

ANÁLISE AERODINÂMICA DE UMA PIPA DELTA



10.56238/edimpecto2025.005-003

Marciene Lourenço Torres

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Adriana da Silva Torres

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Moisés de Matos Torres

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

RESUMO

Uma pipa apesar de ser composta por uma estrutura leve envolvida por um material fino e leve, é projetada para voar como um tipo de planador, no entanto, fixa por uma linha. Análises matemáticas e práticas podem ser feitas. Este trabalho tem como objetivo geral fazer um estudo da aerodinâmica por trás das pipas, onde o objetivo foi encontrar o fator aerodinâmico mais efetivo sobre uma pipa em voo e propor mudanças no projeto para otimizar seu desempenho. O estudo foi feito com uma Pipa Delta. Este trabalho está estruturado em duas etapas, primeiro fez-se uma revisão de literatura para estudar a história, tipos de pipas e análise aerodinâmica. Posteriormente fez-se duas análises, uma matemática e outra pelo *software* Kite Modeler, e por fim os valores foram comparados. O resultado principal deste projeto, foi a verificação de que o elemento que mais influencia efetivamente o voo da pipa é a localização do seu ponto de rédea. Além disso, a força de sustentação foi o fator aerodinâmico mais importante na determinação da tensão resultante na linha de controle. Assim foi sugerido melhorias no design da pipa.

Palavras-chave: Pipa Delta. Aerodinâmica. Influência.



1 INTRODUÇÃO

Uma pipa é composta por uma estrutura leve envolvida por um material fino e leve, pode ser de plástico, pano ou papel, que é projetada para voar pelo ar. Mesmo que algumas referências reforcem que as pipas foram inventadas na China, elas persistem popularmente ao longo do mundo por anos, não só entre crianças, mas também com adultos. Pipas dos modelos Diamante, Delta e Caixa são alguns tipos mais comuns usadas para entretenimento.

As pipas foram na realidade uma influência importante para a criação de aeronaves. Assim, uma pipa é considerada por muitos pesquisadores como um tipo de planador fixo por uma linha, onde análises matemática e prática podem serem feitas.

De acordo com a revisão de literatura, que pode ser vista a seguir, observa-se alguns fatores como velocidade do vento, ângulo de ataque, posição de ponto de rédea e janela de vento, que tem uma influência significativa no desempenho das pipas. Para este projeto a pergunta em questão é: qual é a força resultante na linha de controle através destes fatores? Além disso, estimar como o resultado desses efeitos na pipa podem ser modificados e controlados.

Este trabalho tem como objetivo geral fazer um estudo em aerodinâmica por trás das pipas. Onde o objetivo específico é encontrar o fator aerodinâmico mais efetivo sobre uma pipa em voo, para determinação da tensão na linha de controle de uma Pipa Delta, e também propor, como o projeto desse tipo de pipa pode ser modificado para otimizar o desempenho da mesma.

Para realçar o fenômeno físico por trás de uma simples pipa, há poucos anos, estudos de geração de energia que usam pipas são feitos em busca de uma nova fonte de energia renovável. Essas pesquisas foram aplicadas e agora os pesquisadores estudam para melhorar este novo método de geração de energia, e tudo é baseado apenas em aerodinâmica das pipas.

A metodologia deste projeto será dividida em duas partes para que os resultados possam ser comparados. Primeiro foi feito uma análise pelo software Kite Modeler, de uso específico para análises aerodinâmicas de pipas. Por fim foi feito a análise matemática pelas equações apresentadas na revisão de literatura, isso para entender o principal efeito externo sobre uma pipa em voo.

Como resultado principal desse projeto, o elemento que influencia efetivamente o voo da pipa é a localização do seu ponto de rédea. A força de sustentação foi o fator aerodinâmico mais importante na determinação da tensão resultante na linha de controle. Assim foi sugerido melhorias no design da pipa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 VISÃO GERAL

Tem se a seguir uma breve revisão de literatura. Onde esta inclui uma curta história das pipas, tipos de pipas, estrutura geral de pipas e desempenho de pipa. O trabalho também abrange prévias análises experimentais e matemáticas feitas ao usar pipas como instrumento de pesquisa.



2.2 PIPAS

Muitos pesquisadores consideram a pipa um tipo de aeronave/planador fixado por uma linha. Sua estrutura leve coberta por um material fino e leve, pode ser de plástico, pano ou papel, que é projetada para voar pelo ar.

2.2.1 História das Pipas

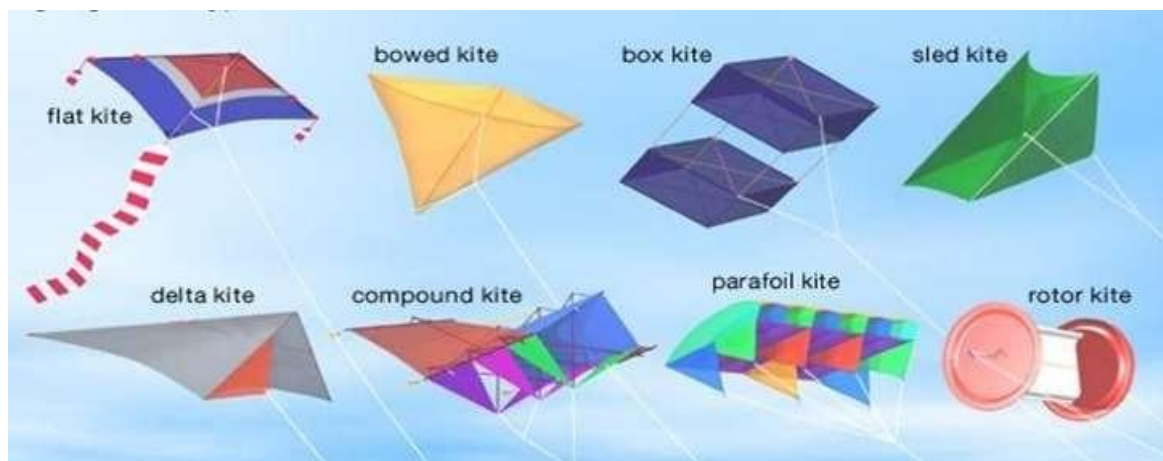
Existem algumas evidências documentadas que mostram que as pipas foram inventadas na China. É dito que os chineses começaram a pensar em pipas depois de observarem o efeito de vento sobre as folhas das árvores. Segundo pesquisadores é assumido que a primeira pipa foi feita por uma filósofa famosa, Mo Di (468-376 AC). Além do mais, antes de serem usadas para recreação, as pipas foram usadas para propósito militar. Por conseguinte, seu uso se estendeu ao longo da Ásia, e até mesmo hoje, elas persistem como importantes na cultura e costume dos povos. Não só com crianças, mas também com adultos, e se mantem popular ao redor do mundo. Sobretudo, pode ser dito que a pipa está oficialmente unida com a criação de aeronaves, porque foi uma das principais inspirações para o homem. (RAY,2004).

2.2.2 Tipos de Pipas

Há tipos diferentes de pipa, algumas são usadas em brisa mais clara, e por outro lado, outros modelos precisam de ventos constantes. Cada uma pode requerer uma estrutura complexa ou pode ser feita apenas com duas varas cobertas com um material de vela. Assim, a forma e tamanho da estrutura são consideravelmente variados (MAXWELL, 2013).

Na ilustração a seguir (Figura 1) têm-se alguns exemplos de pipas. Segundo a National Aeronautics And Space Administration, hoje em dia, têm-se os modelos Diamante, Delta, Caixa Alada, Trenó e Caixa como os tipos mais comuns de pipas, porém os nomes destas pipas não são regulares. (NASA, [201-]).

Figura 1 - Tipos de pipas



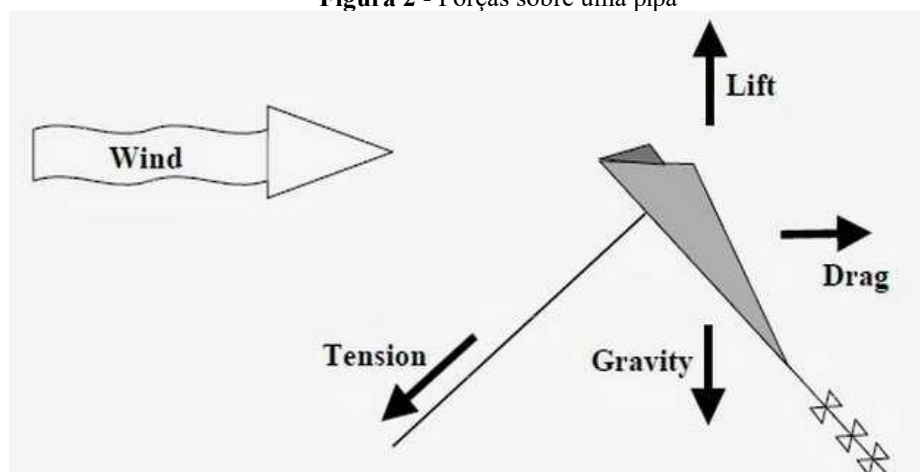
Fonte: RUSSEL, J., 2012.

2.2.3 Forças Atuantes Sobre uma Pipa

Cada tipo de pipa pode ter formas diferentes, porém as forças atuantes são exatamente as mesmas em todo tipo de pipa. Além do mais, forças que agem em aviões de companhias aéreas ou mesmo em um avião de combate são as mesmas forças que agem sobre as pipas, chamadas forças aerodinâmicas. É fato que aeronaves e pipas são mais pesadas que o ar, assim elas dependem dessas forças aerodinâmicas para voar. Além disso, pipas e aeronaves têm uma estrutura rígida. A pipa é coberta por um material fino, que pode ser papel, plástico ou pano, para gerar a sustentação necessária para superar o peso da mesma. Portanto, as pipas devem ser leves e fortes para um bom desempenho e resistir a ventos fortes. (NASA, [201-])

Força de sustentação (lift), peso (gravity) e arrasto (drag) são as principais forças aerodinâmicas sobre as pipas, responsáveis pelo controle do voo de pipa, que podem ser vistas na Figura 2. A razão do voo da pipa é a superação da força da gravidade e da resistência de ar pela força de sustentação do vento (MAXWELL, 2013).

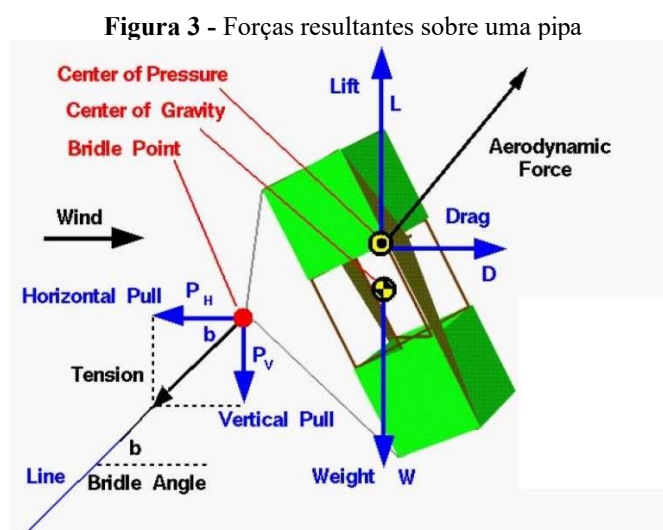
Figura 2 - Forças sobre uma pipa



Fonte: DAVISON, G., 2014



Como citado anteriormente, aeronaves e pipas são mais pesadas que o ar, assim elas dependem das superfícies para gerar as forças aerodinâmicas necessárias para o voo. Além disso, precisam de estruturas fortes para apoiar as superfícies e transmitir as forças. Portanto uma pipa pode voar devido ao equilíbrio entre o peso da pipa e as forças aerodinâmicas. Onde as forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto são criadas pela defecção do vento pelas superfícies da pipa. Além do mais, em voo, pipa e condutor estão conectados por uma linha de controle. Onde a tensão na linha, resultante das forças aerodinâmicas sobre a pipa, pode ser sentida pelo condutor. A propósito, pipa e linha estão conectadas por uma rédea, que é normalmente chamada de *string bridle*. O ponto onde a linha se conecta com a rédea é chamado ponto de rédea ou *bridle point*, que pode ser visto na Figura 3. Tem-se também que, a pipa gira ao redor deste ponto quando está em voo. Portanto, um modo para mudar as características de voo da pipa seria ajustar o *bridle point* (NASA, [201-]).



Fonte: NASA, [201-]

2.2.4 Desempenho da Pipa

A janela de vento representa a área dentro do conjunto de possíveis posições da pipa junto com a linha de controle no espaço, onde a pipa tem melhor desempenho. A janela de vento é organizada em três zonas, a zona de potência alta (*heavy power zone*), a zona de potência média (*mild power zone*) e a zona de potência baixa (*low or no power zone*) a representação dessas zonas pode ser vista na Figura 4. A zona de potência alta dará a maior quantia de arrasto e um melhor controle de velocidade. A zona de potência média é onde a pipa terá redução da potência e diminuirá a velocidade à medida que se aproxima da zona de potência baixa. Além do mais, o lançamento e pouso da pipa como também as voltas ou manobras são feitas na zona de potência baixa. Finalmente, zona de baixa ou nenhuma potência é onde a pipa regularmente não sofre ação do ar, porque lá tem a menor quantia de vento na pipa. (A WIND OF CHANGE, [201-]).

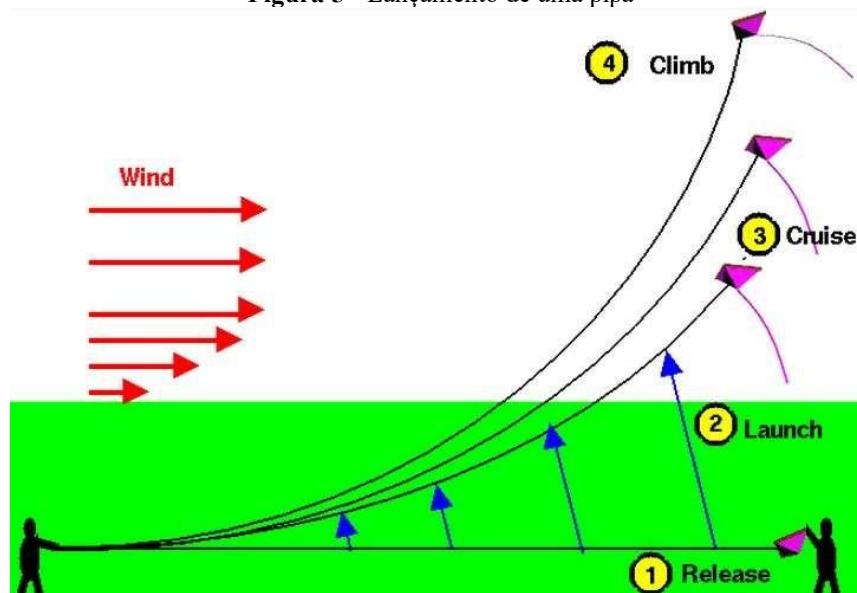
Figura 4 - Janela de vento



Fonte: A WIND OF CHANGE, [201-].

Basicamente, para lançar uma pipa é preciso criar uma força de sustentação maior que o peso da pipa, onde muitos fatores afetam a dimensão da força de sustentação, porém o fator mais importante para gerar uma sustentação é a velocidade relativa entre o ar e a pipa. Durante o lançamento, que pode ser visto na Figura 5, da posição 1 (*release*) para 2 (*launch*), o condutor pode habitualmente ficar parado e a pipa voará, devido a velocidade do vento aumentar a força de sustentação. Da posição 2 (*launch*) para a 3 (*cruise*), a pipa continua a subir pois a força de sustentação já é maior que o peso da mesma, isso se deve ao fato de que comumente a velocidade do vento aumenta com o aumento da altitude. A uma certa altitude, na posição 3 (*cruise*), a velocidade e a força de sustentação tornam-se aproximadamente constante, a pipa então voará a uma altitude onde as forças e torques serão equilibrados. Por outro lado, ao puxar a linha de controle pode então aumentar a velocidade da pipa, assim aumentará a sustentação que fará a pipa subir atingindo a posição 4 (*climb*). (NASA, [201-])

Figura 5 - Lançamento de uma pipa



Fonte: NASA, [201-].

Além disso, o ajuste do ponto de rédea da pipa afetará o desempenho da pipa, pois pode mudar o ângulo de ataque (ângulo entre a superfície da pipa e a direção do vento) que a pipa voa. Para pipa de linha simples e dupla as configurações da rédea são fixas para um ângulo de ataque específico, assim o



ângulo de ataque não pode ser ajustado durante o voo. De acordo com a condição de vento, pipas de linha dupla de acrobacia requerem ajuste da rédea em uma base regular (A WIND OF CHANGE, [201-]).

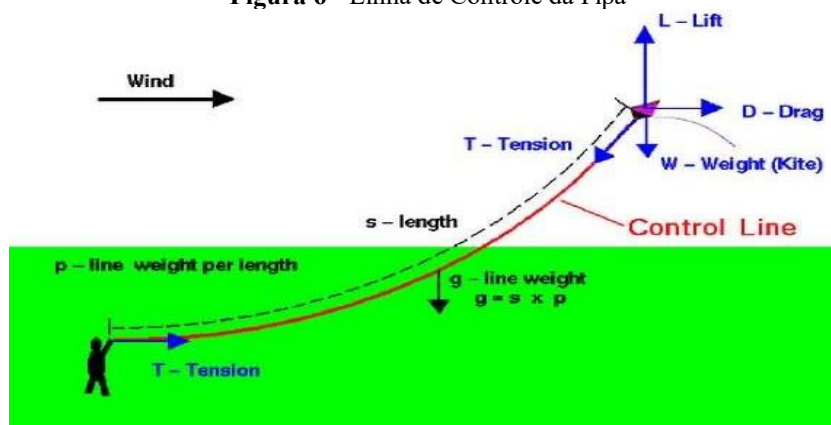
2.2.5 Linha de Controle

Uma linha da pipa ou linha de controle é a linha que conecta a pipa e condutor. O condutor pode controlar a pipa ao puxar e soltar a linha. Há linhas de pipa com diversos comprimentos, diâmetros e pesos, cada uma também têm características particulares. Hoje em dia tem-se disponíveis diferentes tipos de linhas para pipas. Além do mais, um dos fatores que afetam o desempenho de pipa é o comprimento da linha. Normalmente, o arrasto é maior em linhas mais longas que linhas mais curtas. No entanto, pipas com linhas mais longas viajam pela janela de potência em um arco mais longo, assim a resposta da pipa e sua velocidade será mais lenta. (A WIND OF CHANGE, [201-])

Além do mais, arcos maiores na janela de potência resultam em maior potência para as pipas, que será alcançado ao usar linhas mais longas. Assim, condutores de pipas para propulsão comumente fazem uso de linhas mais longas que condutores de pipas de acrobacia. Linhas mais curtas permitirão tirar a pipa mais rapidamente da zona de potência em ventos mais fortes. Por consequência linha curta é útil para o controle de pipas maiores. Por outro lado, em vento moderado as linhas mais longas possibilitam manter a pipa na janela de vento durante mais tempo. Normalmente, condutores de pipa de acrobacia fazem uso de linhas mais curtas, porque isso pode ajudar a melhorar o desempenho da pipa. (A WIND OF CHANGE, [201-])

Também é importante ressaltar que, o valor de tensão que a linha de controle da pipa pode suporta sem falhar é chamada, em muitas referências, de peso da linha (*line weight*), que está representada na Figura 6. Por conseguinte, pipas de propulsão requerem linhas com maior peso que pipas de acrobacia. (A WIND OF CHANGE, [201-])

Figura 6 - Linha de Controle da Pipa



Fonte: NASA, [201-].

2.2.6 Pipa Delta

Pipa delta, também conhecida como asa delta, é um tipo de pipa projetada normalmente com forma triangular simples, mas pode ter uma diversidade de modelos baseados na forma triangular. Um exemplo de pipa delta com duas linhas de controle pode ser vista na Figura 7. Pipas deltas podem voar em ventos fracos e usualmente com ângulos altos, o que é sua distinção entre outras pipas. Na maioria dos modelos as longarinas das asas de uma delta podem se mover livremente, pois não são presas ao nariz, assim a pipa pode montar correntes de ar por uma ação de auto direção. Em resumo, elas são fáceis de montar e usar. Porém, embora as pipas possam ter diferentes formas, elas são aerodinamicamente parecidas. (WHAT IS A DELTA, [201-])

Figura 7 - pipa delta



Fonte: MY BEST KITE, [201-].

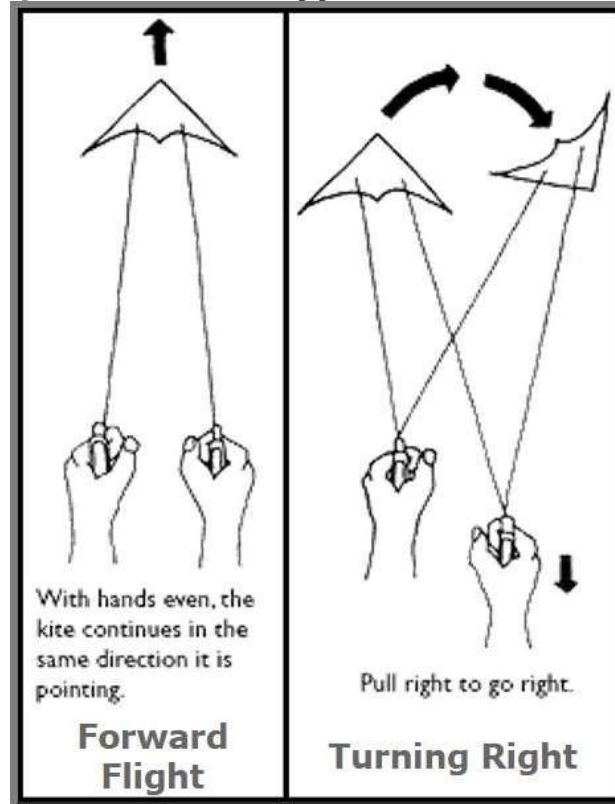
A pipa delta é comumente descrita pelos livros como derivada das pipas flexíveis de Rogallo, patenteada em 1948, que também foi quem desenvolveu a Asa Delta. Rogallo argumentou que as asas não deveriam ser rígidas, pois sendo flexíveis permite que sua forma seja influenciada pela corrente de ar. *Fantastic Kites* que se tornou Gayla Kites em 1961, foi a primeira indústria a fabricar e comercializar Pipas Delta. Já nos anos 70 as pipas delta estavam sendo testadas e desenvolvidas pela indústria American Flier (WEBSTER, []).

2.2.7 Pipa de Duas Linhas

Pipas de duas linhas normalmente são pipas manobráveis de acrobacias. Onde é possível controlar a pipa para qualquer direção com apenas movimentos das mãos. Normalmente, para virar a pipa para a direita, o condutor necessita puxar a mão direita para trás ou empurrar a mão esquerda para frente, do mesmo modo, para virar a pipa para a esquerda, o condutor necessita puxar a mão esquerda ou empurrar a mão direita (veja Figura 8). Além do mais, se pode combinar movimentos das mãos para

obter curvas de diversos estilos, exatas e rápidas. Assim, com esses movimentos, o condutor da pipa terá um melhor controle da mesma. Ademais, é possível mudar o ângulo de ataque ao regular o ponto de rédea da pipa. Para pipas de duas linhas, o ângulo de ataque também não pode ser regulado em voo, o próprio ângulo é uma característica peculiar do próprio voo. Ou seja, se regula o ponto de rédea para se obter um voo requerido. (A WIND OF CHANGE, [201-]).

Figura 8 - Controle de uma pipa com duas linhas de controle



Fonte: A WIND OF CHANGE, [201-].

2.3 ANÁLISE MATEMÁTICA

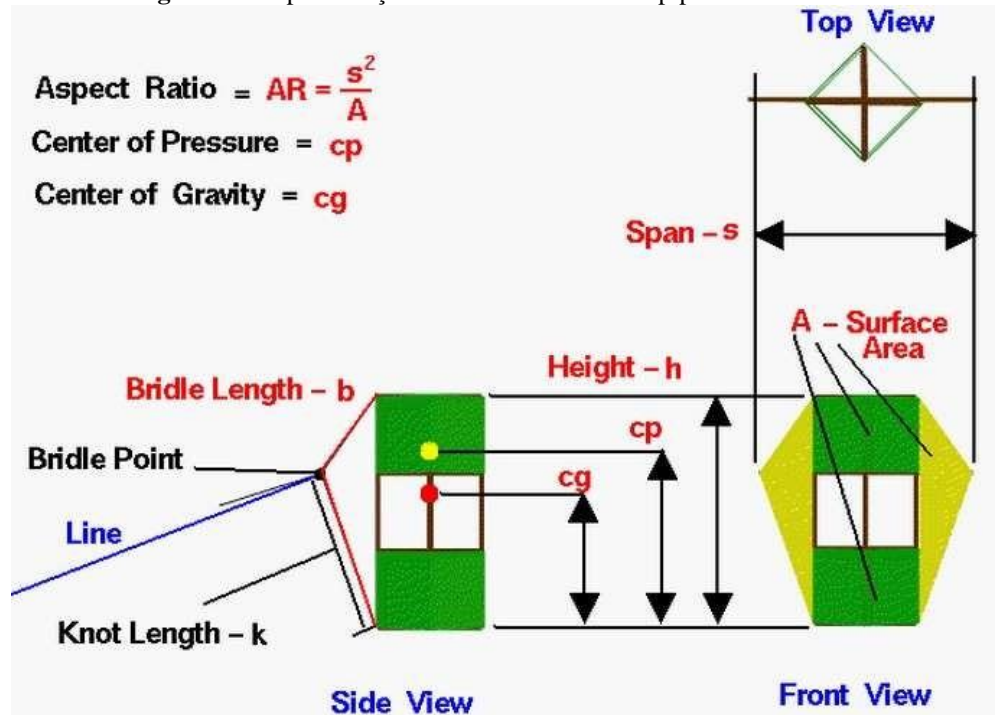
Nesta parte a análise matemática apresentada está somente em forma de equação. Os cálculos feitos para propósitos de comparação serão apresentados no próximo capítulo.

Os conceitos analíticos que serão apresentados nessa parte, foram retirados do website oficial da NASA – *National Aeronautics and Space Administration* disponível pelo link www.grc.nasa.gov. Onde os conceitos dados a seguir são considerados verdadeiros para a maioria dos tipos de pipas.

2.3.1 Geometria

As pipas são significativamente diversas em tipos e geometrias, e mudam em tamanho e formas. Porém, normalmente as definições a seguir são aplicadas para a maioria dos tipos de pipa. A área de superfície A (*surface area*) usada para calcular as forças aerodinâmicas que agem em uma pipa é a área projetada da vista frontal (*front view*), que é exemplificada na Figura 9.

Figura 9 – Representação das três vistas de uma pipa do modelo caixa



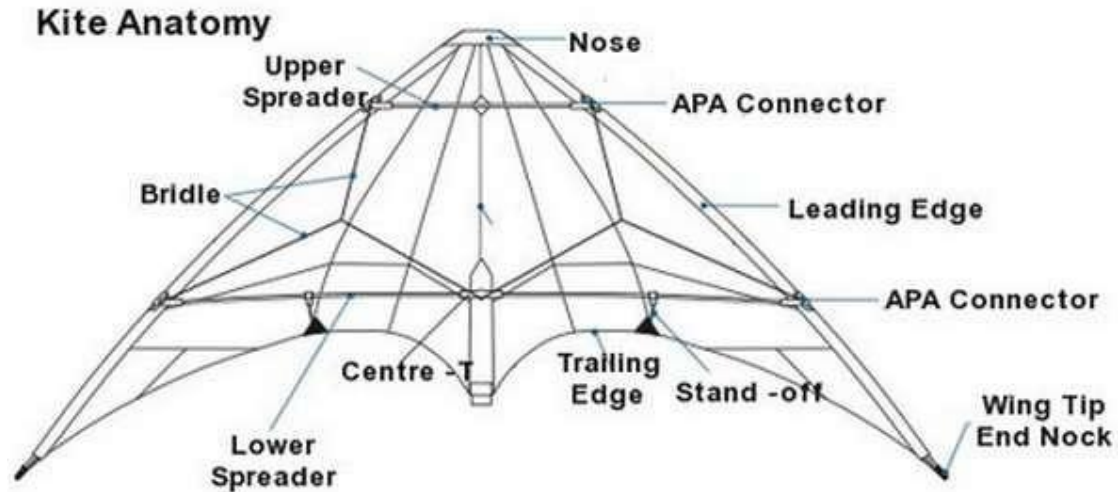
Fonte: NASA, [201-].

Para conferir a localização do centro de gravidade e do centro de pressão da pipa a melhor vista é a vista lateral (*side view*), uma vez que algumas pipas não são como placas planas, como por exemplo a pipa caixa alada, que pode ser vista na Figura 9. Além disso, as forças aerodinâmicas ficam situadas no centro de pressão cp (*center of pressure*) e no centro de gravidade cg (*center of gravity*), que é onde fica situada a força peso da uma pipa. Na vista lateral também é possível ver o ponto de rédea (*bridle point*). Em adição, o comprimento do fio de uma ponta presa no fundo à outra ponta presa ao topo, é chamado de comprimento de rédea b (*bridle length*) que sempre é maior que a altura h (*height*) da pipa porque é necessário que haja alguma folga neste fio. O ponto de rédea (*bridle point*) é onde a linha de controle é fixada à rédea em um ponto. A distância entre o fundo da pipa para o nó do ponto de rédea é o comprimento de nó k (*knot length*). Com o comprimento de nó k e o comprimento de rédea b , o local do ponto de rédea pode ser determinado. Além disso, a largura da pipa é chamado palmo (*span*), que é usado para calcular a relação de aspecto AR (*aspect ratio*) da pipa que é o quadrado do palmo dividido pela área de superfície.

$$AR = \frac{s^2}{A} \quad (1)$$

A figura a seguir, apresenta a vista frontal de uma pipa delta de duas linhas com os seus principais componentes.

Figura 10 - Vista frontal de uma pipa delta de duas linhas



Fonte: ROSE, 2016.

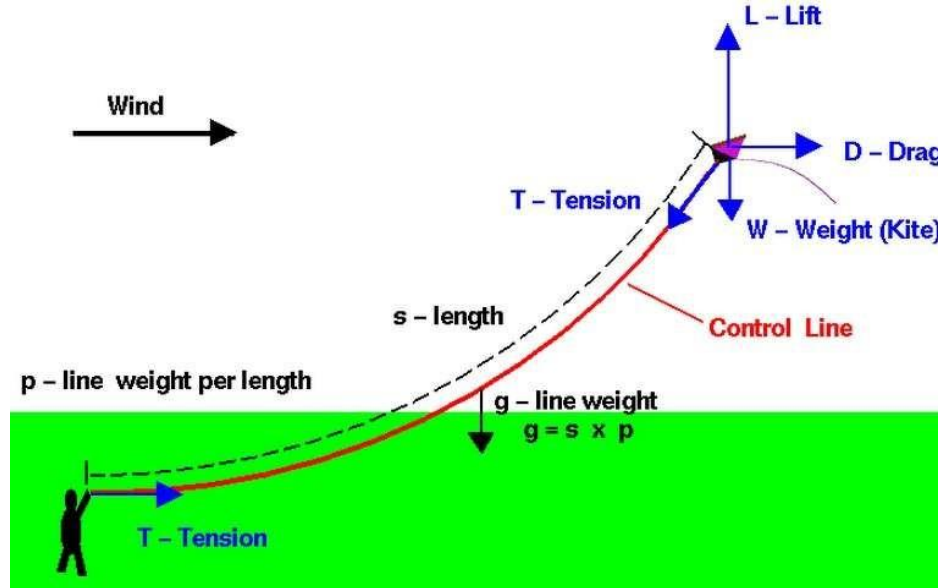
2.3.2 Linha de Controle

A pipa gira sobre o ponto de rédea quando está voando devido a um torque criado pelas forças aerodinâmicas. Assim, a tensão na linha é resultado da ação das forças devido ao controle da linha. Além disso, o peso total da linha de controle g (*line weight*) que pode ser visto na Figura 11 é designado por:

$$g = s * p \quad (2)$$

Onde s é o comprimento de linha da pipa (*length*) e p é o peso por comprimento de linha (*line weight per length*). A Figura 11 mostra a visão lateral com a pessoa ou controlador com uma pipa em voo e as quatro representações das forças principais atuantes na pipa, a sustentação L (*lift*), o arraste D (*drag*), o peso W (*weight*) e a tensão T (*tension*) na linha.

Figura 11 – Representações das forças atuantes sobre uma pipa em voo



Fonte: NASA, [201-].

2.3.3 Centro de Gravidade e Pressão

O centro de gravidade **cg** é a posição onde atua a força peso da pipa. Sabendo-se a localização deste, relativa a um referencia, de cada uma das partes da pipa, a incluir estrutura de varetas de superfície, pode-se então dizer que, o peso da pipa vezes a posição do **cg** desta é igual a soma do peso de cada parte multiplicada pela distância dessa parte a um referencial.

O centro de pressão **cp** é a posição média de pressão, onde as forças aerodinâmicas atuam. No entanto a pressão varia através de uma superfície, portanto o centro de pressão varia com o ângulo de ataque. Logo o centro de pressão pode ser calculado por:

$$cp = \frac{\int x p(x) dx}{\int p(x) dx} \quad (3)$$

Como as forças aerodinâmicas têm maior importância, para calcular o centro de pressão podemos desconsiderar o efeito da estrutura composta pelas varetas e focar apenas na área plana da pipa, as superfícies. Essas superfícies comportam-se como uma placa fina com baixa velocidade. Ao determinar o **cp** de cada superfície, o **cp** da pipa pode ser calculado como a área média ponderada de cada superfície. Assim **cp** será a soma da área da superfície da pipa multiplicada pela sua respectiva distância da linha de referência para a força, dividida pela área total da superfície. Versão utilizada no trabalho.

$$cp = \frac{\sum A_i d_i}{\sum A_i} \quad (4)$$



Em particular para perfis aerodinâmicos finos, as forças aerodinâmicas atuam sobre um ponto chamado de centro aerodinâmico onde o momento aerodinâmico mantém-se constante com o ângulo de ataque.

2.3.4 Ponto de Rédea

O ponto de rédea é o lugar onde a rédea e a linha de controle são unidas com um nó, e onde a pipa gira ao voar. O ângulo de compensação (*trim angle*) que a pipa voa e o balanço de torques na pipa são determinados pela localização do ponto de rédea relativo ao centro de pressão (*cp*) e ao centro de gravidade (*cg*). O comprimento da rédea *b* ou *B* é medido ao longo do fio de rédea, do topo para o fundo da pipa, como foi citado anteriormente. Ao se colocar um sistema de coordenadas X-Y fixo ao fundo da pipa, que pode ser visto na Figura 12, as coordenadas *Yb* e *Xb* do ponto de rédea são:

$$Yb = K * \cos(A) \quad (5)$$

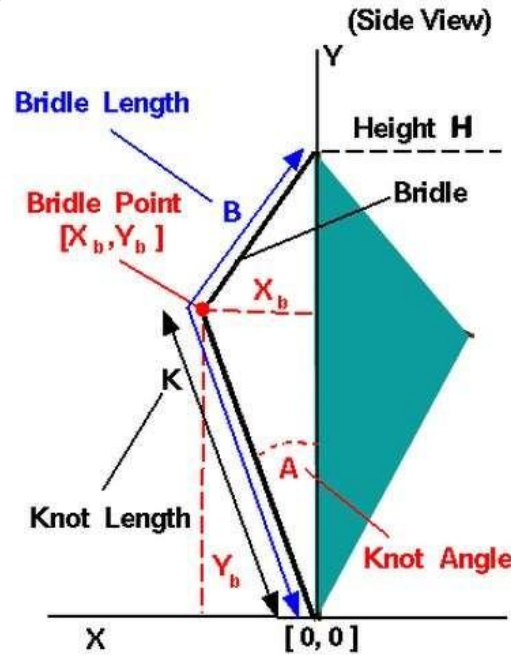
$$Xb = K * \sin(A), \quad (6)$$

onde *A* é o ângulo de nó (*knot angle*) com o eixo Y e *K* (*knot length*) o comprimento do nó. E a equação para determinação do ângulo de nó é:

$$\cos(A) = \frac{K^2 + H^2 - (B - K)^2}{2 * K * H} \quad (7)$$

sendo *H* é a altura da pipa, como mostra a Figura 12 a seguir.

Figura 12 - Coordenadas X-Y fixadas no fundo da pipa



Fonte: NASA, [201-].

2.3.5 Peso da Linha de Controle e da Pipa

O peso da pipa W está relacionado com o peso da superfície W_s e o peso da estrutura

$$W = W_s + W_f \quad (8)$$

$$W_s = d_s * A_s \quad (9)$$

$$W_f = d_f + L_f \quad (10)$$

O peso da superfície e o peso da estrutura é relacionado com a forma, tamanho e material que a pipa é feita. O tamanho e forma da superfície podem ser caracterizados como a área da superfície A_s e o material da superfície com sua densidade d_s . Também, podem ser caracterizados o tamanho e forma da estrutura como o comprimento de todas as varas usadas na estrutura L_f e o material de armação com a densidade d_f .

2.3.6 Forças Atuantes na Pipa

Há numerosos tipos de pipas com formas e tamanhos diferentes, porém as forças que agem na pipa são as mesmas para todos os tipos. As quatro principais forças que agem sobre a pipa, como citado anteriormente, são a sustentação L , o arraste D , o peso W e a tensão T na linha. A força de sustentação e arraste são forças aerodinâmicas que agem ao longo do centro de pressão, onde a sustentação atua perpendicular ao vento e o arraste age paralelo ao vento. Para simplificação, o vento é considerado constante e paralelo à superfície terra quando longe do chão. A força peso age no centro de gravidade



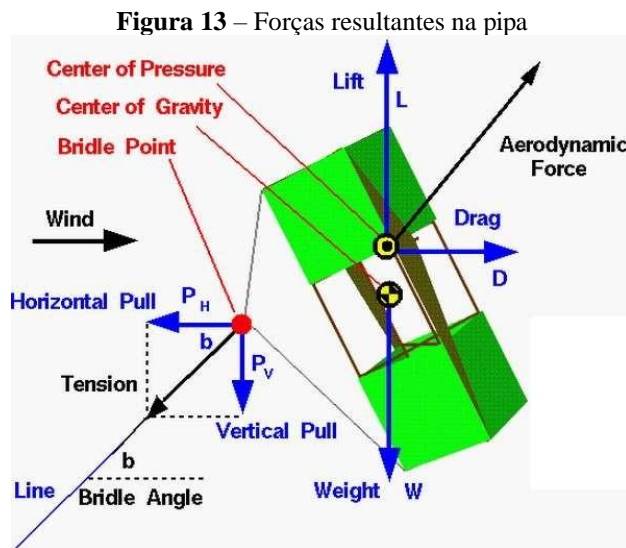
e a tensão na linha age ao longo do ponto de rédea. As forças persistem constantes enquanto a pipa está em um voo estável, assim não há forças externas resultantes. Ao dividir a tensão na linha em duas componentes, P_V e P_H , ver Figura 13, vertical e horizontal respectivamente, e usando a primeira lei de Newton de equilíbrio, é possível obter equações de equilíbrio na direção vertical e horizontal:

$$P_V + W - L = 0 \quad (11)$$

$$P_H - D = 0 \quad (12)$$

E o ângulo de rédea b é relacionado com as componentes de tensão P_V e P_H :

$$\tan(b) = \frac{P_V}{P_H} \quad (13)$$



Fonte: NASA, [201-].

Segundo a NASA, as forças em uma aeronave são iguais às forças em uma pipa. (NASA, [201-]). Por causa disto equações desenvolvidas para prever o desempenho de uma aeronave, podem ser usadas para prever o desempenho aerodinâmico de uma pipa, assim as equações abaixo para determinar sustentação e arrasto, podem ser usadas para pipas:

$$L = \frac{C_l * A * \rho * V^2}{2} \quad (14)$$

$$D = \frac{C_d * A * \rho * V^2}{2}, \quad (15)$$



onde C_l é o coeficiente de sustentação, o C_d é o coeficiente de arrasto, A é a área projetada, ρ é a densidade do ar e V é a velocidade relativa entre o vento e a pipa. Em geral a densidade do ar depende de onde se está na terra, uma vez que a densidade do ar diminui com o aumento da altitude. Isso explica porque aeronaves tem um *Flight Ceiling* ou uma altitude máxima que não se pode ultrapassar. A densidade do ar no nível do mar é dada por 1.229kg/m^3 .

As forças de sustentação e arrasto, dependem dos coeficientes de sustentação e arrasto respectivamente, para qualquer objeto. Esses coeficientes são normalmente determinados experimentalmente. No entanto, valores experimentais desses coeficientes para placas planas (C_{do} e C_{lo}) podem ser usados para pipas, uma vez que a maioria das pipas podem ser consideradas como placas planas finas e simples. Ao considerar que α é o ângulo de ataque da inclinação da pipa com o vento, os valores para C_{lo} e C_{do} são:

$$C_{lo} = 2\pi\alpha \quad (16)$$

$$C_{do} = 1.28 * \sin(\alpha) \quad (17)$$

A maioria das pipas tem uma baixa relação de aspecto AR uma vez que o comprimento da largura da mesma é muito pequeno comparado com o valor de sua área superficial. É importante saber como efeito de *downwash* afeta a pipa em voo, esse efeito, resumidamente é o fluxo de ar que se desloca para trás e para baixo que depende da natureza do perfil da asa, por causa da diferença de pressão perto das bordas da asa, o fluxo de ar flui da parte inferior para a superior, o que cria o *Downwash* que conseqüentemente muda o ângulo de ataque efetivo do fluido sobre uma parte da asa. Onde para pequenos valores de AR a porção da área afetada é maior que para grandes valores de AR . Assim deve-se incluir esse efeito no coeficiente de arrasto. Onde esse efeito para o coeficiente de arrasto é chamado de arrasto induzido da asa.

$$C_l = \frac{C_{lo}}{1 + \frac{C_{lo}}{\pi * AR}} \quad (18)$$

$$C_d = C_{do} + \frac{C_l^2}{0.7 * \pi * AR} \quad (19)$$



C_d é nomeado "arrasto devido à sustentação" ou arrasto induzido devido ao efeito *downwash* sobre o coeficiente de arrasto.

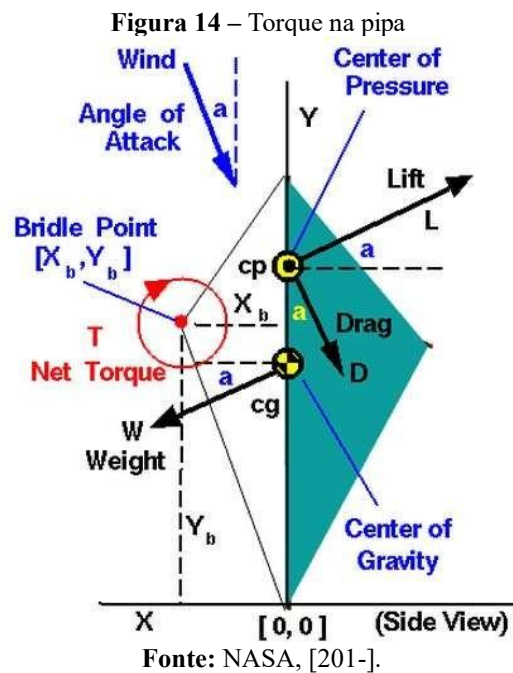
2.3.7 Torques na Pipa

Como citado anteriormente, a pipa gira sobre o seu ponto de rédea por causa das forças aerodinâmicas de sustentação e ataque e a força peso. Ponto sobre o qual o torque pode ser calculado ao saber a posição de cg e cp (centro de gravidade e pressão), o ângulo de inclinação do vento e a posição do ponto de rédea $[X_b, Y_b]$. Ao usar coordenadas X-Y, veja Figura 14, o torque ao redor do ângulo de rédea é:

$$\begin{aligned} T = & -[L * \cos(a) * (Y_b - cp)] \\ & - [L * \sin(a) * X_b] + [D * \cos(a) * X_b] \\ & - [D * \sin(a) * (Y_b - Cp)] \\ & + [W * \cos(a) * (Y_b - cg)] + [W * \sin(a) * X_b] \end{aligned} \quad (20)$$

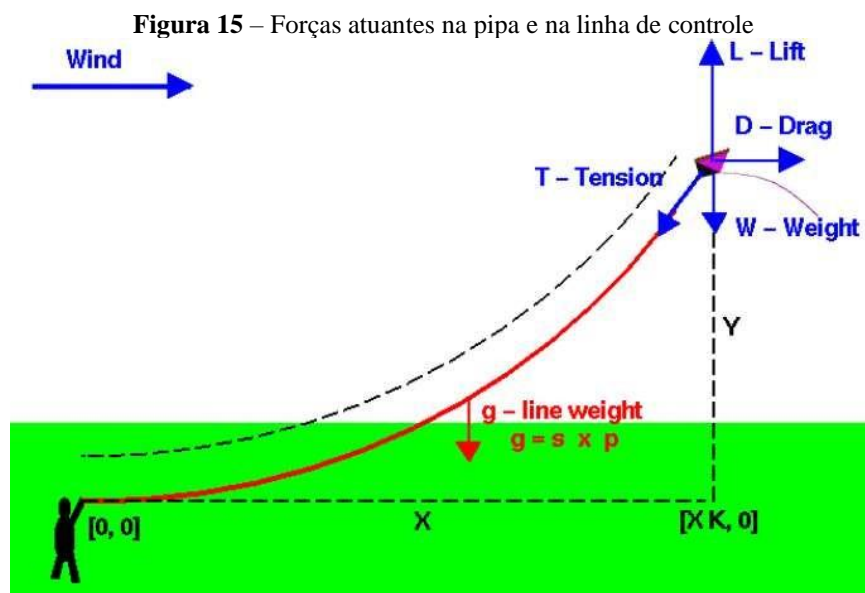
Onde a é o ângulo de ataque da pipa ou o ângulo de inclinação do sentido do vento com a superfície da pipa. De acordo com a Primeira Lei de Newton se as forças externas estão balanceadas, o corpo então se manterá em equilíbrio estático ($v = 0$) ou equilíbrio dinâmico ($v = constante$). O mesmo vale para momento, quando o torque resultante é nulo o corpo terá velocidade angular nula ou constante.

A Equação 20 acima é usada para determinação do ângulo a para quando o torque resultante é nulo. Nessas condições a é chamado de *Trim angle* da pipa. No entanto a medida que a pipa rotaciona em torno do ponto de rédea, o valor de a muda. Um projeto que não atinge o equilíbrio é dito não-balanceado. Para um projeto balanceado com as forças de sustentação e arrasto, existe então um ângulo (*Trim angle*) onde o torque resultante é nulo. Além do mais, se após uma perturbação a pipa retorna naturalmente à sua condição de equilíbrio, a mesma é dita como estável.



2.3.8 Altura da Pipa

As forças atuantes na pipa são regidas de acordo com as leis de Newton. Com a pipa em voo pode-se observar que a linha de controle produz uma curva delicada entre a mão do condutor e a pipa, assim a linha faz uma curva sob seu próprio peso. Através das equações que descrevem a curva da linha de controle pode-se determinar a altitude da pipa.



Além do mais, o peso da linha de controle g é distribuído uniformemente ao longo do seu comprimento, o que causa o seu caimento. Estabelece-se assim, um sistema de coordenadas, onde o eixo de X está posicionado ao longo do chão, o eixo Y perpendicular a este, e a origem fixa na mão do condutor da pipa. Como visto nas referências, há uma equação diferencial que descreve a transmissão



de forças ao longo de uma corda, onde ao se resolver essa equação, pode-se relacionar a forma da linha de controle ($Y(X)$) para a distribuição da tensão presente nesta linha de controle. A equação resultante é mostrada a seguir.

$$Y = C_2 + \frac{D}{p} \cosh\left(\frac{P}{D}X + C_1\right) \quad (21)$$

onde C_1 e C_2 são constantes das integrações. A equação acima é normalmente conhecida como Equação da Catenária. Esta tem como objetivo, descrever a curva dos cabos que flexionam sob o seu próprio peso. Tem-se como exemplos cabos de telefone, cabos em uma ponte de suspensão, e até mesmo uma corda de pular.

Para calcular C_1 e C_2 usa-se a condição de contorno $X=0$ e $Y=0$. Ao substituir os valores de X e Y na equação da Catenária dar-se a uma relação entre as duas constantes:

$$C_2 = -\frac{D}{p} \cosh C_1 \quad (22)$$

Assim, determinando C_1 , pode-se então obter C_2 . Para a determinação de C_1 primeiramente é feito a derivada da equação da Catenária, a Equação 21, em seguida toma-se como ponto de origem $X=0$, onde está situado a mão do controlador da pipa, assim temos:

$$\frac{dy}{dx} = \sinh\left(\frac{P}{D}X + C_1\right) \quad (23)$$

$$\frac{dy}{dx} = \sinh C_1 \quad (24)$$

Além do mais, pode-se então decompor infinitesimalmente a tensão da linha nos eixos X e Y , e aplicando a lei de Newton de equilíbrio temos que:

$$\sum F_x = 0 = D - dX$$

$$dX = D \quad (25)$$

$$\sum F_y = 0 = L - W - g - dY$$

$$dY = L - W - g. \quad (26)$$



Assim dY/dX :

$$\frac{dY}{dX} = \frac{L - W - g}{D} \quad (27)$$

Ao igualar a equação 27 anterior com a 24 e rearranjando os termos, temos:

$$C_1 = \sinh^{-1} \left(\frac{L - W - g}{D} \right). \quad (28)$$

Com os valores de C_1 e C_2 é possível então conhecer a função que descreve a curva que a linha de controle faz ao longo de todo o seu comprimento.

A pipa voa a uma distância k (no eixo X) do condutor da mesma. Em $X=k$ não se considera o peso da linha, assim se pode reescrever as equações 23 e 28.

$$\frac{dy}{dx} = \sinh \left(\frac{P}{D} k + C_1 \right) \quad (29)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{L - W}{D} \quad (30)$$

Ao igualar as equações anteriores e reorganizar, pode-se então prever a distância k :

$$k = \frac{D}{P} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{L - W}{D} \right) - C_1 \right] \quad (31)$$

Usando-se o valor de $X=k$ na equação da Catenária, pode-se então saber a qual altura a pipa voa, tal valor é:

$$Y(k) = -\frac{D}{p} \cosh(C_1) + \frac{D}{p} \cosh \left(\frac{p}{D} k + \sinh^{-1} \left(\frac{L - W}{D} \right) \right) \quad (32)$$

2.4 ANÁLISES MATEMÁTICAS PRECEDENTES PARA PIPAS

A seguir será apresentado pesquisas com análises matemáticas feitas anteriormente por pesquisadores que tiveram pipas como objeto de análise.

Um estudo conduzido por Argatov, Rautakorpi e Silvennoinen (2009) é um entre muitos estudos analíticos sobre produção de energia através da força dos ventos em altas altitudes por meio de pipas. Onde o propósito fundamental deste artigo é estimar a produção de energia mecânica de um gerador de energia eólico usando pipas. Neste estudo foi feito uma modelagem analítica de um gerador



denominado “*Pumping Kite Generetor*”, que faz uso de pipas fixas por linhas para conduzir mecanicamente um gerador elétrico com base fixa. Como resultado desse estudo foi obtido uma fórmula aproximada simples, para calcular a potência mecânica média produzida por pipas. Para concluir, eles apresentaram um exemplo que estimou o valor numérico para a geração de energia por uma pipa com parâmetros especificados. (ARGATOV; RAUTAKORPI; SILVENNOINEN, 2009)

Além do mais, há uma equação deste trabalho que é uma fórmula para calcular a força aerodinâmica F^{aer} que atua na linha de controle.

$$F_r^{aer} = \frac{1}{2} \rho_a A C_L G_e \sqrt{1 + G_e^2} (V_{\parallel} - V_L)^2 \quad (33)$$

$$G_e = \frac{L}{D + F_f} \quad (34)$$

Sendo ρ_a é a densidade do ar, A é a área característica da pipa, C_L é o coeficiente de sustentação, G_e é glide ratio efetivo, V_{\parallel} é o componente de velocidade de vento ao longo da linha de controle, V_L é a velocidade longitudinal da pipa e F_f é a força resultante na linha devido a sustentação e arrasto, conceitos que serão analisados posteriormente. Com esse trabalho eles concluíram que a força aerodinâmica F^{aer} é a maior força, de todas as outras forças que agem na linha de pipa.

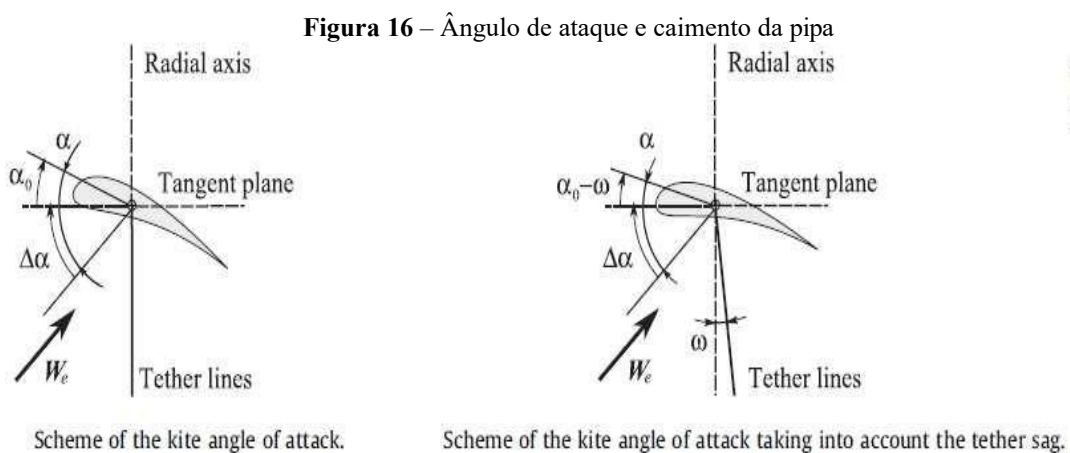
Em 2011, Argatov, Rautakorpi e Silvennoinen dirigiram outro estudo, onde mais uma vez a geração de energia através de pipas foi o assunto em questão. Porém a finalidade desse trabalho foi analisar o efeito da curva feita pela linha de controle da pipa sobre a eficiência da pipa de propulsão, o que não tinha sido estudado no trabalho anterior. O principal objetivo deste trabalho era fazer uma modelagem analítica dos efeitos aparentes da carga do vento sobre a linha que conecta a pipa ao gerador de energia. O método usado foi introduzir uma correção no ângulo de ataque da pipa devido a curva feita pela linha por uma fórmula analítica simples, o que fez uso de um modelo de orientação da pipa e do modelo matemático de uma corda bem esticada. Como principal resultado teve-se a dedução das fórmulas para a lei de movimento do vento cruzado refinado, o ângulo de ataque da pipa e o ângulo de caída da linha. Como conclusão, eles encontraram que o ângulo de caída da linha não dependia consideravelmente da velocidade do vento. Foi empregado algumas simplificações na modelagem analítica do efeito curva da linha. E também, foi assumido algumas hipóteses simplificadas na modelagem do efeito da carga aparente do vento. (ARGATOV; RAUTAKORPI; SILVENNOINEN, 2011)

Assim sendo, deste segundo trabalho há duas equações importantes:

$$\alpha = \alpha_0 - \omega + \Delta\alpha \quad (35)$$

$$\omega = \arctan \left(\frac{rdC_{\perp}}{4AC_L \cos(\tilde{\alpha})} \right) \quad (36)$$

A primeira fórmula é para calcular o ângulo de ataque da pipa α , onde α_0 é o ângulo base de ataque, ω é ângulo de caimento da linha e $\Delta\alpha$ é o ângulo entre o vetor efetivo do vento e o plano tangente (veja Figura 16 a seguir). Além disso, a segunda fórmula é para calcular o valor ângulo de caimento da linha, onde r é uma coordenada esférica, d é o diâmetro da linha, $\tilde{\alpha}$ é o ângulo de controle da pipa e C_{\perp} é o coeficiente de arrasto normal à linha (veja Figura 16).



Fonte: ARGATOV; RAUTAKORPI; SILVENNOINEN, 2011

2.5 ANÁLISE PRÁTICA PRECEDENTE COM PIPAS

A seguir será apresentado uma pesquisa com análises práticas feitas anteriormente por pesquisadores.

O estudo a seguir foi desenvolvido por Alexander e Stevenson em 2005. O objetivo do estudo foi medir propriedades aerodinâmicas de uma pipa e comparar com o desempenho da pipa. Há teste de operação rápida e resultados comparativos que pode estar imediatamente disponível, também sem a necessidade de túneis de vento. Neste trabalho a razão entre a força de sustentação e arrasto pode ser determinada ao voar uma pipa controlável em um dia sem vento, caminhando em pequenos círculos e voar a pipa em um círculo horizontal maior. Este teste melhora a precisão dos resultados ao mesmo tempo que reduz o tempo levado para cada teste. (STEVENSON; ALEXANDER; LYNN, 2005)

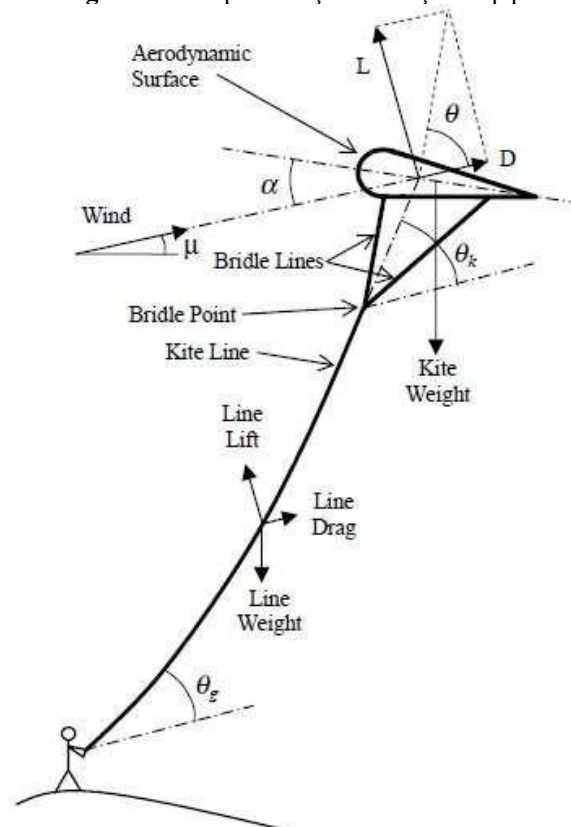
A equação da razão entre as forças de sustentação e arrasto, LTD_k , e para o ângulo da linha da pipa, θ_k , que consideram o peso de pipa e o ângulo μ do vento com o horizontal, apresentados neste artigo, pode ser visto a seguir.

$$LTD_k = \frac{L - m_k g \cos(\mu)}{D + m_k g \sin(\mu)} \quad (37)$$

$$\theta_k = \tan^{-1}(LTD_k) \quad (38)$$

Onde m_k é a massa da pipa e g é a gravidade. E a equação 38 é para calcular o ângulo da linha da pipa θ_k (veja Figura 17).

Figura 17 - Representação de forças na pipa



System diagram for a flying kite.

Fonte: STEVENSON; ALEXANDER; LYNN, 2005.

2.6 AVALIAÇÃO CRÍTICA

Todos os experimentos citados anteriormente fizeram uso de pipas nos seus trabalhos, por onde eles puderam obter importantes equações para uma análise aerodinâmica de pipas, esses estudos também conseguiram destacar os fatores que mais influenciam efetivamente a pipa em voo. Algumas dessas que são equações básicas serão utilizadas. Além disso, pôde-se notar que, a maioria dos trabalhos estudados acima usavam o potencial da pipa para geração de energia sustentável. Recentemente, pesquisas em geração de energia através de pipas aumentaram notavelmente, uma vez que pode ser usada como uma energia renovável.



3 METODOLOGIA

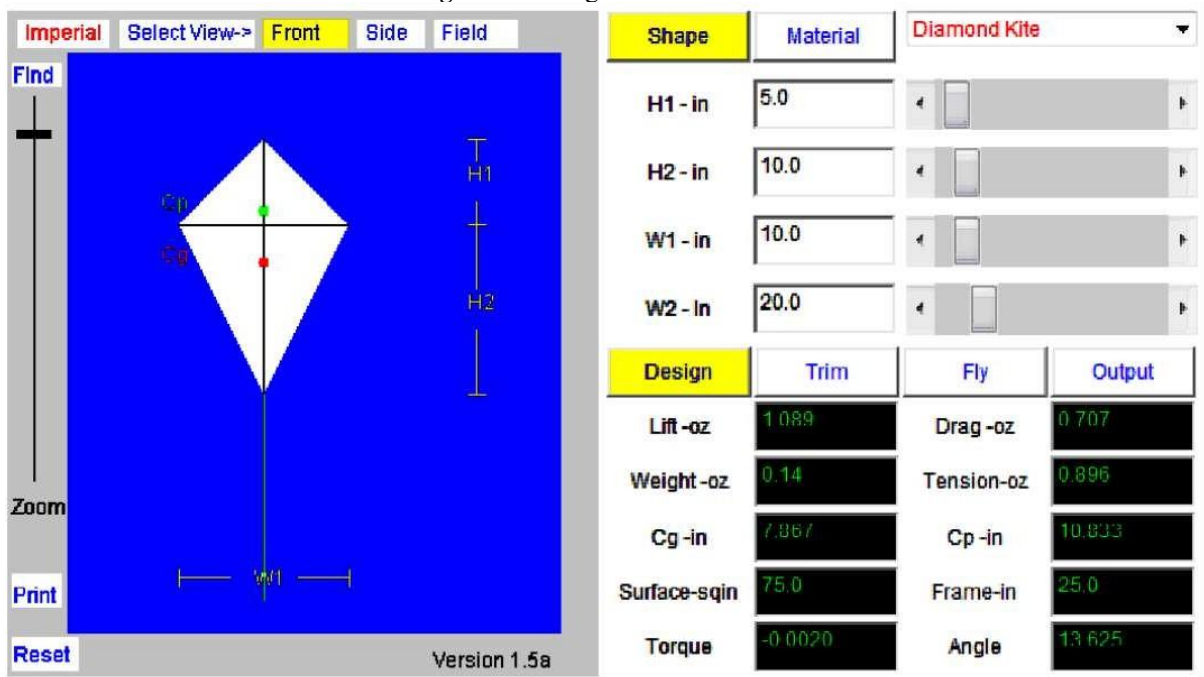
O método de pesquisa usado neste estudo foi dividido em três seções principais. Onde a primeira parte, já vista anteriormente, foi fazer um levantamento de conceitos importantes sobre pipas e buscar por estudos de pesquisas que tiveram a pipa como objeto de estudo. Além disso, a segunda parte fez um estudo analítico sobre aerodinâmica de pipas, onde fórmulas gerais e deduzidas de estudos citados na revisão de literatura, foram destacadas. Por fim, na terceira e última parte foi feito uma análise do modelo, pelo *software* Kite Modeler Program para analisar o projeto e voo da pipa. Por fim, depois de terminar as análises matemática e de modelo, eles serão comparados.

3.1 PROGRAMA KITE MODELER

Este é um software gratuito disponibilizado para download pela NASA Glenn Research Center. Com ele, pode-se obter análises físicas e matemáticas que descrevem o voo de uma pipa. Dentro dele, pode-se escolher o tipo de pipa e mudar a sua forma, tamanho e material. Além de poder mudar o valor de algumas variáveis que afetam o projeto e imediatamente ver as novas características do voo da pipa. Além do mais esse programa indica se o projeto da pipa é estável ou não e ele também calcula o quão alto a pipa voará.

O layout da tela do software é de simples entendimento e pode ser visto na Figura 18 a seguir. Do lado esquerdo da tela tem uma janela gráfica para ver o desenho da pipa. No lado direito na parte de baixo está o painel de controle e saídas, assim pode-se selecionar o modo “*Design*”, “*Trim*”, “*Fly*” ou “*Output*”. Por fim, no lado direito na parte superior está o painel de entradas onde escolhe-se as dimensões e material da pipa. Onde no local das entradas tem-se o fundo branco e no de saídas o fundo preto.

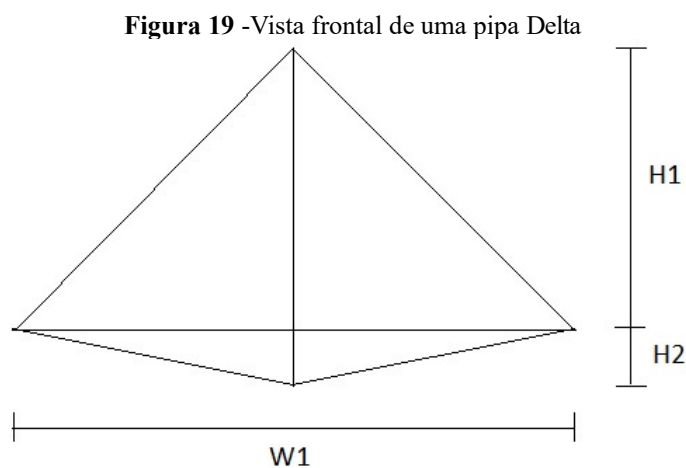
Figura 18 - Programa Kite Modeler



Fonte: NASA, [201-].

3.2 DADOS GEOMÉTRICOS E DE MATERIAIS DA PIPA

Nessa primeira abordagem foi usada uma pipa delta simples com apenas uma linha de controle, onde a vista frontal pode ser visualizada na Figura 19 a seguir.



A tabela 1 a seguir, apresenta as dimensões da pipa de acordo com a figura anterior.



Tabela 1 – Forma da Pipa

Dimensões da pipa		
H1	50	cm
H2	10	cm
W1	100	cm
B	70	cm
Comprimento da Linha	20	M

Os materiais usados para análise da pipa foram escolhidos de acordo com os materiais disponíveis a serem usados no Kite Modeler Program, para uma melhor comparação posterior. A Tabela 2 a seguir mostra resumidamente esses dados.

Tabela 2 - Materiais Utilizados

Componente	Materiais	Densidade	Unidade
Superfície	Plástico	0,0021	g/cm ²
Estrutura	1/4 balsa	0,0441	g/cm
Linha	Nylon	0,3720	g/cm

Com os dados geométricos e dos materiais pode-se então calcular a relação de aspecto, Equação 1, o centro de pressão, Equação 4, o centro de gravidade, peso da linha de controle e peso da pipa. Os valores estão resumidos nas tabelas 3, 4, 5, 6 e 7 a seguir.

Tabela 3 - Relação de Aspecto

<i>Aspect Ratio</i>		
s	100,00	cm
A	3000,00	cm ²
AR	3,33	

Tabela 4 - Linha de Controle

Peso da linha de controle		
s	2000,00	cm
p	0,37	g/cm
g	7299,57	g
p'	0,36	N/m
g'	71,61	N

Tabela 5 - Peso da Pipa

Peso da pipa		
As	3000,0000	cm ²
ds	0,0021	g/cm ²
df	0,0441	g/cm ²
Lf	141,4210	cm
Ws	0,0615	N
Wf	0,0612	N
W	0,1226	N



Tabela 6 - Centro de Pressão

Centro de Pressão		
A1	2500,00	cm ²
A2	500,00	cm ²
d1	26,67	cm
d2	6,67	cm
cp	23,33	cm

Tabela 7 - Centro de Gravidade

Centro de gravidade		
Pe	0,06	N
de	35,00	Cm
Ps1	0,05	N
ds1	26,67	Cm
Ps2	0,01	N
ds2	6,67	Cm
W	0,12	N
cg	29,15	Cm

A partir desses dados pode-se então fazer as análises e pelo Kite Modeler. Para fazer as análises serão usados cinco valores distintos do comprimento de nó **K** e quatro valores para velocidade do vento **V**. Os seus respectivos valores podem ser vistos na tabela 8 a seguir.

Tabela 8 - Valores de K e V

K	52,5	43,75	35	26,25	17,5	cm
V	5	10	13	15		m/s

Também para análise, será assumido que o local em que a pipa voa está ao nível do mar com temperatura de 15 °C. Assim sendo, terá altitude zero e densidade do ar de 1.225 kg/m³.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 PRIMEIRA ABORDAGEM: *KITE MODELER*

A seguir serão apresentadas tabelas com valores obtidos através do programa kite Modeler. Esses resultados são os parâmetros de saída do programa, que para fornecer esses valores precisa-se fornecer os parâmetros de entrada, que são os parâmetros geométricos fixados anteriormente na Tabela 1, condições do ambiente como altitude e velocidade do vento, e por fim selecionar os materiais da superfície, estrutura e linha de controle, que estão resumidos na Tabela 2.

Como os valores do centro de pressão, centro de gravidade, área da superfície e comprimento total das varetas da estrutura não variam com a mudança da velocidade do vento, esses valores serão apresentados na tabela 9 a seguir com seus valores respectivos a cada valor do comprimento de nó **K**.

**Tabela 9** - Valores de *cg*, *cp*, *As* e *L*

K (cm)		52,5	43,75	35	26,25	17,5
cg	cm	29,154	29,154	29,154	29,154	29,154
cp	cm	33,333	33,333	33,333	33,333	33,333
As	cm ²	3000	3000	3000	3000	3000
L (varetas)	cm	141,421	141,421	141,421	141,421	141,421

Por fim, as tabelas que seguem, trazem vinte valores de força de sustentação, força de arrasto, força peso, tensão na linha de controle, ângulo *Trim*, torque, distância e altura da pipa. Cada valor refere-se a combinação de uma velocidade do vento e um comprimento de nó. Para melhor apresentação, tem-se a seguir quatro tabelas, cada uma referente a um valor de velocidade do vento. No entanto dentro de cada tabela tem-se cinco colunas para cada valor de comprimento de nó.

Tabela 10 - Parâmetros de Saída para V=5m/s

Velocidade do vento		5 m/s				
Comprimento K (cm)		52,5	43,75	35	26,25	17,5 Propriedade
Unidade		Valor				
L	N	0,1881	0,4366	15,9728	0,0629	0,0595
W	N	0,1226	0,1226	0,1226	0,1226	0,1226
D	N	0,0395	0,0954	11,9131	0,0129	0,0129
T	N	0,0395	0,2592	19,7697	0,0129	0,0129
Ângulo Trim	graus	0,3750	0,8750	48,0000	0,1250	0,1250
Torque	N.m	-0.0005	-0.0013	-0.0052	-0.0010	-0.0099
Distancia X	m	13,0000	6,0000	12,0000	0,0000	0,0000
Altura Y	m	10,0000	18,0000	16,0000	0,0000	0,0000
Estabilidade		Estável	Estável	Estável	Instável	Instável

Pela Tabela 10 acima, pode-se perceber que tem-se um aumento nos valores das forças a medida que se diminui o comprimento de nó (*K*). No entanto para o comprimento de nó metade do comprimento de rédea (*K*=35) houve aumento (pico) nos valores das forças calculadas, notando-se uma discrepância muito grande.

Tabela 11 - Parâmetros de Saída para V=10m/s

Velocidade do vento		10 m/s				
Comprimento K (cm)		52,5	43,75	35	26,25	17,5
Propriedade	Unidade	Valor				
L	N	0,2514	0,5022	63,6662	66,0983	66,0983
W	N	0,1226	0,1226	0,1226	0,1226	0,1226
D	N	0,0518	0,1044	47,3699	50,4597	0,1226
T	N	0,0761	0,3239	79,1986	83,0020	83,0020



Ângulo						
Trim	Graus	0,1250	0,2500	47,2500	47,2500	47,2500
Torque	N.cm	-0,0130	-0,0045	-0,0201	-0,0201	-0,0201
Altura X	M	10,0000	5,0000	12,0000	12,0000	12,0000
Distancia Y	M	17,0000	19,0000	16,0000	16,0000	16,0000
Estabilidade		Estável	Estável	Estável	Instável	Instável

Para o comprimento de nó maior que a metade do comprimento de redea ($K > 35$) observou-se valores plausíveis para as forças aerodinâmicas, porém para os demais valores de K as forças foram muito grandes e o programa apontou uma instabilidade da pipa.

Tabela 12 - Parâmetros de Saída para $V=13\text{m/s}$

		Velocidade do vento		13	m/s	
Comprimento K (cm)		52,5	43,75	35	26,25	17,5
Propriedade	Unidade	Valor				
L	N	0,4249	0,4249	107,5959	111,7061	111,7061
W	N	0,1226	0,1226	0,1226	0,1226	0,1226
D	N	0,0875	0,0875	80,0552	85,2769	85,2769
T	N	0,2454	0,2454	133,9539	140,3806	140,3806
Ângulo						
Trim	Graus	0,1250	0,1250	47,2500	47,2500	47,2500
Torque	N.cm	-0,0470	-0,0010	-0,0502	-0,0502	-0,0502
Altura X	M	6,0000	6,0000	12,0000	12,0000	12,0000
Distancia Y	M	18,0000	18,0000	16,0000	16,0000	16,0000
Estabilidade		Estável	Estável	Estável	Instável	Instável

Para $V=13\text{m/s}$ as observações são as mesmas dos resultados para $V=10\text{m/s}$.

Tabela 13 - Parâmetros de Saída para $V=15\text{m/s}$

		Velocidade do vento		15	m/s	
Comprimento K (cm)		52,5	43,75	35	26,25	17,5
Propriedade	Unidade	Valor				
L	N	0,5657	0,5657	142,9953	148,7211	148,7211
W	N	0,1226	0,1226	0,1226	0,1226	0,1226
D	N	0,1165	0,1165	106,2641	113,5344	113,5344
T	N	0,3880	0,3880	177,9994	186,9488	186,9488
Ângulo Trim	Graus	0,1250	0,1250	47,1250	47,1250	47,1250
Torque	N.cm	-0,0746	-0,0075	-0,0020	-0,0020	-0,0020
Altura X	m	5,0000	5,0000	12,0000	12,0000	12,0000
Distancia Y	m	19,0000	19,0000	16,0000	16,0000	16,0000
Estabilidade		Estável	Estável	Estável	Instável	Instável

Para $V=15\text{m/s}$ as observações são as mesmas dos resultados para $V=10\text{m/s}$.



4.2 SEGUNDA ABORDAGEM: ANÁLISE MATEMÁTICA

A seguir será mostrado os resultados analíticos obtidos através dos cálculos que utilizam as equações apresentadas na revisão de literatura. Os cálculos foram feitos pelo Excel e é apresentado somente o resultado.

Semelhante ao exposto na análise anterior, como os valores do centro de pressão, centro de gravidade, ângulo de nó, coordenadas do ponto de rédea, coeficientes para placas planas e coeficiente de sustentação e arrasto não variam com a mudança da velocidade do vento, esses valores serão apresentados na tabela a seguir com seus valores respectivos a cada valor do comprimento de nó **K**.

Tabela 14 - Valores de *K, A, Xb, Yb, Clo, Cdo, Cl* e *Cd*

Ângulo de nó						
K	52,5	43,75	35	26,25	17,5	cm
cos(A)	0,960317	0,919048	0,857143	0,753968	0,547619	
A	0,282658	0,405139	0,5411	0,716714	0,99128	rad
Coordenadas do ponto de rédea						
Xb	14,64274	17,24391	18,02776	17,24391	14,64274	cm
Yb	50,41667	40,20833	30	19,79167	9,583333	cm
Coeficiente para placas planas						
Clo	0,041123	0,095954	5,263789	0,013708	0,013708	
Cdo	0,008378	0,019547	0,951225	0,002793	0,002793	
Coeficiente de sustentação e arrasto						
Cl	0,039404	0,087088	0,799354	0,013511	0,013511	
Cd	0,008589	0,020582	1,038392	0,002817	0,002817	

O ângulo de ataque usado para esta análise matemática será igual ao ângulo de ataque calculado pelo programa Kite Modeler a fim de comparar os resultados. A tabela a seguir mostra esses valores para sua respectiva velocidade e comprimento de rédea.

Tabela 15 - Ângulo de Ataque

Comprimento K		cm	52,5000	43,7500	35,0000	26,2500	17,5000
V=5m/s	a	Graus	0,3750	0,8750	48,0000	0,1250	0,1250
V=10m/s	a	Graus	0,125	0,125	47,25	47,25	47,25
V=13m/s	a	Graus	0,125	0,125	47,25	47,25	47,25
V=15m/s	a	Graus	0,125	0,125	47,25	47,25	47,25

Por fim, também semelhante a abordagem anterior, as tabelas que seguem, trazem vinte valores de força de sustentação, força de arrasto, tensão na linha de controle e suas coordenadas *Pv* e *Ph* (vertical e horizontal) e o ângulo de rédea. Cada valor referente a combinação de uma velocidade do vento e um comprimento de nó. Para melhor apresentação, tem se a seguir quatro tabelas, cada uma referente a um valor de velocidade do vento. No entanto dentro de cada tabela tem-se cinco colunas para cada valor de comprimento de nó.

Tabela 16 - Resultados para $V=5\text{m/s}$

		Velocidade do vento		5		m/s
K	cm	52,5	43,75	35	26,25	17,5
L	N	0,1810	0,4001	3,6720	0,0621	0,0621
D	N	0,0395	0,0945	4,7701	0,0129	0,0129
Pv	N	0,0584	0,2774	3,5494	-0,0606	-0,0606
Ph	N	0,0395	0,0945	4,7701	0,0129	0,0129
B	rad	0,9763	1,2423	0,6397	-1,3603	-1,3603
T	N	0,0395	0,0945	4,7701	0,0129	0,0129

Os resultados da Tabela 16 mostram que para a velocidade do vento moderada os valores calculados são parecidos com os valores gerados pelo Kite Modeler, exceto para os valores gerados para o comprimento de nó metade do comprimento de rédea ($K=35$), onde houve uma grande discrepância.

Tabela 17 - Resultados para $V=10\text{m/s}$

		V(m/s)		10		m/s
K	cm	52,5	43,75	35	26,25	17,5
L	N	0,2483	0,4895	14,6528	14,6528	14,6528
(N)						
D	N	0,0518	0,1044	18,8653	18,8653	18,8653
(N)						
Pv	N	0,1256	0,3669	14,6528	14,6528	14,6528
Ph	N	0,0518	0,1044	18,8653	18,8653	18,8653
b	rad	1,1799	1,2935	0,6604	0,6604	0,6604
T	N	0,1359	0,3814	23,8873	23,8873	23,8873

Aumentando a velocidade do vento, notou-se que apenas para valores de comprimento de nó maior que a metade do comprimento de rédea os valores calculados e gerados pelo programa foram bem próximos. Já para os demais valores de K os resultados foram bem diferentes. Notando-se ainda, a mesma discrepância comentada anteriormente para $K=35$.

Tabela 18 - Resultados para $V=13\text{m/s}$

		V(m/s)		13		m/s
K	cm	52,5	43,75	35	26,25	17,5
L (N)	N	0,4196	0,4196	24,7632	24,7632	24,7632
D (N)	N	0,0875	0,0875	31,8823	31,8823	31,8823
Pv	N	0,2969	0,2969	24,6406	24,6406	24,6406
Ph	N	0,0875	0,0875	31,8823	31,8823	31,8823
b	rad	1,2842	1,2842	0,6580	0,6580	0,6580
T	N	0,3095	0,3095	40,2944	40,2944	40,2944

Para $V=13\text{m/s}$ os resultados comportaram-se como os resultados para $V=10\text{m/s}$.



Tabela 19 - Resultados para $V=15\text{m/s}$

		V(m/s)		15	m/s	
K	cm	52,5	43,75	35	26,25	17,5
L (N)	N	0,5586	0,5586	32,9688	32,9688	32,9688
D (N)	N	0,1165	0,1165	42,4468	42,4468	42,4468
Pv	N	1,5065	3,4779	32,9256	0,4360	0,4360
Ph	N	0,3551	0,8509	42,9310	0,1165	0,1165
b	rad	1,3393	1,3308	0,6543	1,3097	1,3097
T	N	1,5477	3,5805	54,1033	0,4513	0,4513

Para $V=15\text{m/s}$ os resultados também comportaram-se como os resultados para $V=10\text{m/s}$.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como já esperado, pode-se observar que para as principais forças atuantes na pipa, sendo elas a força de sustentação, arrasto e peso, houve um aumento do seu valor quando diminuindo o valor do comprimento de nó e/ou aumentando a velocidade do vento.

O valor do centro de gravidade deu-se igual para ambas as análises, no entanto o valor do centro de pressão deu uma diferença de 10 cm, sendo maior o calculado pelo programa Kite Modeler.

Quanto as forças de sustentação, arrasto e peso, para $V=5\text{m/s}$ teve-se valores muito parecidos para os respectivos valores de K, exceto para $K=35\text{cm}$ entre as análises. No qual o Kite Modeler gerou um valor deste muito maior que o calculado. Para as demais velocidades os valores das forças deram valores parecidos para $K=52.5\text{cm}$ e $K=43.75\text{cm}$. Para os demais valores de K deu-se uma discrepância muito grande entre o gerado pelo Kite Modeler e o valor calculado. Seria necessária uma revisão sistemática para determinar o porquê de tal discrepância.

Evidentemente, baseado nos resultados, quanto ao ponto de rédea sua melhor configuração se deu com valores maiores que 35cm, ou seja, valores maiores que a metade do comprimento da rédea. A escolha dessa localização dar-se a parti da finalidade do uso da pipa.

5 CONCLUSÃO

É fato que aeronaves e pipas são mais pesadas que o ar, assim elas dependem das forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto para voar. Este trabalho mostrou que fatores como condição do ambiente e geometria da pipa tem uma influência significativa no desempenho da mesma.

Através da lei de movimento de Newton, foi possível obter que os fatores que afetam a tensão na linha de controle são a força de sustentação, a força de arrasto e a força peso. No entanto, levando em consideração à ordem de grandeza dessas forças, tem-se que a força de sustentação é a que mais influência na tensão resultante na linha. Consequentemente tem-se então como vetor mais importante da análise aerodinâmica de pipas, a localização do ponto de rédea, que afeta diretamente o ângulo de ataque, onde este é determinante no cálculo dos coeficientes aerodinâmicos. Não se pode então desconsiderar as características do ambiente, tais como densidade do ar e a velocidade do vento, visto



que estes fatores também afetam diretamente o cálculo de forças de sustentação e arrasto, e indiretamente através do efeito downwash nos coeficientes aerodinâmicos.

Todavia, esse trabalho pode ser consideravelmente complementado, através de análises mais profundas com revisões sistemática, análise numéricas, assim como análises experimentais.



REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, K.; STEVENSON, J. A test rig for kite performance measurement. *Journal Of Engineering Manufacture*. 1 abr. 2001. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B*. p. 595-598.
- DAVISON, G, Kites in the Classroom: Physical aspects. 2014. Disponível em <<http://abstractstrategygames.blogspot.com.br/2014/01/physical-aspects-aspects-physiques.html>>. Acesso em 22 out. 2014.
- ARGATOV, I.; RAUTAKORPI, P.; SILVENNOINEN, R. Estimation of the mechanical energy output of the kite wind generator. *Renewable Energy Journal*. 20 jan. 2009. 34(6). p. 1525-1532.
- ARGATOV, I.; RAUTAKORPI, P.; SILVENNOINEN, R. Apparent wind load effects on the tether of a kite power generator. *Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 19 ago. 2011. 99(10). p. 1079-1088.
- A WIND OF CHANGE. Two line stut kite Bridle Adjustments, dual line kites, kites bridles, bridle setting. [201-]. Disponível em <<http://www.awindofchange.com/lessons/lesson2-4.html>>. Acesso em 11 out. 2015.
- A WIND OF CHANGE. Kite lesson, wind basics, wind knowledge, wind window. [201-]. Disponível em <<http://www.awindofchange.com/lessons/lesson1-2.html>>. Acesso em 11 out. 2015.
- A WIND OF CHANGE. Kite lesson, wind basics, wind knowledge, wind window. [201-]. Disponível em <<http://www.awindofchange.com/lessons/lesson2-4.html>>. Acesso em 11 out. 2015.
- A WIND OF CHANGE. Kite lesson, kite lines, flying line, control line, line help, kite line length. [201-]. Disponível em <<http://www.awindofchange.com/lessons/lesson1-4.html>>. Acesso em 11 out. 2015.
- A WIND OF CHANGE. How to fly a kite, kite control, steering a kite, flying a kite. [201-]. Disponível em <<http://www.awindofchange.com/lessons/lesson2-4.html>>. Acesso em 11 out. 2015.
- ROSE, A. Anatomy of a Stunt Kite. 08 nov. 2016 Disponível em <<https://www.canadiankitecompany.com/blogs/tie-to-the-sky/anatomy-of-a-stunt-kite>>. Acesso em 16 dez. 2016.
- WHAT IS A DELTA?. [201-]. Disponível em <<http://www.deltas.freemove.co.uk/whatsadelta.html>>. Acesso em 11 Out. 2015.
- DIEHL, M.; MAGNI, L.; NICOLAO, G. de. Efficient NMPC of unstable periodic systems using approximate infinite horizon closed loop costing. *Annual Reviews In Control*, 24 jan. 2004. 28(1), p. 37-45.
- MAXWELL, E. Kite: Aeronautics. 2013. Disponível em <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/319666/kite?sections=31>>. Acesso em 11 out. 2015.
- FAGIANO, L.; MILANESE, M.; RAZZA, V.; GERLERO, I. Control of power kites for naval propulsion. In: *AMERICAN CONTROL CONFERENCE*. 30 jun. 2010. Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA. p. 4325-4330.



NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Kites. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kite1.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Kite Construction. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitepart.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Kite Launch and Flight. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitefly.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Kite Balance and Stability. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitestab.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Kite Torque Equation. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitetrim.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Control Line. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kiteline.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Torques on a Kite. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitetor.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Downwash Effects on Lift and Drag. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitedown.html>>. Acessado em 11 Out. 2014. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Inclination Effects on Lift and Drag. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kiteincl.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Kite Lift Equations. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitelift.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Aerodynamics of a Kite. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kiteaero.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Kite Drag Equations. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitedrag.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Forces on a Kite. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitefor.html>>. Acessado em 11 Out. 2015.



NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Newton's First Law Applied to a Kite. [201-]. Disponível em < <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/newton1k.html> >. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Bridle Point Geometry Definitions. [201-]. Disponível em < <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitebrid.html> >. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Control Line Equations. [201-]. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitesag.html> >. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Kite Geometry Definitions. [201-]. Disponível em < <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitegeom.html> >. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. Determining Kite Weight. [201-]. Disponível em < <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kitewt.html> >. Acessado em 11 Out. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. KiteModeler 1.5a beta. [201-]. Disponível em < <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kiteprog.html> >. Acessado em 11 Out. 2015.

MY BEST KITE, Kite Stunts, Become An Aerobatic Pilot Without Leaving The Ground!. [201-]. Disponível em <<http://www.my-best-kite.com/kite-stunts.html>>. Acessado em 11 out. 2015.

NAAIJEN, P.; KOSTER, V. Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite, jan. 2007. Seção C. p. 45-53. Disponível em < https://www.researchgate.net/publication/242139969_Performance_of_auxiliary_wind_propulsion_for_merchant_ships_using_a_kite >. Acessado em 20 out. 2015.

RUSSELL, J. Level 4 Art & Design: Kite Project. 6 nov. 2012. Disponível em <<http://jamie-leejaderussell.blogspot.com.au/2012/11/kite-project.html>>. Acessado em 11 out. 2015.

RAY, K. The Origin of Kites. SACU's China Eye magazine. 2004. Disponível em <<http://www.sacu.org/kitehistory.html>>. Acessado em 11 out. 2015.

STEVENSON, J.; ALEXANDER, K.; LYNN, P. Kite performance testing by flying in a circle. Aeronautical Journal. Jun. 2005. 109(1096). p. 269-276.

WEBSTER, G. Delta Kites-History, Development and Design. The kiteflier, Issue 88. p. 13- 17.