6.93	418.0	4.84	0.00	103.6	2788.0
	4900.0	323.17	9.9228	88.72	7.31	404.5	4.99	0.00	110.9	2856.2
	5000.0	318.15	10.2336	91.40	7.69	392.0	5.14	0.00	118.5	2924.0
	5100.0	313.32	10.5538	94.19	8.10	380.2	5.30	0.00	126.6	2992.7
	5200.0	308.72	10.8793	97.08	8.52	369.1	5.46	0.00	135.2	3062.1

Figura 69 – Aba Results Tables

# ANEXO A – FORMATTED RESULTS - COEFICIENTES AERODINÂMICOS - PRODAS

{LANDSCAPE}

SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Crespo.pr3 - 0  
07/12/2022 16:10  
Finner2000 Version 3.0.0

## PROJECTILE BASIC PARAMETERS

	mm	Caliber
Reference Diameter	70.61	1.000
Reference CG	634.18	8.981
Total Length w/fins	1366.73	19.355
Body Length wo/fins	1366.73	19.355
Ogive Length	194.79	2.759
Ogive Radius	432.9	6.1
Meplat Diameter	2.00	0.028
Boattail Length	0.00	0.000
Boattail Diameter	0.00	0.000
Boom Length	0.00	0.000
Boom Diameter	0.00	0.000

	mm	Band or Thread/Groove Set		
		1	2	3
Thread (Band) Length	5.207	0.000	0.000	0.000
Thread (Band) Major Dia	0.000	0.000	0.000	0.000
Thread Minor Diameter	0.000	0.000	0.000	0.000
Thread Pitch Diameter	59.284	0.000	0.000	0.000
Thread Pitch	0.000	0.000	0.000	0.000
Dist Lead Thread (Band)	1264.980	0.000	0.000	0.000

		Fin Set		
		1	2	3
Fin Type	Rect			
Wrap-Around Fins	Yes			
T-Pads on Fin Tips	No			
Number of Fin Blades	3	0	0	
Fin Cant Angle	deg 1.00	0.00	0.00	0.00
Fin Root Chord	mm 82.296	0.000	0.000	0.000
Fin Tip Chord	mm 82.296	0.000	0.000	0.000
Fin Span	mm 173.533	0.000	0.000	0.000
Fin Mid Cord Thickness	mm 2.388	0.000	0.000	0.000
Fin Leading Edge Thickness	mm 0.254	0.000	0.000	0.000
Fin Lead Taper Length	mm 12.954	0.000	0.000	0.000
Fin Lead Cant Angle	deg 10.000	0.000	0.000	0.000
Fin Trailing Edge Thickness	mm 2.388	0.000	0.000	0.000
Fin Trailing Taper Length	mm 0.000	0.000	0.000	0.000
Fin Trailing Cant Angle	deg 0.000	0.000	0.000	0.000
Proj. Dia. at Fin Root	mm 50.800	0.000	0.000	0.000
Dist. Fin Lead Edge fm Nose	mm 1256.800	0.000	0.000	0.000

Stages	Fin Usage/Cant Matrix	Fin Set			Total Cant
		1	2	3	
1	Baseline Yes	No	No	No	1.787
2	No	No	No	No	0.000
3	No	No	No	No	0.000
Apparant Fin Cant	deg 1.787	0.000	0.000	0.000	

## Aerodynamic (Form) Factors

Axial Force	1.00	Pitch Moment	1.00
Forebody Drag (Burn On)	1.00	Damping Moment	1.00
Normal Force	1.00	Magnus Moment	1.00
Induced Side Force	0.00	Induced Side Moment	0.00
Induced Pitch Force	0.00	Induced Pitch Moment	0.00
Induced Roll Moment	0.00	Side Moment due to pitch	0.00
Roll Damping Moment	1.00	Trim Angle (degrees)	0.00

{NEWPAGE}

Figura 70 – Aba *Formatted Results*

SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Crespo.pr3 - 0  
07/12/2022 16:10  
Finner2000 Version 3.0.0

Aerodynamic Coefficients (with form factors applied) for Baseline Stage 1  
Fin Set(s) Included 1: Yes 2: No 3: No

Mach	CX0	CX2	CX4	CNa	CNa3	CPN	CYpa	CXfore	CXbase	CNq
1.000	0.759	8.11	0.0	13.04	0.0	14.46	0.00	0.544	0.214	367.5
1.025	0.796	8.86	0.0	13.07	0.0	14.70	0.00	0.583	0.213	377.0
1.050	0.833	9.61	0.0	13.10	0.0	14.93	0.00	0.622	0.211	386.6
1.100	0.814	10.83	0.0	13.44	0.0	15.12	0.00	0.603	0.211	406.3
1.200	0.773	12.76	0.0	12.70	0.0	14.90	0.00	0.566	0.207	378.8
1.350	0.745	12.13	0.0	11.94	0.0	14.54	0.00	0.544	0.201	346.5
1.500	0.714	11.48	0.0	11.46	0.0	14.17	0.00	0.520	0.194	322.6
1.750	0.671	10.85	0.0	11.33	0.0	13.91	0.00	0.490	0.181	312.9
2.000	0.631	10.19	0.0	9.22	0.0	12.61	0.00	0.465	0.166	226.0
2.250	0.594	9.84	0.0	8.70	0.0	12.01	0.00	0.442	0.152	201.7
2.500	0.557	9.48	0.0	8.17	0.0	11.34	0.00	0.420	0.137	177.3
3.000	0.485	8.19	0.0	7.37	0.0	10.36	0.00	0.374	0.111	145.6
3.500	0.460	7.60	0.0	6.77	0.0	9.72	0.00	0.368	0.092	123.7
4.000	0.435	7.02	0.0	6.16	0.0	8.97	0.00	0.362	0.073	101.8

Moments at Baseline CG = 8.98 Calibers from the Nose

Mach	Cma	Cma3	Cma5	Cmq	Cmq2	Cnpa@1	Cnpa@3	Cnpa@5	Clp	Cld
1.000	-71.5	0.0	0.0	-2243.9	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.8	0.057
1.025	-74.7	0.0	0.0	-2299.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.8	0.058
1.050	-78.0	0.0	0.0	-2355.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.9	0.059
1.100	-82.5	0.0	0.0	-2491.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.0	0.061
1.200	-75.1	0.0	0.0	-2396.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.7	0.056
1.350	-66.3	0.0	0.0	-2288.7	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.2	0.051
1.500	-59.4	0.0	0.0	-2223.6	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.9	0.047
1.750	-55.9	0.0	0.0	-2206.6	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.8	0.046
2.000	-33.4	0.0	0.0	-1838.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.8	0.033
2.250	-26.4	0.0	0.0	-1740.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.5	0.030
2.500	-19.3	0.0	0.0	-1641.8	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.2	0.026
3.000	-10.1	0.0	0.0	-1497.9	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.8	0.021
3.500	-5.0	0.0	0.0	-1384.4	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.6	0.018
4.000	0.1	0.0	0.0	-1270.8	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.3	0.015

The Effective Fin Cant is 1.79 degrees

Figura 71 – Aba *Formatted Results* - continuação

SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Crespo.pr3 - 0  
07/12/2022 16:10  
Finner2000 Version 3.0.0

Aerodynamic Coefficients (with form factors applied) for Baseline Stage 1  
Fin Set(s) Included 1: Yes 2: No 3: No

Mach	CYga	CZga	Clga	Cmga	Cnga	Csm	Czd	Cmd
1.000	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
1.025	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
1.050	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
1.100	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
1.200	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
1.350	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
1.500	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
1.750	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
2.000	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
2.250	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
2.500	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
3.000	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
3.500	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00
4.000	0.000	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00

Fin Set Component Aerodynamic Coefficients (without form factors)  
The Baseline Stage (1) includes Fin Sets 1: Yes 2: No 3: No

Mach	Cxbody	Cxgrv	Cxfin1	Cxfin2	Cxfin3	CNaB	CPNB	CNaF1	CPNF1	CNaF2	CPNF2	CNaF3	CPNF3
1.000	0.528	0.012	0.218	0.000	0.000	2.91	2.86	10.13	17.80	0.00	0.00	0.00	0.00
1.025	0.565	0.012	0.218	0.000	0.000	2.79	2.91	10.28	17.90	0.00	0.00	0.00	0.00
1.050	0.602	0.012	0.219	0.000	0.000	2.67	2.96	10.43	18.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.100	0.601	0.012	0.200	0.000	0.000	2.71	2.92	10.73	18.20	0.00	0.00	0.00	0.00
1.200	0.586	0.012	0.175	0.000	0.000	2.79	2.86	9.91	18.29	0.00	0.00	0.00	0.00
1.350	0.575	0.012	0.158	0.000	0.000	2.92	2.80	9.01	18.34	0.00	0.00	0.00	0.00
1.500	0.558	0.012	0.145	0.000	0.000	3.07	2.75	8.38	18.35	0.00	0.00	0.00	0.00
1.750	0.531	0.012	0.128	0.000	0.000	3.20	2.64	8.13	18.35	0.00	0.00	0.00	0.00
2.000	0.502	0.012	0.117	0.000	0.000	3.36	2.54	5.87	18.36	0.00	0.00	0.00	0.00
2.250	0.474	0.012	0.108	0.000	0.000	3.46	2.41	5.23	18.36	0.00	0.00	0.00	0.00
2.500	0.446	0.012	0.099	0.000	0.000	3.56	2.28	4.60	18.36	0.00	0.00	0.00	0.00
3.000	0.387	0.012	0.086	0.000	0.000	3.60	1.95	3.77	18.37	0.00	0.00	0.00	0.00
3.500	0.368	0.012	0.080	0.000	0.000	3.56	1.94	3.21	18.37	0.00	0.00	0.00	0.00
4.000	0.349	0.012	0.074	0.000	0.000	3.52	1.92	2.64	18.37	0.00	0.00	0.00	0.00

{NEWPAGE}

SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Crespo.pr3 - 0  
07/12/2022 16:10  
Finner2000 Version 3.0.0

Expressed in CD and CL Convention  
(CX And CN Force Coeffs repeated for convenience)

Aerodynamic Coefficients (with form factors applied) for Baseline Stage 1  
Fin Set(s) Included 1: Yes 2: No 3: No

Mach	CDo	CD2	CLa	CLa3	CXo	CX2	CNa	CNa3
1.00	0.759	21.16	12.29	-8.11	0.759	8.11	13.04	0.00
1.02	0.796	21.94	12.28	-8.86	0.796	8.86	13.07	0.00
1.05	0.833	22.71	12.27	-9.61	0.833	9.61	13.10	0.00
1.10	0.814	24.27	12.62	-10.83	0.814	10.83	13.44	0.00
1.20	0.773	25.46	11.93	-12.76	0.773	12.76	12.70	0.00
1.35	0.745	24.06	11.19	-12.13	0.745	12.13	11.94	0.00
1.50	0.714	22.93	10.74	-11.48	0.714	11.48	11.46	0.00
1.75	0.671	22.18	10.66	-10.85	0.671	10.85	11.33	0.00
2.00	0.631	19.41	8.59	-10.19	0.631	10.19	9.22	0.00
2.25	0.594	18.53	8.10	-9.84	0.594	9.84	8.70	0.00
2.50	0.557	17.65	7.61	-9.48	0.557	9.48	8.17	0.00
3.00	0.485	15.57	6.89	-8.19	0.485	8.19	7.37	0.00
3.50	0.460	14.37	6.31	-7.60	0.460	7.60	6.77	0.00

Figura 72 – Aba Formatted Results - continuação

SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Crespo.pr3 - 0  
07/12/2022 16:10  
Finner2000 Version 3.0.0

Stage 1 has 1 sets of fins deployed  
Fin Set(s) Included 1: Yes 2: No 3: No

Aerodynamic Force Coefficients (with form factors applied)										
Mach	CX	CX2	CZa	CPZ	CYb	CPY	CYpa	CZd	CXf	CXb
1.00	0.759	8.11	13.04	14.46	13.04	14.46	0.00	0.000	0.544	0.214
1.02	0.796	8.86	13.07	14.70	13.07	14.70	0.00	0.000	0.583	0.213
1.05	0.833	9.61	13.10	14.93	13.10	14.93	0.00	0.000	0.622	0.211
1.10	0.814	10.83	13.44	15.12	13.44	15.12	0.00	0.000	0.603	0.211
1.20	0.773	12.76	12.70	14.90	12.70	14.90	0.00	0.000	0.566	0.207
1.35	0.745	12.13	11.94	14.54	11.94	14.54	0.00	0.000	0.544	0.201
1.50	0.714	11.48	11.46	14.17	11.46	14.17	0.00	0.000	0.520	0.194
1.75	0.671	10.85	11.33	13.91	11.33	13.91	0.00	0.000	0.490	0.181
2.00	0.631	10.19	9.22	12.61	9.22	12.61	0.00	0.000	0.465	0.166
2.25	0.594	9.84	8.70	12.01	8.70	12.01	0.00	0.000	0.442	0.152
2.50	0.557	9.48	8.17	11.34	8.17	11.34	0.00	0.000	0.420	0.137
3.00	0.485	8.19	7.37	10.36	7.37	10.36	0.00	0.000	0.374	0.111
3.50	0.460	7.60	6.77	9.72	6.77	9.72	0.00	0.000	0.368	0.092
4.00	0.435	7.02	6.16	8.97	6.16	8.97	0.00	0.000	0.362	0.073

Aerodynamic Moment Coefficients (with form factors applied)											
Mach	Cma	Cnb	Cmq	Cnr	Cnpa@1	Cnpa@2	Cnpa@5	Cnpa@10	Cmd	Clp	Cld
1.00	-71.49	-71.49	-2243.9	-2243.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-4.753	0.0573
1.02	-74.72	-74.72	-2299.5	-2299.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-4.821	0.0581
1.05	-77.97	-77.97	-2355.0	-2355.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-4.890	0.0590
1.10	-82.49	-82.49	-2491.0	-2491.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-5.027	0.0607
1.20	-75.14	-75.14	-2396.2	-2396.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-4.651	0.0560
1.35	-66.29	-66.29	-2288.7	-2288.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-4.236	0.0510
1.50	-59.41	-59.41	-2223.6	-2223.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-3.942	0.0474
1.75	-55.87	-55.87	-2206.6	-2206.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-3.817	0.0460
2.00	-33.42	-33.42	-1838.2	-1838.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-2.772	0.0332
2.25	-26.36	-26.36	-1740.0	-1740.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-2.483	0.0296
2.50	-19.28	-19.28	-1641.8	-1641.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-2.193	0.0260
3.00	-10.15	-10.15	-1497.9	-1497.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-1.813	0.0214
3.50	-5.03	-5.03	-1384.4	-1384.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-1.552	0.0181
4.00	0.09	0.09	-1270.8	-1270.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-1.292	0.0149

Figura 73 – Aba *Formatted Results* - continuação



## ANEXO B – PLOTTED RESULTS - PRODAS

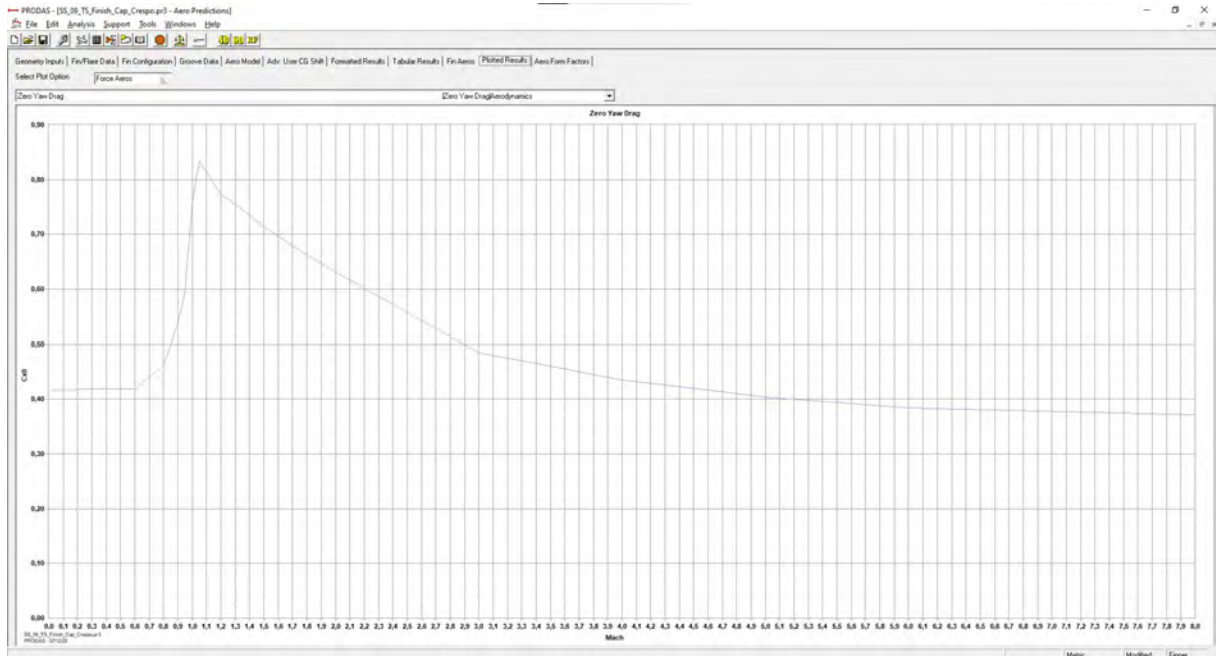


Figura 74 – *Aba Plotted Results - Zero Yaw Drag Aerodynamics*

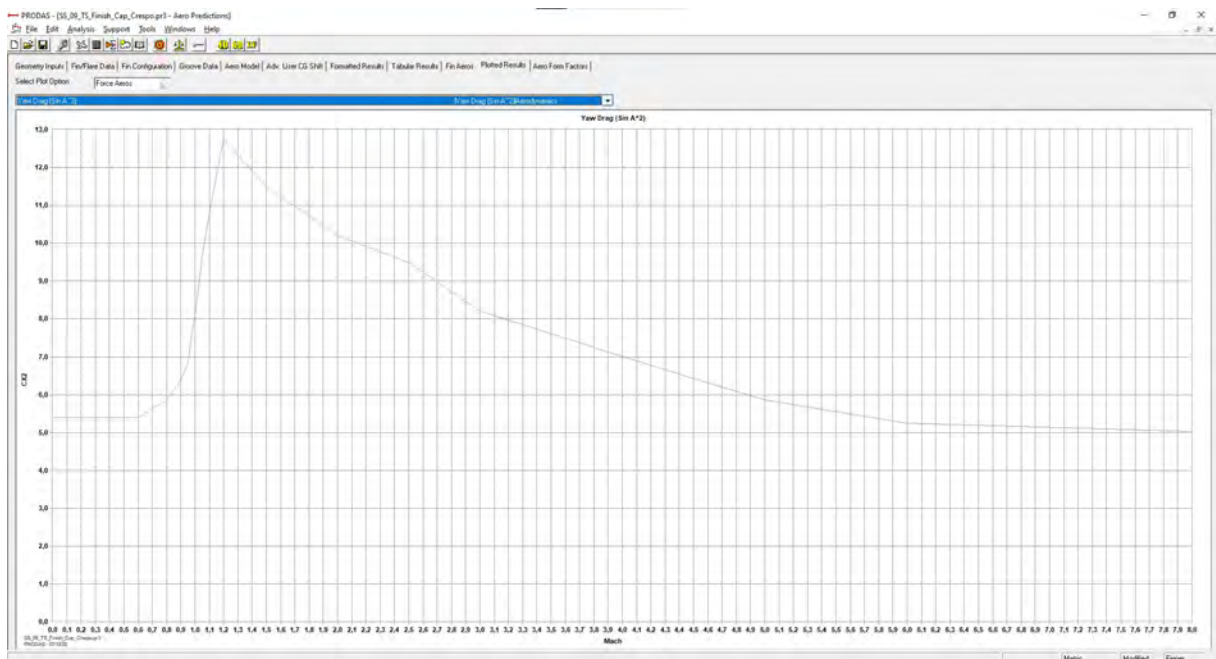


Figura 75 – *Aba Plotted Results - Zero Yaw Drag ( $\sin^2 A$ ) Aerodynamics*

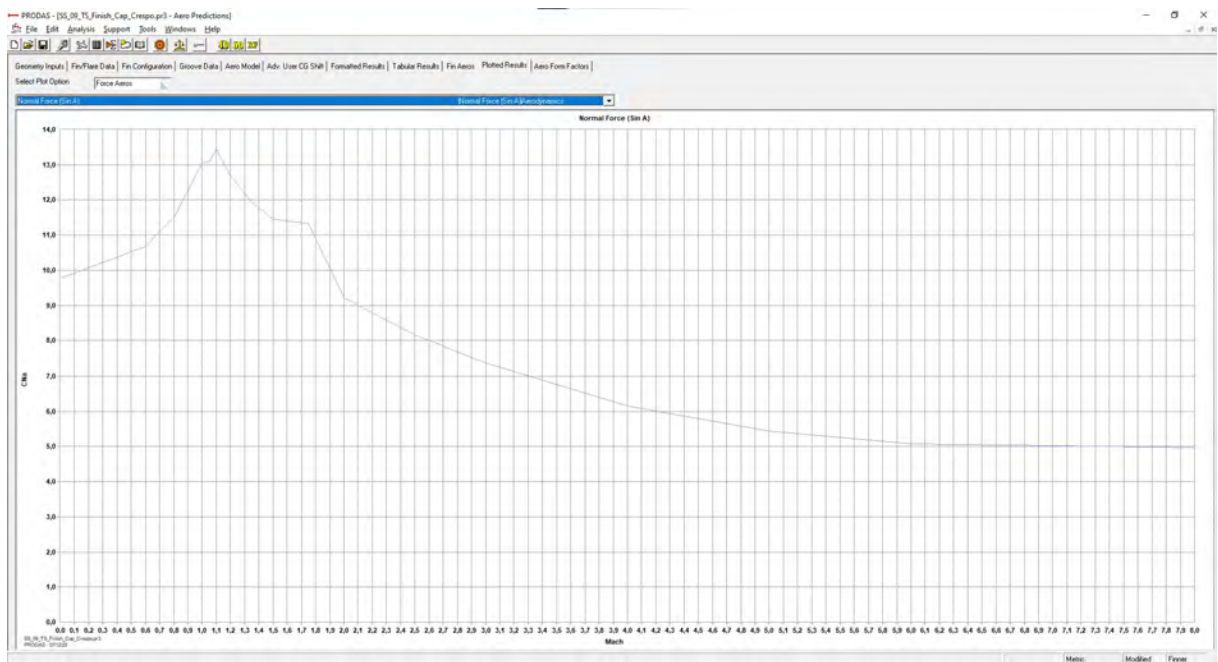


Figura 76 – Aba *Plotted Results* - Normal Force Aerodynamics

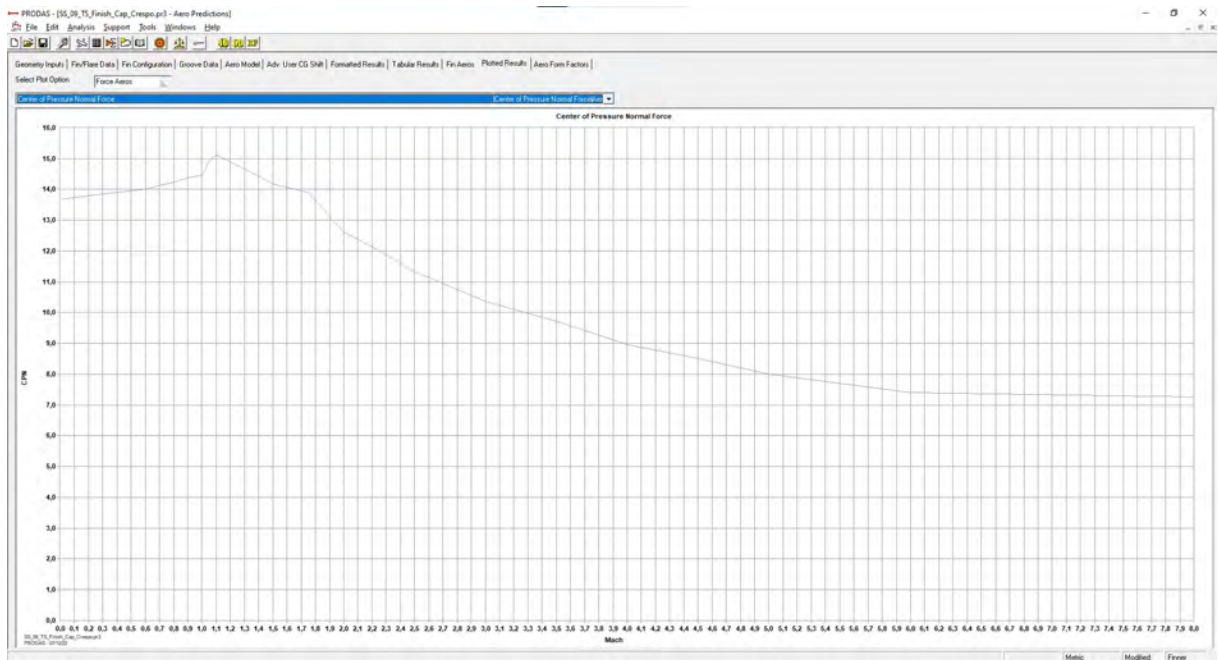


Figura 77 – Aba *Plotted Results* - Center of Pressure Normal Force Aerodynamics

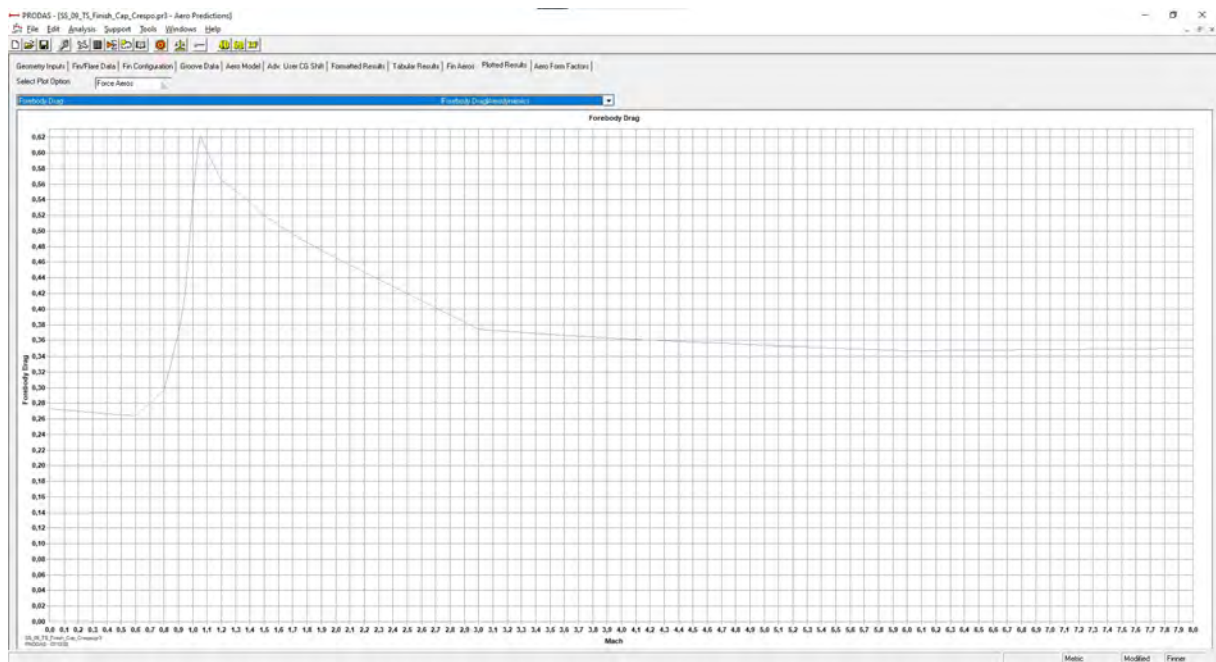


Figura 78 – *Aba Plotted Results - Forebody Drag Aerodynamics*

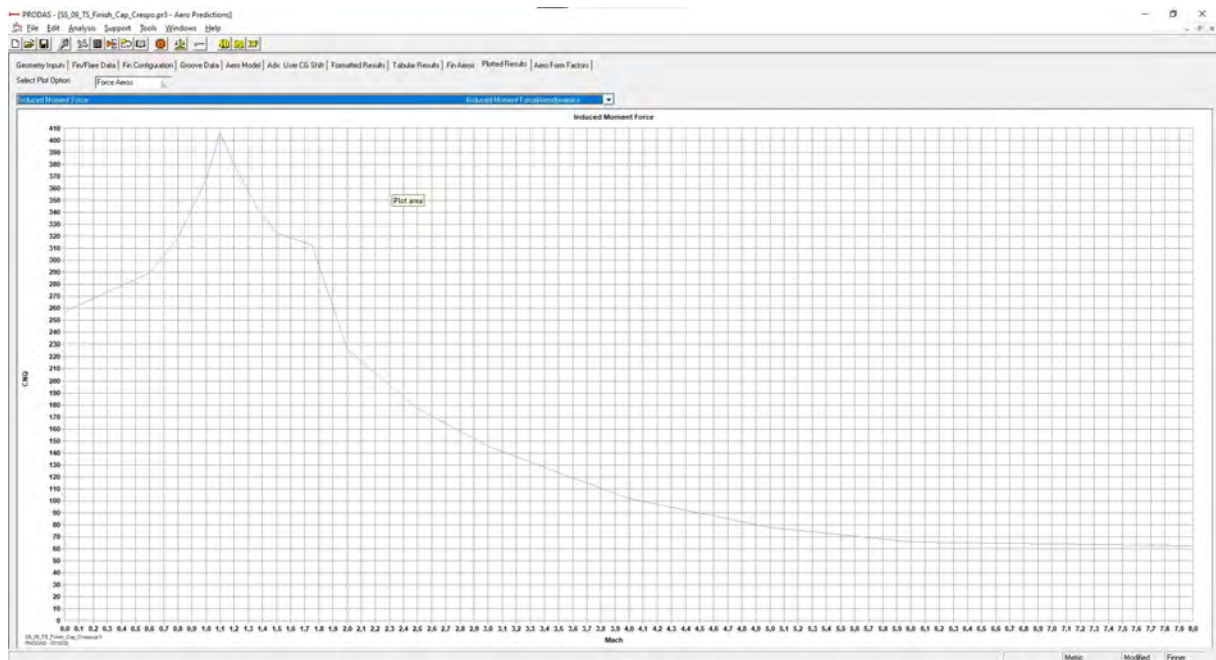


Figura 79 – *Aba Plotted Results - Induced Moment Force Aerodynamics*

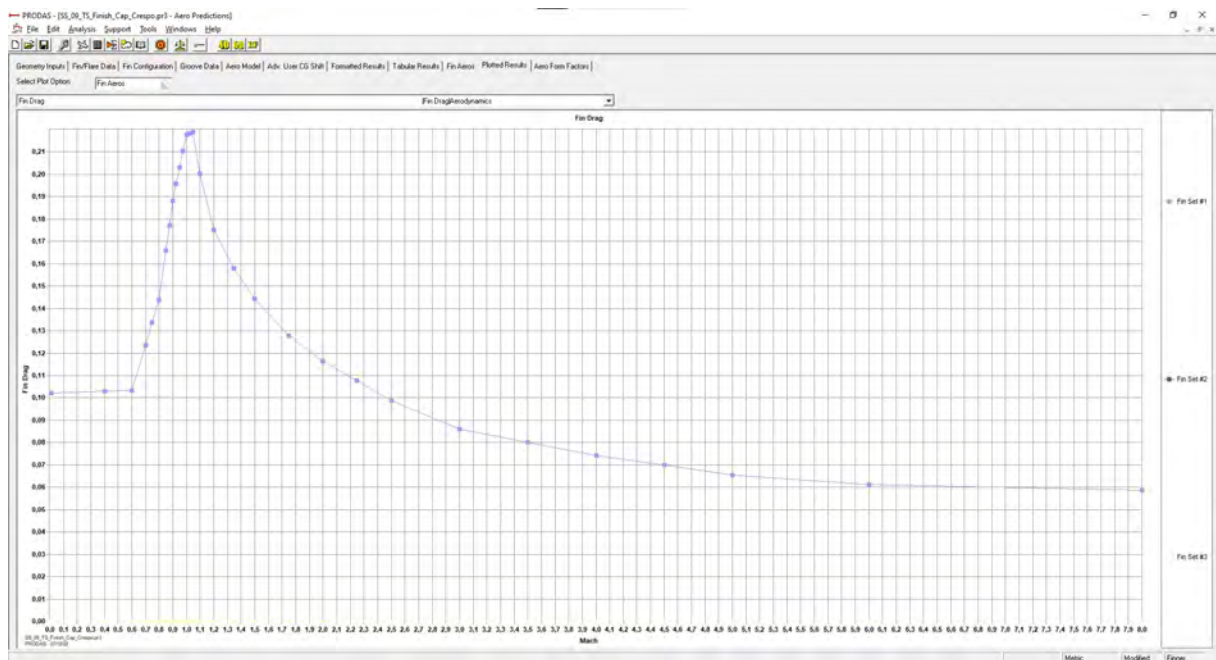


Figura 80 – *Aba Plotted Results - Fin Drag Aerodynamics*

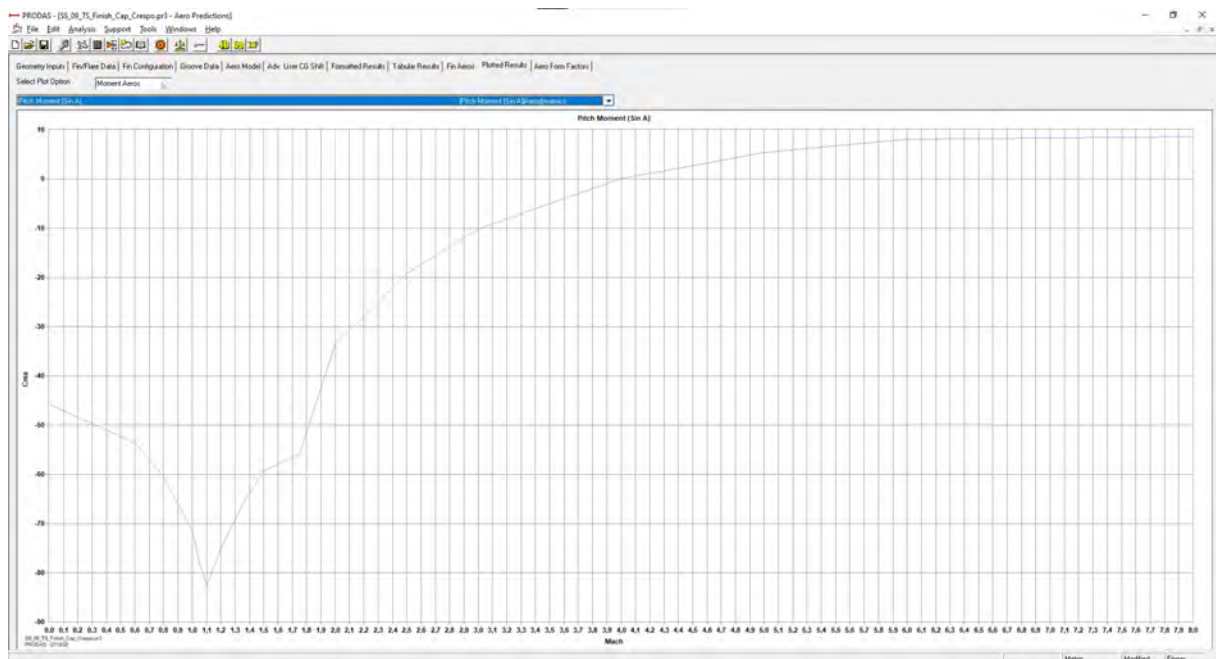


Figura 81 – *Aba Plotted Results - Pitch Moment*

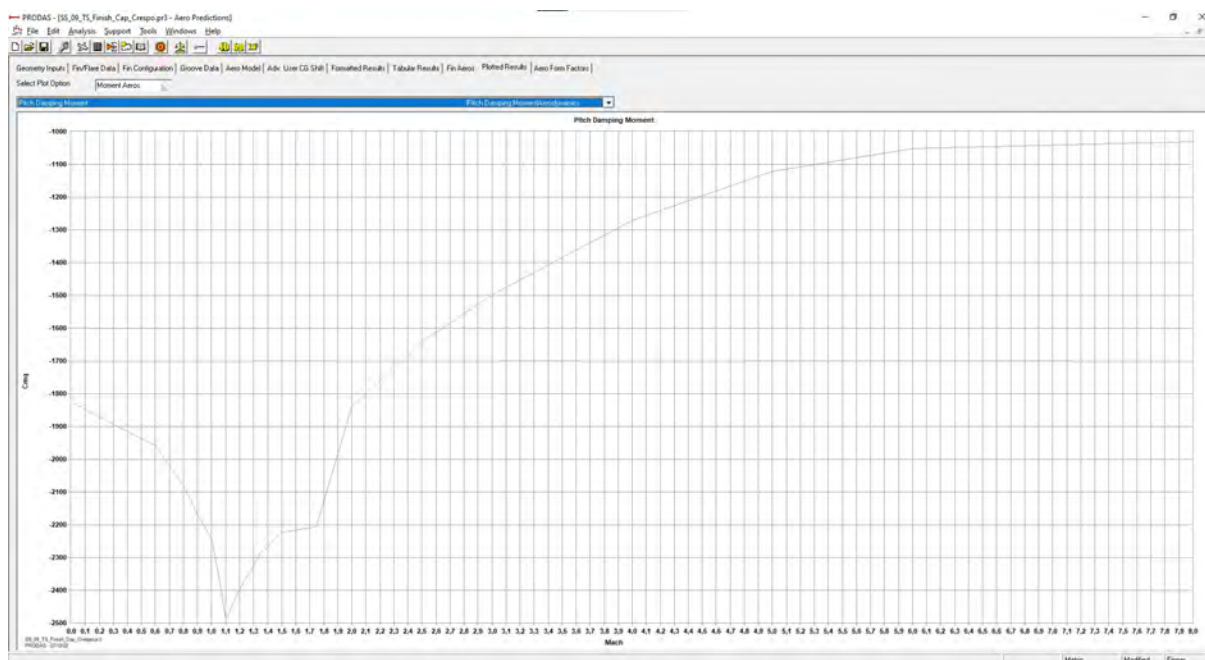


Figura 82 – Aba *Plotted Results* - Pitch Damping Moment

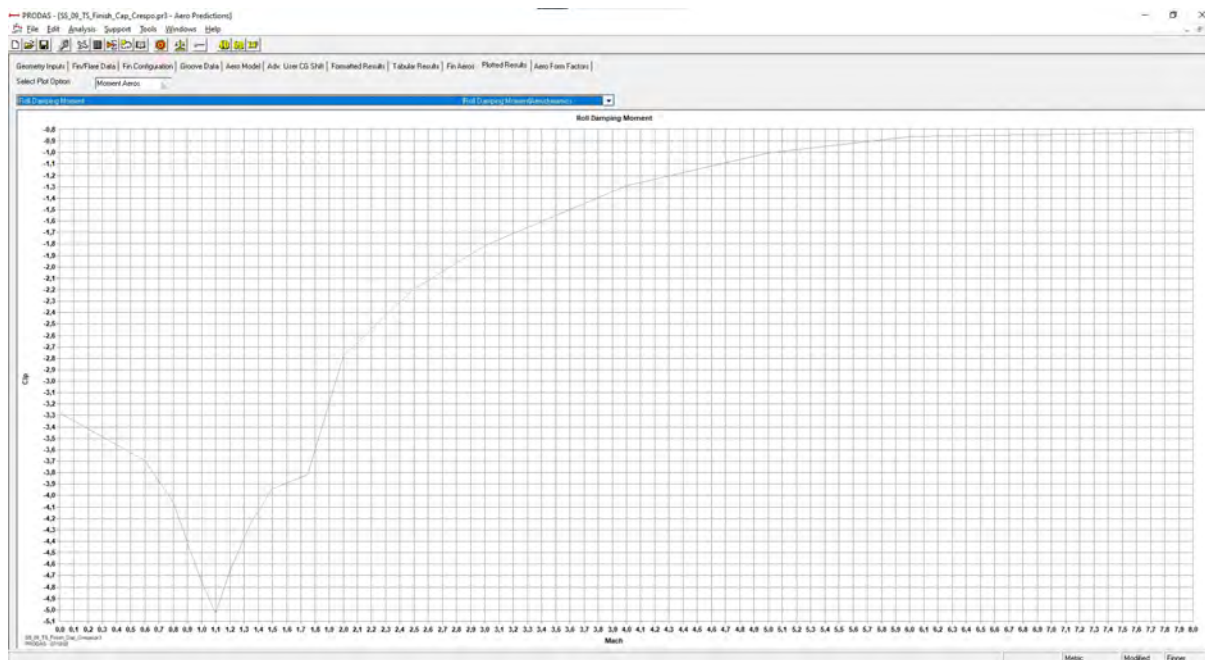


Figura 83 – Aba *Plotted Results* - Roll Damping Moment

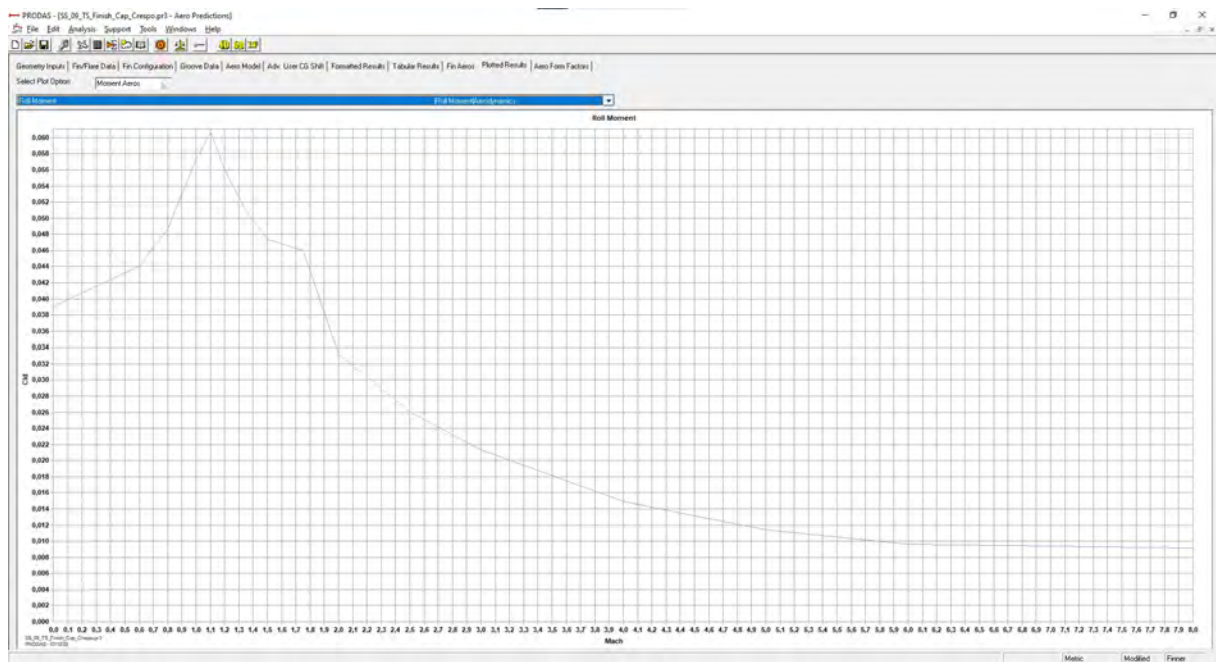


Figura 84 – ABA Plotted Results - Roll Moment

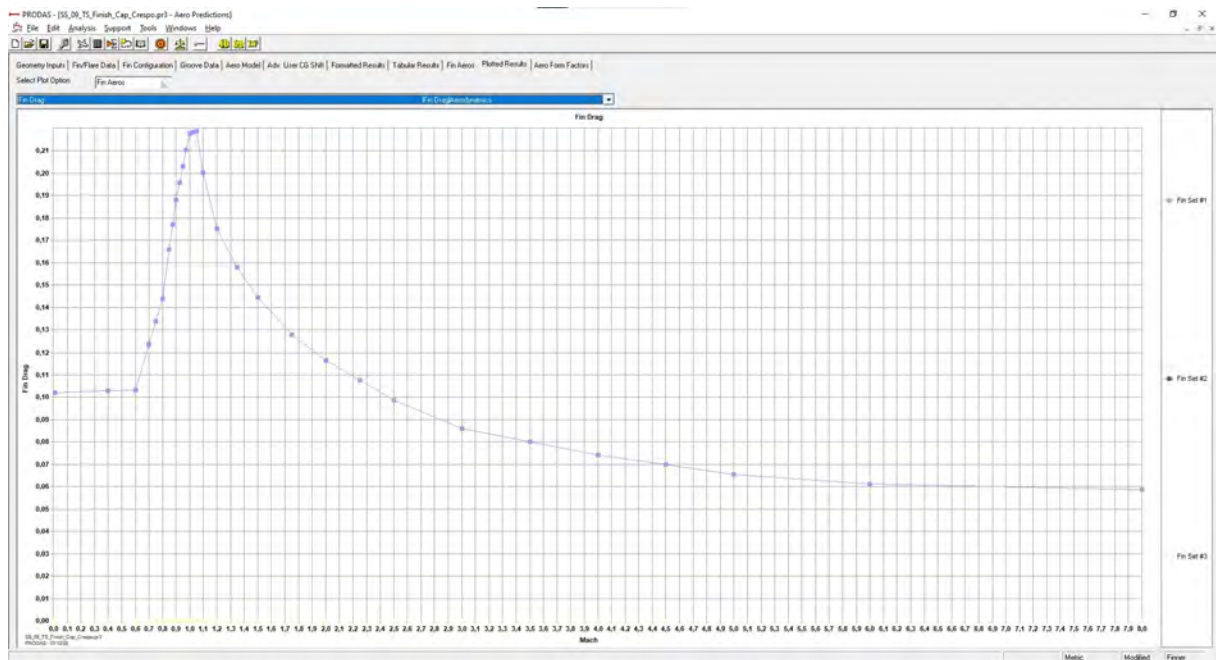


Figura 85 – ABA Plotted Results - Fin Drag

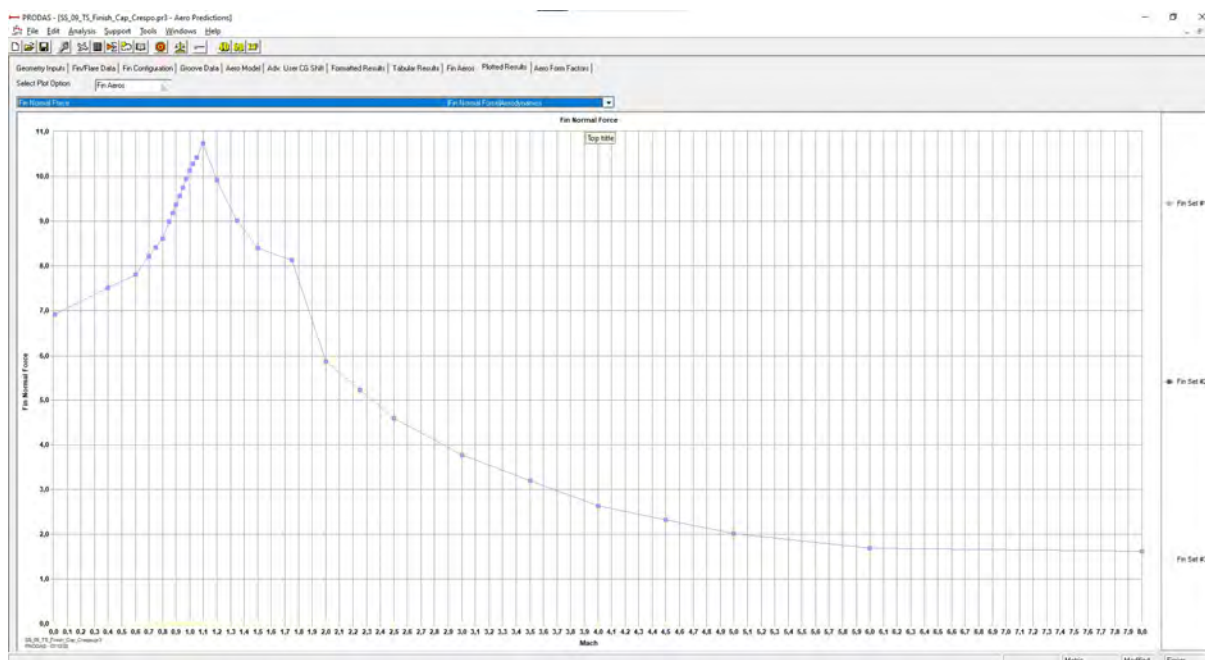


Figura 86 – Aba *Plotted Results* - Fin Normal Force

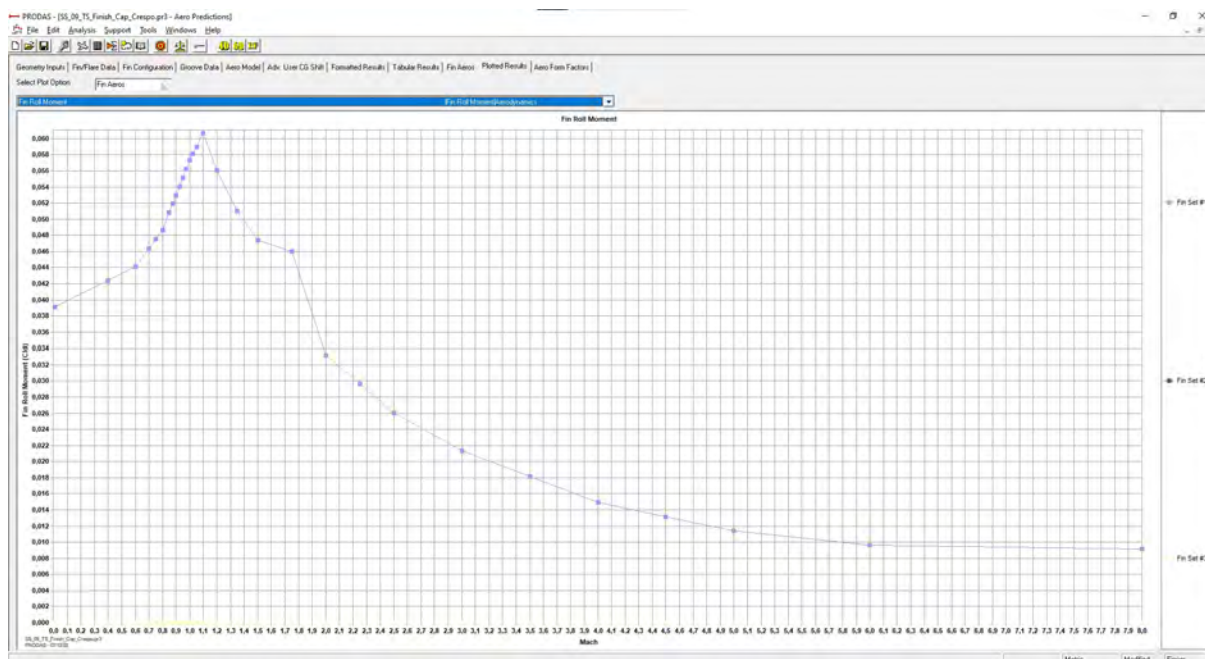


Figura 87 – Aba *Plotted Results* - Fin Roll Moment

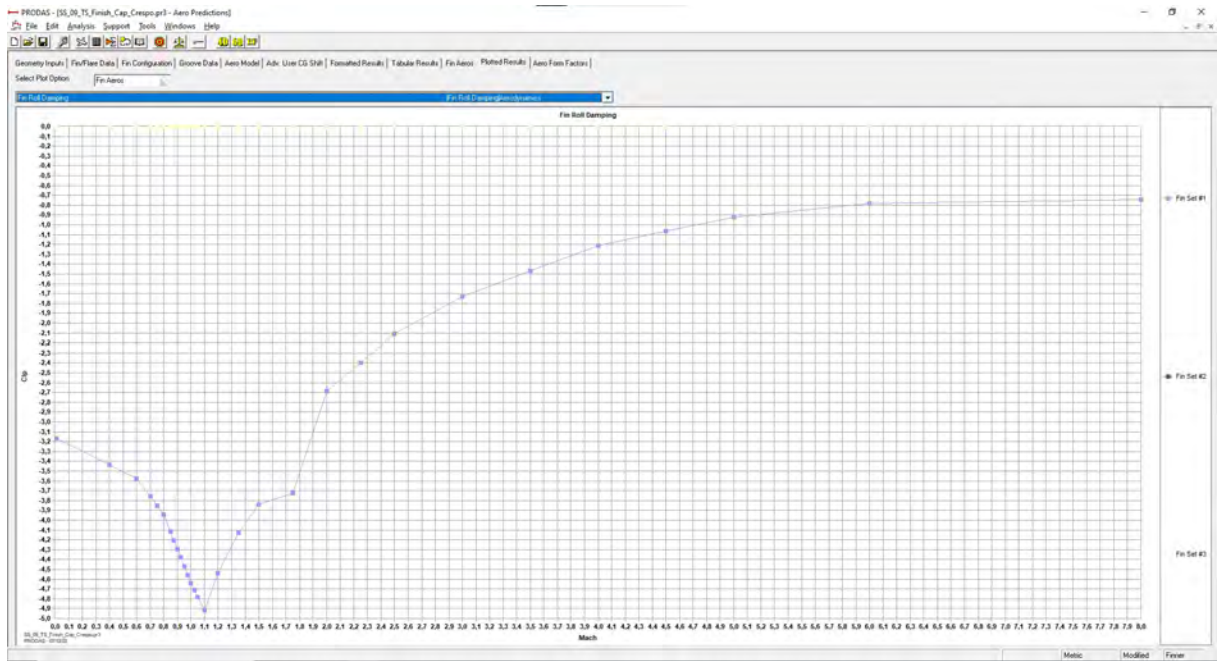


Figura 88 – ABA *Plotted Results* - Fin Roll Damping



# ANEXO C – TABELA DE TIRO COM 4-DOF - PRODAS

\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
 06/29/2022 16:37  
 BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation		Angle of Descent		Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m
			deg.	G-mils	deg.	G-mils					
0.	95.6	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	54.4	0.000	0.000	0.0	0.0
100.	364.9	0.436	0.87	15.49	0.37	6.58	671.6	15.494	-0.005	0.2	40.4
200.	536.5	0.656	1.13	20.09	0.39	6.86	1320.2	20.091	-0.008	0.5	76.8
300.	686.6	0.816	1.28	22.83	0.38	6.76	2006.0	22.832	-0.009	0.7	111.0
400.	812.2	0.960	1.40	24.93	0.37	6.56	2610.2	24.927	-0.011	1.0	148.0
500.	802.0	1.076	1.48	26.30	0.37	6.63	2491.1	26.298	-0.012	1.2	179.6
600.	788.6	1.196	1.55	27.49	0.39	6.95	2408.7	27.487	-0.013	1.4	213.6
700.	774.0	1.331	1.61	28.66	0.42	7.50	2320.2	28.664	-0.014	1.7	255.1
800.	759.4	1.469	1.67	29.77	0.46	8.19	2233.8	29.767	-0.015	2.0	303.5
900.	746.7	1.594	1.73	30.71	0.50	8.90	2159.3	30.706	-0.016	2.3	354.3
1000.	732.8	1.733	1.78	31.71	0.55	9.77	2079.7	31.715	-0.017	2.7	419.2
1100.	719.9	1.865	1.84	32.65	0.60	10.66	2007.2	32.652	-0.018	3.1	480.6
1200.	706.4	2.008	1.89	33.64	0.66	11.67	1932.8	33.638	-0.019	3.6	543.7
1300.	693.0	2.153	1.95	34.63	0.72	12.75	1860.3	34.630	-0.020	4.2	605.9
1400.	680.7	2.291	2.00	35.57	0.78	13.83	1794.6	35.566	-0.021	4.7	663.4
1500.	667.7	2.441	2.06	36.57	0.85	15.04	1726.7	36.570	-0.022	5.4	723.8
1600.	654.8	2.594	2.11	37.60	0.92	16.32	1660.6	37.596	-0.023	6.2	784.1
1700.	642.0	2.751	2.17	38.64	1.00	17.69	1596.2	38.644	-0.025	7.0	844.4
1800.	629.3	2.911	2.23	39.71	1.08	19.14	1533.6	39.714	-0.026	7.9	904.6
1900.	618.1	3.057	2.29	40.69	1.15	20.50	1479.6	40.687	-0.027	8.8	958.4
2000.	605.7	3.222	2.35	41.80	1.24	22.09	1421.0	41.796	-0.028	9.9	1018.3
2100.	593.5	3.392	2.42	42.94	1.34	23.78	1364.1	42.936	-0.030	11.1	1078.5
2200.	581.3	3.565	2.48	44.11	1.44	25.56	1308.8	44.107	-0.031	12.4	1138.9
2300.	569.3	3.743	2.55	45.31	1.54	27.44	1255.2	45.310	-0.032	13.7	1199.6
2400.	557.4	3.924	2.62	46.54	1.65	29.41	1203.5	46.543	-0.034	15.2	1260.6
2500.	545.7	4.109	2.69	47.81	1.77	31.50	1153.5	47.808	-0.035	16.8	1321.6
2600.	534.2	4.297	2.76	49.10	1.89	33.68	1105.4	49.104	-0.037	18.6	1382.7
2700.	524.2	4.467	2.83	50.28	2.01	35.71	1064.2	50.282	-0.038	20.2	1437.0
2800.	512.9	4.665	2.91	51.66	2.15	38.14	1019.0	51.655	-0.039	22.2	1499.0
2900.	501.8	4.866	2.99	53.07	2.29	40.69	975.2	53.069	-0.041	24.3	1561.3
3000.	490.8	5.072	3.07	54.52	2.44	43.38	933.1	54.524	-0.043	26.6	1623.8

Figura 89 – Aba *Formatted Results*

\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
06/29/2022 16:37  
BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation		Angle of Descent		Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m
			deg.	G-mils	deg.	G-mils					
3100.	480.0	5.282	3.15	56.02	2.60	46.20	892.6	56.019	-0.044	29.0	1686.5
3200.	469.5	5.497	3.24	57.55	2.77	49.17	853.6	57.554	-0.046	31.6	1749.4
3300.	459.1	5.715	3.33	59.13	2.94	52.28	816.2	59.130	-0.048	34.4	1812.3
3400.	449.8	5.916	3.41	60.60	3.11	55.24	783.7	60.596	-0.049	37.0	1869.4
3500.	439.7	6.145	3.50	62.27	3.30	58.69	748.9	62.273	-0.051	40.1	1933.3
3600.	429.8	6.379	3.60	64.00	3.51	62.32	715.4	64.005	-0.053	43.5	1997.6
3700.	420.0	6.618	3.70	65.79	3.72	66.15	683.3	65.789	-0.055	47.0	2062.1
3800.	410.4	6.862	3.80	67.63	3.95	70.17	652.5	67.628	-0.057	50.8	2126.9
3900.	401.0	7.111	3.91	69.52	4.19	74.40	622.9	69.520	-0.059	54.8	2191.9
4000.	392.2	7.352	4.01	71.36	4.42	78.59	595.9	71.360	-0.060	58.9	2253.4
4100.	383.0	7.613	4.13	73.38	4.69	83.29	568.1	73.383	-0.062	63.4	2319.3
4200.	373.9	7.881	4.25	75.47	4.96	88.25	541.4	75.474	-0.065	68.3	2385.6
4300.	364.9	8.156	4.37	77.63	5.26	93.48	515.7	77.633	-0.067	73.4	2452.2
4400.	356.2	8.436	4.49	79.86	5.57	98.98	491.5	79.859	-0.069	78.8	2519.0
4500.	348.5	8.713	4.62	82.09	5.88	104.58	470.3	82.086	-0.071	84.4	2584.0
4600.	341.0	9.007	4.75	84.47	6.22	110.65	450.5	84.469	-0.074	90.6	2651.6
4700.	334.5	9.306	4.89	86.93	6.58	116.98	433.3	86.932	-0.076	97.1	2719.5
4800.	328.6	9.610	5.03	89.47	6.95	123.54	418.3	89.475	-0.079	104.0	2787.6
4900.	323.4	9.914	5.18	92.06	7.32	130.21	405.0	92.057	-0.081	111.1	2854.8
5000.	318.3	10.229	5.33	94.77	7.72	137.22	392.4	94.774	-0.084	118.8	2923.4
5100.	313.4	10.550	5.49	97.58	8.13	144.46	380.5	97.581	-0.087	127.0	2992.3
5200.	308.9	10.870	5.65	100.43	8.54	151.78	369.6	100.426	-0.090	135.5	3060.0
5300.	304.5	11.199	5.82	103.40	8.97	159.42	359.1	103.403	-0.093	144.6	3128.9
5400.	300.3	11.534	5.99	106.48	9.41	167.29	349.2	106.476	-0.096	154.1	3197.7
5500.	296.2	11.875	6.17	109.64	9.87	175.38	339.9	109.644	-0.099	164.2	3266.6
5600.	292.3	12.221	6.35	112.91	10.33	183.69	331.0	112.907	-0.102	174.8	3335.4
5700.	288.6	12.572	6.54	116.27	10.81	192.22	322.6	116.266	-0.106	186.0	3404.1
5800.	285.0	12.927	6.73	119.72	11.30	200.97	314.6	119.721	-0.109	197.7	3472.6
5900.	281.6	13.288	6.93	123.27	11.81	209.92	307.0	123.271	-0.113	210.0	3540.9
6000.	278.3	13.648	7.14	126.85	12.31	218.92	300.0	126.855	-0.116	222.6	3607.7
6100.	275.1	14.019	7.35	130.60	12.84	228.31	293.2	130.605	-0.120	236.1	3675.5

Figura 90 – Aba *Formatted Results* - continuação

\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
06/29/2022 16:37  
BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation		Angle of Descent		Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m
			deg.	G-mils	deg.	G-mils					
6200.	272.1	14.396	7.56	134.46	13.38	237.90	286.7	134.456	-0.124	250.2	3743.0
6300.	269.1	14.777	7.79	138.41	13.93	247.71	280.4	138.407	-0.128	264.9	3810.1
6400.	266.2	15.164	8.01	142.46	14.50	257.73	274.4	142.458	-0.132	280.3	3876.8
6500.	263.4	15.555	8.25	146.61	15.07	267.96	268.7	146.610	-0.136	296.3	3943.1
6600.	260.7	15.944	8.48	150.78	15.65	278.18	263.3	150.778	-0.141	312.7	4007.5
6700.	258.1	16.346	8.73	155.14	16.25	288.85	258.0	155.141	-0.145	330.1	4073.0
6800.	255.5	16.754	8.98	159.61	16.86	299.73	252.9	159.612	-0.150	348.3	4138.0
6900.	253.1	17.167	9.24	164.19	17.48	310.83	248.0	164.192	-0.154	367.2	4202.4
7000.	250.7	17.586	9.50	168.88	18.12	322.13	243.4	168.881	-0.159	386.8	4266.3
7100.	248.4	18.010	9.77	173.68	18.77	333.65	239.0	173.678	-0.164	407.3	4329.7
7200.	246.2	18.433	10.04	178.51	19.42	345.20	234.8	178.510	-0.169	428.1	4391.6
7300.	244.1	18.869	10.32	183.54	20.09	357.16	230.8	183.541	-0.174	450.2	4454.0
7400.	242.0	19.311	10.61	188.69	20.77	369.33	226.9	188.689	-0.180	473.1	4516.0
7500.	240.1	19.759	10.91	193.96	21.47	381.71	223.2	193.957	-0.185	496.9	4577.5
7600.	238.2	20.213	11.21	199.34	22.18	394.29	219.8	199.343	-0.191	521.5	4638.8
7700.	236.4	20.667	11.52	204.78	22.89	406.91	216.5	204.782	-0.196	546.8	4698.9
7800.	234.7	21.134	11.84	210.42	23.62	419.91	213.4	210.424	-0.202	573.3	4759.8
7900.	233.1	21.607	12.16	216.20	24.36	433.12	210.4	216.195	-0.208	600.8	4820.5
8000.	231.5	22.087	12.49	222.10	25.12	446.51	207.6	222.097	-0.214	629.3	4881.1
8100.	230.0	22.568	12.83	228.06	25.87	459.94	205.0	228.063	-0.221	658.5	4941.0
8200.	228.6	23.062	13.18	234.24	26.65	473.73	202.5	234.241	-0.227	689.1	5001.5
8300.	227.3	23.563	13.53	240.56	27.43	487.69	200.1	240.562	-0.234	720.9	5062.0
8400.	226.1	24.071	13.90	247.03	28.23	501.84	198.0	247.026	-0.241	753.8	5122.5
8500.	224.9	24.581	14.26	253.57	29.03	516.00	195.9	253.569	-0.247	787.5	5182.4
8600.	223.8	25.104	14.64	260.34	29.84	530.50	194.1	260.339	-0.255	822.8	5242.8
8700.	222.8	25.636	15.03	267.27	30.67	545.16	192.3	267.267	-0.262	859.4	5303.3
8800.	221.9	26.175	15.43	274.35	31.50	559.97	190.7	274.354	-0.269	897.3	5363.7
8900.	221.1	26.718	15.84	281.54	32.33	574.80	189.3	281.541	-0.277	936.2	5423.5
9000.	220.3	27.275	16.25	288.98	33.18	589.92	188.0	288.976	-0.285	976.9	5484.0
9100.	219.6	27.841	16.68	296.59	34.04	605.19	186.8	296.588	-0.293	1019.1	5544.4
9200.	219.0	28.411	17.12	304.31	34.90	620.44	185.8	304.310	-0.301	1062.5	5604.1

Figura 91 – Aba *Formatted Results* - continuação

\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
 06/29/2022 16:37  
 BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation		Angle of Descent		Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m
			deg.	G-mils	deg.	G-mils					
9300.	218.5	28.997	17.57	312.31	35.77	635.99	184.8	312.307	-0.309	1107.9	5664.5
9400.	218.0	29.593	18.03	320.50	36.66	651.67	184.1	320.505	-0.318	1155.0	5724.8
9500.	217.6	30.195	18.50	328.83	37.54	667.32	183.4	328.832	-0.327	1203.5	5784.5
9600.	217.3	30.813	18.98	337.47	38.43	683.25	182.9	337.466	-0.336	1254.3	5844.8
9700.	217.1	31.444	19.48	346.33	39.34	699.31	182.6	346.330	-0.346	1307.0	5905.0
9800.	217.0	32.081	19.99	355.35	40.24	715.33	182.3	355.351	-0.355	1361.4	5964.6
9900.	216.9	32.738	20.52	364.72	41.15	731.63	182.2	364.722	-0.365	1418.5	6024.7
10000.	216.9	33.408	21.06	374.36	42.08	748.03	182.2	374.360	-0.376	1477.9	6084.7
10100.	217.0	34.088	21.61	384.20	43.00	764.41	182.4	384.202	-0.386	1539.2	6144.1
10200.	217.2	34.791	22.19	394.45	43.93	781.06	182.6	394.446	-0.397	1603.8	6204.0
10300.	217.4	35.504	22.78	404.91	44.87	797.66	183.1	404.911	-0.409	1670.6	6263.1
10400.	217.7	36.244	23.39	415.85	45.82	814.57	183.6	415.847	-0.420	1741.1	6322.7
10500.	218.1	36.995	24.02	427.04	46.77	831.43	184.3	427.041	-0.433	1814.2	6381.4
10600.	218.6	37.778	24.68	438.79	47.74	848.65	185.2	438.791	-0.446	1891.7	6440.6
10700.	219.2	38.577	25.36	450.86	48.70	865.83	186.1	450.863	-0.459	1972.3	6498.8
10800.	219.9	39.413	26.08	463.60	49.69	883.42	187.3	463.603	-0.473	2058.3	6557.5
10900.	220.7	40.271	26.82	476.76	50.68	901.05	188.6	476.764	-0.487	2148.1	6615.1
11000.	221.5	41.175	27.60	490.75	51.70	919.17	190.1	490.747	-0.503	2244.7	6673.0
11100.	222.5	42.107	28.42	505.28	52.73	937.35	191.8	505.279	-0.519	2346.1	6729.6
11200.	223.6	43.100	29.30	520.90	53.79	956.18	193.6	520.904	-0.537	2456.5	6786.5
11300.	224.8	44.137	30.23	537.34	54.86	975.25	195.7	537.344	-0.556	2574.0	6842.0
11400.	226.1	45.244	31.22	555.05	55.97	994.99	198.1	555.053	-0.576	2702.0	6896.5
11500.	227.7	46.459	32.33	574.70	57.15	1015.94	200.8	574.703	-0.599	2845.7	6950.8
11600.	229.4	47.779	33.54	596.25	58.38	1037.82	203.9	596.254	-0.624	3005.2	7003.0
11700.	231.5	49.276	34.93	620.99	59.72	1061.68	207.5	620.992	-0.654	3190.6	7053.2
11800.	233.8	51.012	36.57	650.07	61.21	1088.17	211.8	650.070	-0.689	3411.2	7098.9
11900.	237.4	53.542	39.00	693.26	63.26	1124.61	218.3	693.257	-0.743	3743.7	7140.0

Figura 92 – Aba *Formatted Results* - continuação

## ANEXO D – TABELA DE TIRO COM 6-DOF - PRODAS

\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
06/29/2022 16:41  
BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation		Angle of Descent		Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m
			deg.	G-mils	deg.	G-mils					
0.	95.6	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	54.4	0.000	0.000	0.0	0.0
100.	363.9	0.434	0.70	12.51	0.35	6.30	668.3	12.507	-0.004	0.2	44.6
200.	542.1	0.663	0.97	17.19	0.38	6.71	1343.8	17.186	-0.006	0.5	77.6
300.	697.9	0.827	1.12	19.93	0.37	6.66	2061.0	19.931	-0.008	0.7	117.0
400.	811.2	0.955	1.22	21.76	0.36	6.49	2610.2	21.761	-0.009	1.0	146.2
500.	802.2	1.072	1.30	23.13	0.37	6.54	2492.3	23.131	-0.010	1.2	180.9
600.	786.8	1.210	1.38	24.47	0.39	6.93	2398.0	24.475	-0.011	1.4	217.7
700.	774.0	1.328	1.43	25.49	0.42	7.42	2320.4	25.495	-0.012	1.7	256.1
800.	759.6	1.465	1.50	26.58	0.46	8.11	2234.6	26.583	-0.013	2.0	302.1
900.	746.5	1.593	1.55	27.54	0.50	8.83	2158.3	27.540	-0.014	2.3	356.0
1000.	732.7	1.731	1.61	28.54	0.55	9.69	2079.2	28.537	-0.015	2.7	419.7
1100.	719.0	1.872	1.66	29.52	0.60	10.63	2002.3	29.523	-0.016	3.1	484.5
1200.	706.1	2.008	1.71	30.46	0.65	11.60	1930.9	30.465	-0.017	3.6	545.1
1300.	692.8	2.153	1.77	31.45	0.71	12.68	1859.0	31.445	-0.018	4.1	606.8
1400.	679.7	2.300	1.82	32.43	0.78	13.82	1789.4	32.433	-0.019	4.8	667.7
1500.	667.0	2.446	1.88	33.41	0.84	15.00	1723.2	33.410	-0.021	5.4	726.5
1600.	654.2	2.599	1.94	34.43	0.92	16.28	1657.5	34.427	-0.022	6.2	786.4
1700.	641.9	2.749	1.99	35.42	0.99	17.59	1596.0	35.424	-0.023	7.0	843.9
1800.	629.4	2.907	2.05	36.47	1.07	19.01	1534.3	36.474	-0.024	7.9	903.2
1900.	617.0	3.068	2.11	37.55	1.15	20.51	1474.3	37.552	-0.025	8.9	962.9
2000.	604.6	3.234	2.17	38.66	1.24	22.10	1416.0	38.657	-0.027	9.9	1022.6
2100.	592.4	3.403	2.24	39.79	1.34	23.78	1359.4	39.789	-0.028	11.1	1082.7
2200.	581.4	3.562	2.30	40.85	1.43	25.41	1309.1	40.854	-0.029	12.3	1137.9
2300.	569.5	3.737	2.36	42.04	1.53	27.26	1256.0	42.039	-0.030	13.6	1198.0
2400.	557.7	3.918	2.43	43.26	1.64	29.21	1204.6	43.259	-0.032	15.1	1258.3
2500.	546.0	4.102	2.50	44.52	1.76	31.28	1154.7	44.515	-0.033	16.7	1319.4
2600.	534.5	4.290	2.58	45.81	1.88	33.46	1106.5	45.806	-0.035	18.4	1380.6
2700.	523.1	4.483	2.65	47.13	2.01	35.75	1060.0	47.133	-0.036	20.2	1441.9
2800.	511.9	4.679	2.73	48.50	2.15	38.16	1015.1	48.496	-0.038	22.2	1503.3
2900.	500.9	4.879	2.81	49.89	2.29	40.69	972.0	49.894	-0.039	24.3	1565.0
3000.	491.0	5.066	2.88	51.21	2.43	43.11	933.9	51.206	-0.041	26.4	1621.5

{NEWPAGE}

Figura 93 – Aba *Formatted Results*

\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
 06/29/2022 16:41  
 BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation deg.	Angle of Descent G-mils	Angle of Descent deg.	Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m	
3100.	480.2	5.276	2.96	52.70	2.58	45.93	893.2	52.696	-0.042	28.8	1684.3
3200.	469.6	5.491	3.05	54.23	2.75	48.89	854.1	54.230	-0.044	31.4	1747.5
3300.	459.1	5.710	3.14	55.81	2.93	52.00	816.5	55.808	-0.046	34.1	1810.7
3400.	448.9	5.934	3.23	57.43	3.11	55.28	780.5	57.431	-0.047	37.1	1874.3
3500.	438.8	6.162	3.32	59.10	3.30	58.72	745.9	59.099	-0.049	40.2	1937.9
3600.	429.8	6.376	3.41	60.68	3.49	62.03	715.4	60.675	-0.051	43.2	1996.6
3700.	420.0	6.615	3.51	62.45	3.70	65.84	683.3	62.453	-0.053	46.8	2061.0
3800.	410.4	6.860	3.62	64.29	3.93	69.86	652.5	64.289	-0.055	50.6	2125.9
3900.	401.0	7.110	3.72	66.18	4.17	74.09	622.7	66.183	-0.056	54.6	2191.1
4000.	391.6	7.366	3.83	68.13	4.42	78.53	594.0	68.135	-0.059	58.9	2256.6
4100.	382.9	7.613	3.94	70.04	4.67	82.97	567.8	70.042	-0.060	63.1	2318.8
4200.	373.8	7.881	4.06	72.12	4.94	87.90	541.1	72.124	-0.063	68.0	2385.4
4300.	364.8	8.156	4.18	74.28	5.24	93.12	515.4	74.277	-0.065	73.1	2451.9
4400.	356.1	8.437	4.30	76.50	5.55	98.62	491.2	76.503	-0.067	78.5	2518.9
4500.	348.1	8.724	4.43	78.80	5.87	104.39	469.3	78.801	-0.069	84.3	2586.1
4600.	340.9	9.009	4.56	81.11	6.20	110.28	450.1	81.111	-0.071	90.2	2651.8
4700.	334.4	9.308	4.70	83.57	6.56	116.59	433.0	83.566	-0.074	96.7	2719.7
4800.	328.5	9.613	4.84	86.10	6.93	123.14	418.0	86.104	-0.076	103.6	2788.0
4900.	323.2	9.923	4.99	88.72	7.31	129.90	404.5	88.725	-0.079	110.9	2856.2
5000.	318.2	10.234	5.14	91.40	7.69	136.79	392.0	91.397	-0.082	118.5	2924.0
5100.	313.3	10.554	5.30	94.19	8.10	144.00	380.2	94.193	-0.084	126.6	2992.7
5200.	308.7	10.879	5.46	97.08	8.52	151.42	369.1	97.080	-0.087	135.2	3062.1
5300.	304.4	11.205	5.63	100.01	8.94	158.95	358.8	100.013	-0.090	144.1	3129.9
5400.	300.2	11.540	5.80	103.07	9.38	166.78	349.0	103.073	-0.093	153.7	3198.5
5500.	296.1	11.880	5.98	106.23	9.83	174.84	339.6	106.228	-0.097	163.7	3267.3
5600.	292.2	12.226	6.16	109.48	10.30	183.12	330.7	109.481	-0.100	174.3	3336.1
5700.	288.5	12.576	6.35	112.83	10.78	191.62	322.3	112.829	-0.103	185.4	3404.8
5800.	284.9	12.932	6.54	116.27	11.27	200.34	314.4	116.274	-0.107	197.1	3473.2
5900.	281.5	13.294	6.74	119.82	11.77	209.26	306.8	119.816	-0.110	209.3	3541.3
6000.	278.2	13.659	6.94	123.45	12.28	218.40	299.7	123.453	-0.114	222.1	3609.4
6100.	275.0	14.024	7.15	127.13	12.80	227.59	293.0	127.128	-0.118	235.3	3675.9

{NEWPAGE}

Figura 94 – Aba *Formatted Results* - continuação

\_P2K575255S\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
06/29/2022 16:41  
BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation		Angle of Descent		Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m
			deg.	G-mils	deg.	G-mils					
6200.	272.0	14.401	7.37	130.97	13.34	237.16	286.5	130.968	-0.121	249.4	3743.4
6300.	269.0	14.782	7.59	134.91	13.89	246.94	280.2	134.909	-0.125	264.1	3811.0
6400.	266.1	15.169	7.82	138.95	14.45	256.93	274.2	138.951	-0.130	279.4	3877.6
6500.	263.3	15.561	8.05	143.09	15.03	267.13	268.5	143.094	-0.134	295.4	3943.9
6600.	260.6	15.958	8.29	147.34	15.61	277.54	263.0	147.339	-0.138	312.1	4009.8
6700.	258.0	16.352	8.53	151.60	16.20	287.96	257.8	151.603	-0.142	329.1	4073.7
6800.	255.4	16.760	8.78	156.06	16.81	298.81	252.7	156.062	-0.147	347.2	4138.6
6900.	253.0	17.173	9.04	160.63	17.43	309.88	247.8	160.631	-0.152	366.0	4203.0
7000.	250.6	17.592	9.30	165.31	18.07	321.16	243.2	165.310	-0.157	385.6	4267.0
7100.	248.3	18.017	9.57	170.10	18.71	332.65	238.8	170.098	-0.161	406.0	4330.5
7200.	246.1	18.446	9.84	175.00	19.37	344.35	234.5	174.996	-0.166	427.2	4393.1
7300.	244.0	18.876	10.12	179.93	20.03	356.09	230.6	179.933	-0.172	448.8	4454.4
7400.	241.9	19.318	10.41	185.07	20.71	368.23	226.7	185.070	-0.177	471.6	4516.4
7500.	240.0	19.766	10.71	190.33	21.41	380.58	223.0	190.326	-0.182	495.3	4578.0
7600.	238.1	20.220	11.01	195.70	22.11	393.13	219.6	195.702	-0.188	519.9	4639.8
7700.	236.3	20.674	11.31	201.13	22.82	405.72	216.3	201.127	-0.193	545.1	4700.0
7800.	234.6	21.140	11.63	206.75	23.55	418.69	213.2	206.755	-0.199	571.5	4760.9
7900.	232.9	21.614	11.95	212.51	24.29	431.87	210.2	212.513	-0.205	599.0	4821.7
8000.	231.4	22.094	12.29	218.40	25.04	445.23	207.4	218.404	-0.211	627.4	4882.1
8100.	229.9	22.580	12.62	224.43	25.81	458.79	204.7	224.426	-0.218	656.9	4942.6
8200.	228.5	23.068	12.97	230.52	26.57	472.38	202.3	230.520	-0.224	687.0	5002.3
8300.	227.2	23.569	13.32	236.83	27.36	486.32	199.9	236.827	-0.230	718.7	5063.1
8400.	226.0	24.077	13.68	243.28	28.15	500.43	197.7	243.279	-0.237	751.5	5123.5
8500.	224.8	24.593	14.06	249.88	28.95	514.72	195.7	249.876	-0.244	785.4	5184.0
8600.	223.7	25.110	14.43	256.56	29.76	529.03	193.8	256.560	-0.251	820.3	5243.6
8700.	222.7	25.642	14.82	263.47	30.58	543.66	192.1	263.474	-0.258	856.7	5304.1
8800.	221.8	26.181	15.22	270.55	31.41	558.45	190.5	270.549	-0.266	894.5	5364.6
8900.	220.9	26.724	15.62	277.72	32.24	573.23	189.1	277.718	-0.273	933.3	5424.4
9000.	220.2	27.281	16.04	285.14	33.09	588.33	187.7	285.137	-0.281	973.9	5484.8
9100.	219.5	27.847	16.47	292.74	33.95	603.57	186.6	292.736	-0.289	1016.0	5545.2
9200.	218.9	28.417	16.90	300.44	34.81	618.80	185.5	300.443	-0.297	1059.2	5605.9

{NEWPAGE}

Figura 95 – Aba *Formatted Results* - continuação

\_P2K575255SS\_09\_TS\_Finish\_Cap\_Cr - 0  
 06/29/2022 16:41  
 BallisticMatch2000 Version 4.1.0

\*\*\*\*\* Ballistic Match Table Output \*\*\*\*\*

Range m	Remaining Velocity m/sec	Time sec	Angle of Elevation		Angle of Descent		Kinetic Energy kilojo	Drop G-mils	Drift G-mils	Vertex Height m	Vertex Range m
			deg.	G-mils	deg.	G-mils					
9300.	218.3	29.002	17.35	308.42	35.68	634.31	184.6	308.421	-0.306	1104.5	5666.3
9400.	217.9	29.598	17.81	316.61	36.56	649.97	183.8	316.605	-0.314	1151.5	5726.5
9500.	217.5	30.205	18.28	324.99	37.45	665.74	183.2	324.994	-0.323	1200.2	5786.8
9600.	217.2	30.817	18.76	333.53	38.33	681.49	182.7	333.529	-0.332	1250.4	5846.5
9700.	217.0	31.447	19.26	342.38	39.24	697.52	182.3	342.378	-0.342	1303.0	5906.8
9800.	216.8	32.083	19.77	351.38	40.14	713.51	182.1	351.379	-0.351	1357.1	5966.1
9900.	216.7	32.739	20.29	360.73	41.05	729.78	181.9	360.730	-0.361	1414.0	6026.4
10000.	216.7	33.401	20.83	370.35	41.96	745.87	182.0	370.354	-0.371	1473.3	6086.5
10100.	216.4	33.457	21.38	380.17	41.68	741.03	181.4	380.170	-0.373	1534.3	6145.6
10200.	216.1	33.516	21.96	390.40	41.40	736.04	180.8	390.396	-0.375	1598.8	6205.6
10300.	215.7	33.578	22.55	400.84	41.12	730.97	180.2	400.839	-0.377	1665.3	6264.7
10400.	215.3	33.645	23.16	411.75	40.82	725.73	179.5	411.750	-0.379	1735.5	6324.2
10500.	214.8	33.716	23.80	423.04	40.52	720.36	178.8	423.044	-0.382	1809.1	6383.5
10600.	214.4	33.791	24.45	434.64	40.21	714.92	178.0	434.636	-0.384	1885.5	6442.1
10700.	213.9	33.872	25.13	446.82	39.90	709.25	177.1	446.823	-0.387	1966.7	6500.9
10800.	213.3	33.958	25.84	459.38	39.57	703.51	176.2	459.383	-0.390	2051.3	6560.5
10900.	212.7	34.053	26.59	472.67	39.24	697.58	175.3	472.669	-0.393	2141.9	6618.6
11000.	212.1	34.154	27.36	486.46	38.90	691.55	174.2	486.457	-0.396	2236.9	6675.7
11100.	211.4	34.264	28.18	500.94	38.55	685.34	173.0	500.937	-0.400	2337.8	6732.4
11200.	210.6	34.387	29.05	516.51	38.18	678.78	171.7	516.513	-0.404	2447.6	6789.3
11300.	209.7	34.521	29.97	532.87	37.81	672.13	170.3	532.872	-0.408	2564.2	6844.6
11400.	208.7	34.673	30.97	550.50	37.42	665.29	168.7	550.499	-0.413	2691.4	6899.1
11500.	207.6	34.850	32.07	570.07	37.02	658.07	166.9	570.070	-0.419	2834.2	6953.6
11600.	206.3	35.054	33.27	591.44	36.60	650.62	164.8	591.440	-0.426	2992.0	7005.7
11700.	204.7	35.305	34.65	615.93	36.16	642.90	162.3	615.932	-0.434	3175.1	7055.7
11800.	202.6	35.636	36.32	645.73	35.71	634.83	159.0	645.732	-0.444	3400.6	7103.2
11900.	199.6	36.136	38.59	686.09	35.24	626.55	154.4	686.094	-0.460	3710.4	7143.2

Figura 96 – Aba *Formatted Results* - continuação