

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EFEITO DA PERMEABILIDADE DO TECIDO NO DESEMPENHO DE PIPAS DE POTÊNCIA
TIPO LEI

por

Tao Hasse

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

Hasse, Tao

EFEITO DA PERMEABILIDADE DO TECIDO NO DESEMPENHO DE
PIPAS DE POTÊNCIA TIPO LEI / Tao Hasse. -- 2021.

15 f.

Orientadora: Adriane Prisco Petry.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Airborne Wind Energy. 2. Energia eólica. 3.
Pipas de potência. 4. Permeabilidade. 5. CFD. I.
Prisco Petry, Adriane, orient. II. Título.

Tao Hasse

EFEITO DA PERMEABILIDADE DO TECIDO NO DESEMPENHO DE PIPAS DE POTÊNCIA
TIPO LEI

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof^ª. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Bardo E. Joseff Bodmann

Prof. Diogo Elias da Vinha Andrade

Porto Alegre, maio de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

EFEITO DA PERMEABILIDADE DO TECIDO NO DESEMPENHO DE
PIPAS DE POTÊNCIA TIPO LEI

Hasse, Tao

taohasse@gmail.com

Resumo. *Pipas LEI (do inglês, Leading Edge Inflatable) têm sido estudadas para geração de energia eólica com aerofólios cabeados devido a sua versatilidade e o baixo custo de fabricação e instalação. No entanto, o tecido envelhece, aumentando sua permeabilidade, o que pode comprometer o voo da pipa, reduzindo a potência gerada. Este trabalho usa CFD para avaliar o efeito do aumento da permeabilidade do tecido de uma pipa tipo LEI nos coeficientes de sustentação deste perfil aerodinâmico. A solução numérica é feita por RANS em regime permanente em domínio bidimensional, usando o modelo de turbulência $k-\omega$. Para representar a permeabilidade do tecido é adotado o modelo de Darcy. O objetivo é avaliar como o envelhecimento do tecido afeta a capacidade de geração de potência. Considerando uma permeabilidade ao ar de 50 litros por minuto por metro quadrado sob pressão de dois mil Pascal, observa-se expressiva redução no coeficiente de sustentação e, conseqüentemente, a potência gerada na fase de tração é reduzida em 77% se a pipa operar em Cl máximo.*

Palavras-chave: *pipas de potência, aerofólios cabeados, energia eólica, permeabilidade de tecidos*

Effect of fabric permeability on power LEI kite performance

Abstract. *LEI kites have been researched for airborne wind energy (AWE) generation due to its flexibility and low cost of production and installation. However, as the fabric ages its permeability increases, which can affect the kite's flight, reducing its power output. This work uses CFD to evaluate the effect of increasing fabric permeability on LEI kite lift coefficient. The numerical solution uses steady RANS with $k-\omega$ in a bidimensional domain. Darcy's law is used to model the permeability. This work aims to assess the effect of fabric ageing on power generation potential. With 50 liter per minute per square meter of air permeability under two thousand Pascal, the lift coefficient is greatly reduced and the power output at traction drops 77% if the kite is operating at maximum Cl .*

Keywords: *Power kites, Airborne Wind Energy, fabric permeability*

NOMENCLATURA

Símbolos

AoA	Ângulo de ataque	[°]
C_L	Coefficiente de sustentação	[]
C_{Dc}	Coefficiente de arrasto do cabo no aerofólio	[]
C_{Dw}	Coefficiente de arrasto do aerofólio	[]
$C_{lmáx}$	Maior valor de coeficiente de sustentação para o perfil. Coincide com o ângulo de estol neste trabalho.	[]
u_i	Componente x da velocidade	[m/s]
u_j	Componente y da velocidade	[m/s]
p	Pressão do fluido	[Pa]
G	Fator de eficiência equivalente	[]
V_w	Velocidade do vento	[m/s]
T_k	Tração da pipa	[N]
P_k	Potência em função da velocidade do carretel	[W]
P	Potência máxima (ótima)	[W]
G_k	Produção de energia cinética turbulenta	
G_ω	Produção da taxa de dissipação específica	
Y_k	Dissipação de energia cinética turbulenta	
Y_ω	Dissipação da taxa de dissipação específica	

Símbolos gregos

ρ	Massa específica do fluido. Constante em 1.225 kg m ⁻³ para este trabalho.	[kg m ⁻³]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido. Constante em 1.7894e-05 Pa s para este trabalho.	[Pa s]
μ_r	Viscosidade relativa	[]
μ_{ef}	Viscosidade efetiva no meio poroso	[Pa s]
α	Permeabilidade	[m ²]

Γ_k	Difusividade de k	
θ	Ângulo de inclinação do cabo	[°]
φ	Porosidade, ou fração volumétrica de fluido	[]

Abreviaturas e acrônimos

LEI	Leading Edge inflatable	
CFD	Computational fluid dynamics	
HAWT	Aerogeradores de eixo horizontal (do inglês, <i>horizontal axis wind turbine</i>)	
VAWT	Aerogeradores de eixo vertical (do inglês, <i>vertical axis wind turbine</i>)	
WPD	Densidade de potência eólica (do inglês, <i>Wind Power Density</i>)	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
AWE	Aerogeradores com aerofólios cabeados (do inglês, <i>Airborne Wind Energy</i>)	
CFRP	Polímero reforçado com fibra de carbono (do inglês, <i>Carbon fiber reinforced polymer</i>)	
RANS	Equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (do inglês, <i>Reynold Averaged Navier-Stokes</i>)	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO	6
2.1. Potência em AWE de sustentação	7
2.2. Abordagem numérica	8
2.2.1. Modelagem da turbulência	8
2.2.2. Modelagem da permeabilidade	9
3. METODOLOGIA	10
3.1. Domínio computacional e condições de contorno	10
4. RESULTADOS	13
4.1. Validação da metodologia	13
4.2. Impermeável X Permeável	15
5. CONCLUSÕES	17
6. REFERÊNCIAS	18
APÊNDICE	19
ANEXOS	20

1. INTRODUÇÃO

Airborne Wind Energy é uma nova tecnologia para conversão de energia eólica que utiliza aerofólios cabeados para aproveitar o vento em alturas mais elevadas. As turbinas mais comuns hoje são de rotor horizontal conhecidas com HAWT e seu uso é justificado pela alta eficiência comparada com outros modelos e pela confiabilidade adquirida ao longo dos anos dessas turbinas. O custo da energia produzida por essas turbinas caiu e a potência aumentou devido aos avanços em materiais compósitos nas últimas décadas. É possível aumentar a potência gerada aumentando o diâmetro e elevando a altura do rotor.

A figura 1.1 mostra a evolução do diâmetro e da altura do rotor para turbinas HAWT. Na mesma figura se observa que a altura média das turbinas mudou pouco nos últimos anos.

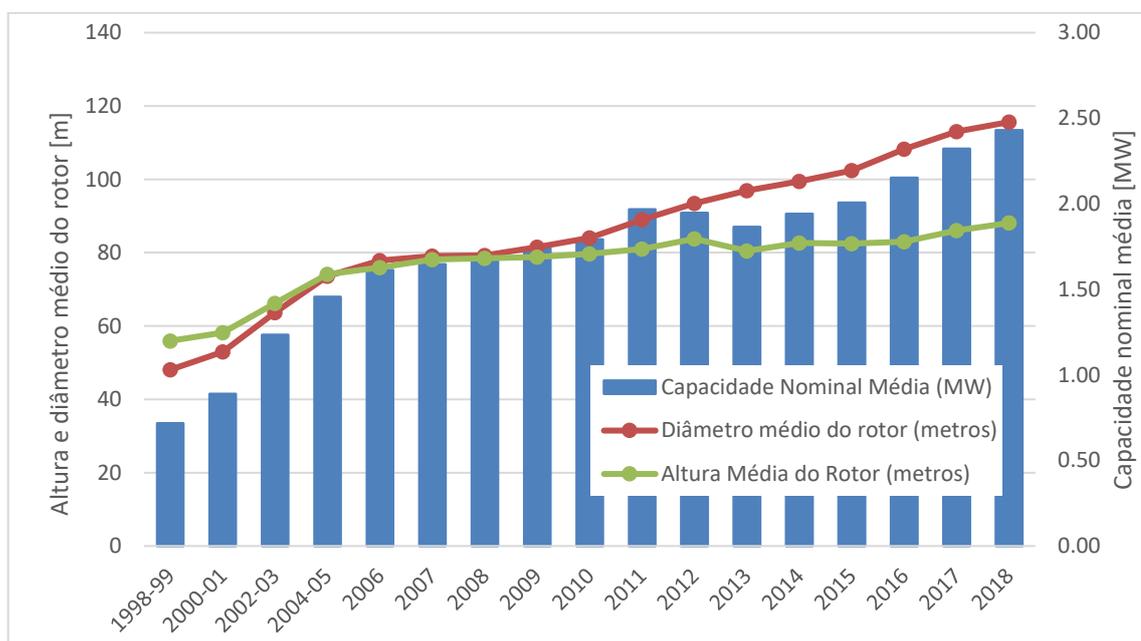


Figura 1.1: Evolução da capacidade Nominal, altura e diâmetro do rotor. Retirado de 2018 Wind Technologies Market Report.

Nas turbinas HAWT a maior parte da potência é gerada nas extremidades das pás, já que essa parte corta o ar com velocidade mais alta. O momento na base da torre é proporcional à força imposta no rotor e à altura da torre. Esse momento na base da torre limita, de certa forma, a altura em que essas torres podem operar e também os locais, pois o solo é o que sustenta esses esforços na base.

Com aerofólios cabeados, o momento na base é muito reduzido e a estrutura é mais leve porque não existe a necessidade da torre. Ainda, o aerofólio pode ser imaginado como a extremidade da pá de uma turbina HAWT, livre da parte mais interna que conecta ao cubo. Então, de certa forma, o sistema AWE simplifica uma turbina convencional e abre novas possibilidades de aproveitamento de energia eólica.



Figura 1.2: Sistema AWE de sustentação com pipa tipo Foil. Observa-se que a base é pequena e a unidade de potência cabe em um contêiner padrão. Na direita o sistema opera offshore. Retirado de <https://skysails-power.com/onshore-units/> e Fonte:

A demanda por energia deve continuar crescendo e é necessário encontrar formas de suprir essa demanda. Com a pressão das mudanças climáticas é importante buscar alternativas renováveis e sustentáveis para produzir energia limpa e de baixo custo para que ela seja competitiva com outras fontes. AWE é uma alternativa para explorar energia eólica, que é uma fonte renovável de grande potencial. Com aerofólios cabeados é possível aproveitar o vento mais forte e consistente de camadas mais elevadas na atmosfera. Ao observar que a densidade de potência do vento cresce com o cubo da velocidade (equação 1) e que a velocidade do vento aumenta com a altura em relação ao solo, fica claro o potencial energético do sistema com aerofólios cabeados. A figura 1.2 mostra como a densidade de potência do vento cresce com a altitude para um local da Europa.

$$WPD = \frac{1}{2} \rho V_w^3 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

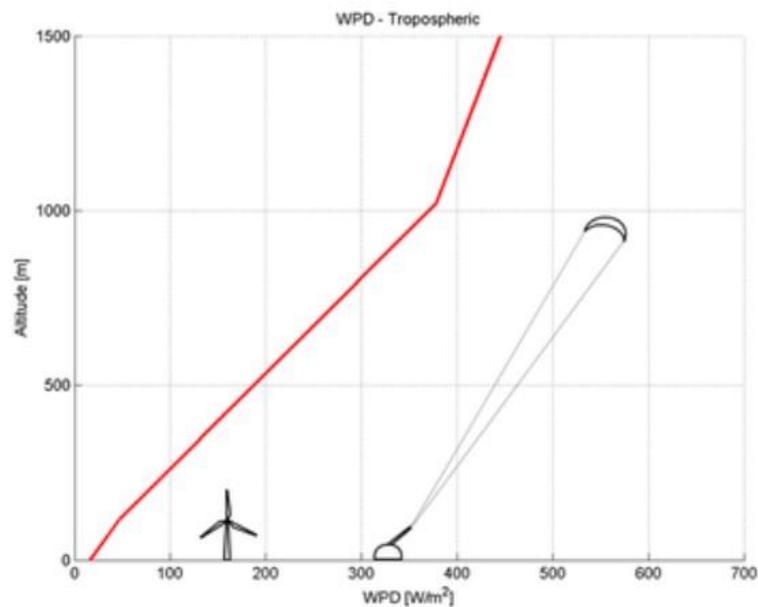


Figura 1.3: Comparação entre HAWT e AWE com a densidade de potência do vento (WPD) traçada em vermelho. Retirado de <https://www.antonellocherubini.com/why-airborne-wind-energy.html>.

É importante notar que a formação da camada limite atmosférica é um fenômeno complexo e que o perfil de velocidades varia muito de um lugar para outro. Cherubini (2017) compara o perfil de densidade de potência eólica da imagem com o perfil de uma distribuição logarítmica de velocidades crescendo com a altura e mostra uma otimização para a altura de operação do aerofólio cabeado. Essa otimização resulta em cerca de 1000 metros para o local analisado e cerca de 300 metros para a distribuição logarítmica.

Além do potencial energético de voar mais alto, o sistema AWE pode ser mais barato e fácil de fabricar porque exige uma estrutura menor, o que facilitaria a adaptação para uso em águas profundas.

Classificando de acordo com forças responsáveis pela potência gerada, existem dois sistemas de aerofólios cabeados: o de sustentação e o de arrasto. No sistema de sustentação, o aerofólio traciona um cabo que é conectado a algum tipo de gerador em solo. Este pode ser simplesmente um carretel acoplado a um alternador, um vagão sobre trilhos, um barco etc. A figura 1.4 mostra algumas.

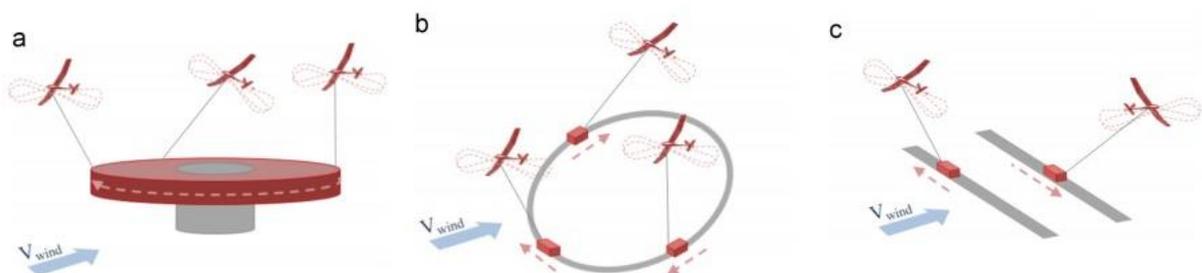


Figura 2.4: Alguns sistemas AWE de sustentação alternativos ao carretel. Retirado de Cherubini (2015)

No sistema de arrasto os geradores são instalados no aerofólio e geram potência causando arrasto no sistema. A figura 1.5 mostra algumas opções.

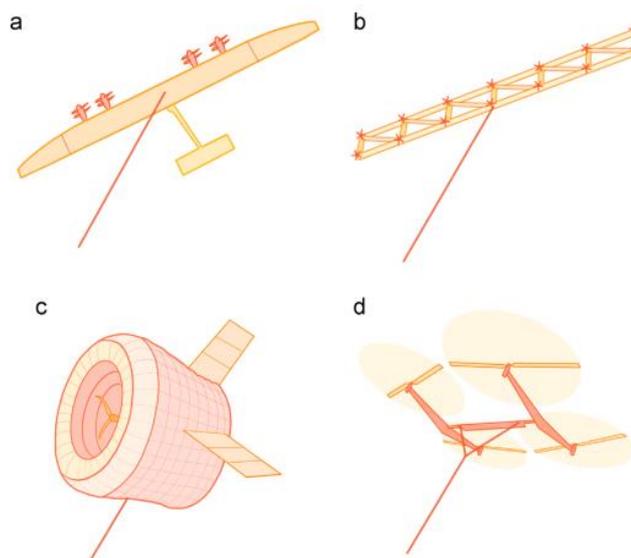


Figura 2.5: Sistemas AWE de arrasto. Retirado de Cherubini (2015).

Neste trabalho é considerado o sistema de sustentação mais simples: uma pipa conectada a um carretel que é acoplado a um gerador elétrico. Essa configuração também é conhecida como sistema de bombeamento porque tem uma fase de potência e uma fase de recuperação em que o gerador atua como motor, rebobinando o cabo. Nesta configuração a potência gerada na fase de tração pode ser estimada pela equação 2, que indica a dependência da potência com a sustentação pelo coeficiente de sustentação. A figura 1.6 ilustra o mecanismo.

$$P = \frac{1}{2} \rho (V_w \cos \theta)^3 \frac{4}{27} G^2 C_L A \quad (2)$$

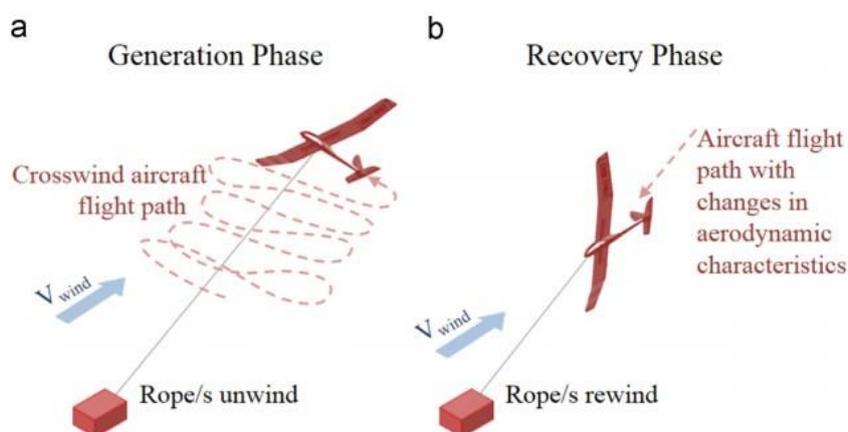


Figura 2.6: Sistema AWE de sustentação, com gerador acoplado ao carretel no solo. Imagem retirada de Cherubini (2015)

A pipa LEI, apresentada na figura 1.7, é um tipo de aerofólio que pode ser usado no sistema AWE de sustentação. Outros tipos são a pipa foil, que é semelhante a um parapente, dispositivos rígidos semelhantes a aviões e configurações que combinam a pipa LEI com a geometria típica de um avião. A pipa LEI recebe esse nome do inglês “Leading Edge Inflatable”, que significa bordo de ataque inflável. Essa pipa usa uma estrutura inflável composta do bordo de ataque e de talas transversais para dar forma ao aerofólio que é completado por uma cobertura de tecido. A pressão do vento exerce uma função complementar na forma do perfil e essa interação fluido-estrutural é negligenciada neste trabalho para simplificar a análise.

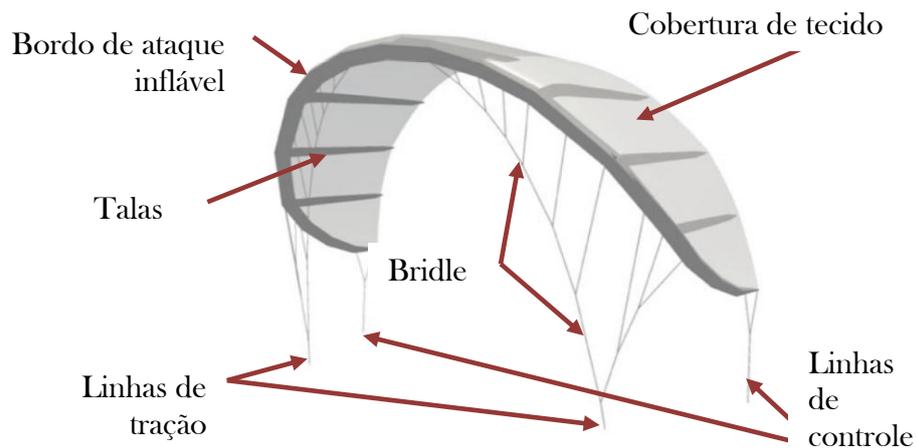


Figura 1.7: Pipa LEI. Retirado de Folkersma (2019).

A maior vantagem da pipa LEI é a simplicidade. Ela é fácil, rápida e barata de construir. Outra vantagem importante é o peso reduzido já que o peso da asa tem impacto negativo na potência e no vento mínimo para operar devido à característica tênsil da estrutura. O custo baixo de fabricação e instalação dessa pipa é uma grande vantagem; no entanto, a durabilidade é reduzida quando comparada com sistemas rígidos.

O tecido da pipa LEI é feito, geralmente, de poliéster com impermeabilização polimérica na parte superior. O impermeabilizante serve para evitar que o ar atravesse o tecido da cobertura, reduzindo a sustentação. É intuitivo pensar que um tecido mais permeável na cobertura produza menos sustentação, mas esse efeito nunca foi analisado nesse tipo de pipa. É importante conhecer o comportamento da sustentação de uma pipa com tecido permeável porque o tecido envelhece e o impermeabilizante degrada, aumentando a permeabilidade ao ar. Então, se a permeabilidade tiver um impacto grande na sustentação, isso implicaria na troca mais frequente dessas pipas. O que poderia pôr em risco a viabilidade econômica desse modelo de aerofólio. Além da pipa LEI, qualquer aerofólio fabricado em tecido sofre da mesma limitação.

Sabe-se que esse tipo de tecido e impermeabilizante degradam com a exposição ao sol, umidade, manuseio e esforços mecânicos. Os tecidos de pipas LEI são semelhantes aos de parapente, especialmente na impermeabilização. Ambos tecidos são de poliamida, poliéster ou nylon, em malha ripstop para evitar a propagação de rasgos. Menguç (2018) testou tecidos de parapente expostos ao sol por 150 horas e, nesse período, a permeabilidade não foi afetada. Esse tempo é muito pequeno para um sistema AWE que deve operar 24 horas por dia. O experimento não testou esforços mecânicos e umidade. Ainda, para sistemas AWE pode ocorrer abrasão com partículas suspensas na atmosfera.

Devido à preocupação com o envelhecimento do tecido em parapentes, a permeabilidade do tecido é controlada durante inspeções por motivo de segurança. Segundo o manual de inspeções do fabricante de parapentes Dudek Inc. (2011), a permeabilidade é controlada porque além de um determinado valor, a asa é insegura para voo por ficar muito propensa a colapsos, já que a asa de parapente tem sua forma sustentada apenas pelo vento, que infla as células gerando uma pressão interna capaz de estabilizar a asa. Quando a permeabilidade atinge certo valor, a pressão dentro das células cai porque o ar pode escapar através do tecido. A tabela 1 traz os valores para as permeabilidades de referência do fabricante Dudek Inc.

Tabela 1: Valores de referência para permeabilidade de tecidos de parapente. A permeabilidade do tecido ao ar é geralmente medida em l/min/m² sob 2 kPa de pressão. Retirado de Manual de inspeção de parapentes Dudek Inc. (2011)

Permeabilidade [l/min/m ² @2kPa]	Estado do tecido do parapente
0-20	Estado de novo
20-50	Excelente
50-100	Bom
100-150	Satisfatório
150-300	muito gasto, mas ainda seguro para voo
300 +	Desgastado, não seguro para voo

Maslanka (2019; 2020) analisou numericamente o efeito da permeabilidade do tecido na sustentação, arrasto e pressão interna das células de uma asa de parapente. A asa de parapente é muito diferente da pipa LEI, especialmente porque no parapente há duas camadas de tecido com pressão interna positiva em relação ao exterior. Na análise de Maslanka (2020) a sustentação e o arrasto tiveram valores levemente reduzidos com a permeabilidade, mas a pressão interna foi reduzida de forma mais expressiva, potencialmente impossibilitando voo para os valores mais altos de permeabilidade.

Não foram encontrados trabalhos relacionando a permeabilidade do tecido com o desempenho de pipas LEI, ou de qualquer dispositivo gerador de sustentação formado por uma única camada de tecido. Assim, os estudos para asas de parapente de Maslanka são usados como ponto de partida para este trabalho.

É esperado que a sustentação da pipa diminua com o envelhecimento, mas não é clara a intensidade ou velocidade com que isso ocorre, então o objetivo deste trabalho é lançar luz sobre o comportamento da sustentação de pipas LEI quando a permeabilidade do tecido aumenta devido ao envelhecimento e avaliar o impacto disso na potência de um sistema AWE de sustentação.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Potência em sistema AWE de sustentação

Intuitivamente é fácil perceber que a potência de um sistema AWE de sustentação é proporcional à tração do cabo e que esta tração é proporcional à força de sustentação da pipa. Na introdução foi apresentada uma equação para a potência de um sistema deste tipo, aqui será detalhado como a expressão é obtida.

Cherubini (2015), explica que a expressão para máxima potência da fase de tração desse sistema é obtida pela otimização analítica da velocidade de liberação do carretel,

considerando alta eficiência aerodinâmica equivalente, voo através ao vento em regime permanente ao ângulo azimutal zero em relação à direção do vento. Conforme o triângulo de velocidades na figura, V_k , V_a e V_w^* representam as velocidades da pipa, do vento aparente na pipa e do vento sentido pela pipa. A velocidade do vento sentido pela pipa, V_w^* , é definida pela equação 3:

$$V_w^* = V_w \cos \theta - V_r \quad (3)$$

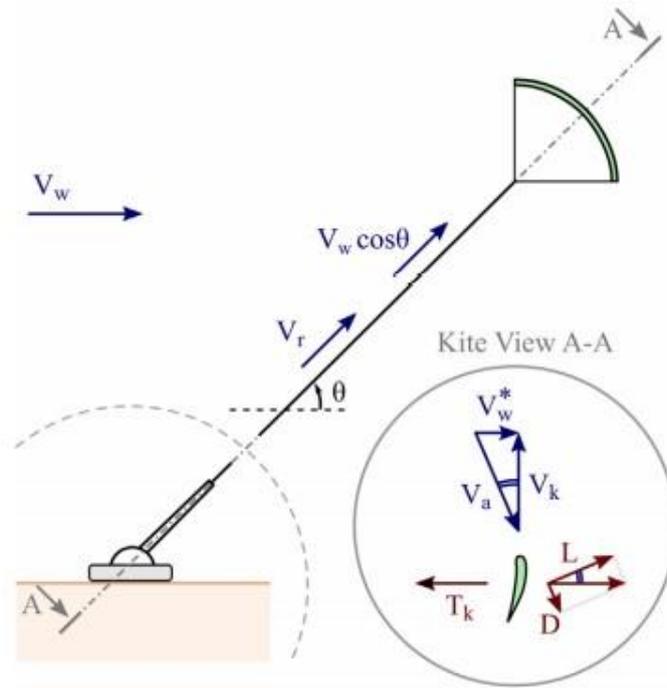


Figura 2.2: Modelo do sistema AWE de sustentação. Retirado de Cherubini (2015).

em que V_w é a velocidade do vento, θ o ângulo de inclinação do cabo e V_r é a velocidade de liberação do carretel, ou seja, a velocidade linear com que o cabo se desloca na direção da pipa. Por equilíbrio, $V_k = V_w^* G$ e seguindo a hipótese de alta eficiência aerodinâmica, $V_k \cong V_a$. G representa a eficiência aerodinâmica equivalente e é definida em seguida. A tensão no cabo é obtida impondo equilíbrio na pipa e fica conforme a equação 4 abaixo.

$$T_k = \frac{1}{2} \rho V_w^* 2G^2 C_L A \quad (4)$$

E a potência segue:

$$P_k = T_k V_r = \frac{1}{2} \rho (V_w \cos \theta - V_r)^2 V_r G^2 C_L A \quad (5)$$

Maximizando a expressão se obtém que a velocidade ótima de liberação do carretel é de $V_r = 1/3 V_w \cos \theta$ e a potência máxima resulta na equação 6.

$$P = \frac{1}{2} \rho (V_w \cos \theta)^3 \frac{4}{27} G^2 C_L A \quad (6)$$

E a eficiência aerodinâmica equivalente é:

$$G = \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_{D_w} + C_{D_c}} \quad (7)$$

Em que C_{D_w} é o arrasto da pipa e C_{D_c} o arrasto do cabo.

Neste trabalho o arrasto total é considerado constante para simplificar e a pipa impermeável, tomada como base para comparação, é considerada com eficiência equivalente igual a 10. Como a análise é bidimensional, a área na expressão da potência fica igual a 1.

2.2. Abordagem numérica

O objetivo deste trabalho é entender como o envelhecimento de uma pipa afeta a potência de um sistema AWE de sustentação. Isso poderia ser feito acompanhando a potência de um protótipo ao longo de muitos dias, talvez meses. No entanto, um experimento desses seria caro e talvez muito demorado. Ainda, não foram encontrados dados de experimentos deste tipo na literatura. Então, como alternativa, se reduz o problema do envelhecimento para uma análise numérica do efeito da permeabilidade do tecido no coeficiente de sustentação de um modelo de pipa.

Essa análise numérica é feita usando o código comercial ANSYS Fluent para resolver as equações da continuidade e de Navier-Stokes tratadas por médias de Reynolds (RANS) no domínio computacional.

2.2.1. Modelagem da turbulência

Os efeitos da turbulência presente em escoamentos com altos números de Reynolds precisam ser levados em conta na análise de um perfil aerodinâmico. A forma mais comum é usando as equações RANS, que resolve as equações de transporte apenas para o campo de escoamento médio e contabiliza as oscilações por termos modelados. A continuidade é definida pela equação 8 e as equações RANS (9) para escoamento incompressível em regime permanente são:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (9)$$

O último termo da segunda equação é o tensor de Reynolds. Ele representa o fluxo de momento devido às flutuações e insere 6 novas variáveis no problema, assim, é necessária uma forma de fechar o problema. Existem alguns modelos para calcular essas variáveis para fechar o problema. O primeiro desenvolvido foi o k- ϵ , que é um modelo de duas equações muito robusto e largamente usado, mas sofre com gradientes adversos de pressão e por isso acaba prevendo coeficientes aerodinâmicos com erros. Outro modelo de duas equações é o k- ω , que prevê com maior precisão os coeficientes aerodinâmicos, especialmente o de sustentação. Em aerodinâmica é muito usado o modelo de uma equação de Spalart-Allmaras, que tende a ser mais rápido que os anteriores por ter só uma equação e consegue captar bem o escoamento submetido a gradientes adversos de pressão. Existem outros modelos para RANS,

mas que não foram considerados pelo custo computacional mais elevado. Ainda pelo custo computacional foi decidido resolver o escoamento em regime permanente.

A escolha do modelo de turbulência depende do problema. O modelo SA foi utilizado por Maslanka em 2019 e 2020 para analisar o efeito da permeabilidade de tecidos de parapente, então foi o primeiro modelo de turbulência adotado neste trabalho. No entanto, foi observado um comportamento estranho na camada limite próxima da região porosa. Esse comportamento foi atribuído ao tratamento diferenciado que o modelo SA faz para a viscosidade turbulenta em regiões de parede. Como a interface porosa não é uma parede para o código, ou seja, não tem condição de não deslizamento imposta, o modelo de turbulência não pode calcular as propriedades próximas de paredes de forma diferente do restante do domínio. Assim, foi substituído o modelo de Spalart-Allmaras pelo k- ω para o trabalho.

O modelo k- ω é um modelo empírico baseado nas equações do modelo de transporte para energia cinética turbulenta (k) e taxa de dissipação específica (ω). Na implementação do modelo segundo o manual de teoria do Fluent (2020), a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação específica são obtidas para regime permanente pelas equações:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (11)$$

Os termos da difusividade efetiva, de produção e de dissipação estão nos anexos, assim como as equações do modelo Spalart-Allmaras.

2.2.2. Modelagem da permeabilidade

A permeabilidade de tecidos pouco elásticos varia linearmente com a diferença de pressão entre os lados. A lei de Darcy para meios porosos relaciona a perda de carga com a viscosidade e velocidade do fluido e a permeabilidade do meio e é válida para baixas velocidades do escoamento no meio poroso, portanto, é adequada para o tecido. A relação tem a forma:

$$\Delta p = -\frac{\mu}{\alpha} u_i \quad (12)$$

O modelo é implementado no Fluent usando o termo fonte nas equações de Navier-Stokes dentro do meio poroso. Para o modelo de Darcy com permeabilidade isotrópica, o termo fonte tem a forma:

$$S_i = -\frac{\mu}{\alpha} u_i \quad (13)$$

O sumidouro de momento contribui para o gradiente de pressão através do meio poroso.

A viscosidade efetiva é usada para contabilizar os efeitos do meio poroso no termo difusivo nas equações de momento. Essa propriedade pode ser determinada experimentalmente ou estimada por correlações para meios poros de natureza semelhante. A viscosidade efetiva é definida como:

$$\mu_e = \mu_r \mu \quad (14)$$

O acoplamento entre escoamento livre e em meio poroso não é trivial, especialmente quando o meio poroso é de baixa permeabilidade, como no tecido da pipa, porque o escoamento no meio poroso é modelado pela lei de Darcy, que tem ordem diferente das equações de Navier-Stokes. Essa diferença cria uma descontinuidade da velocidade tangencial à interface e precisa de um tratamento adequado para não fugir do problema físico. Existem condições de contorno como Beavers-Joseph-Saffmann que impõem um escorregamento na interface baseado nas condições do material poroso. Se o modelo de Brinkman for usado para o escoamento no meio poroso, é possível acoplar “naturalmente” com o escoamento livre já que as equações do modelo de Brinkman tem a mesma ordem de Navier-Stokes. O modelo de Brinkman, no entanto, não é adequado para baixa porosidade, então, para o caso deste trabalho, é necessário acoplar Darcy-Stokes. A representação desses acoplamentos é mostrada na figura 2.8.

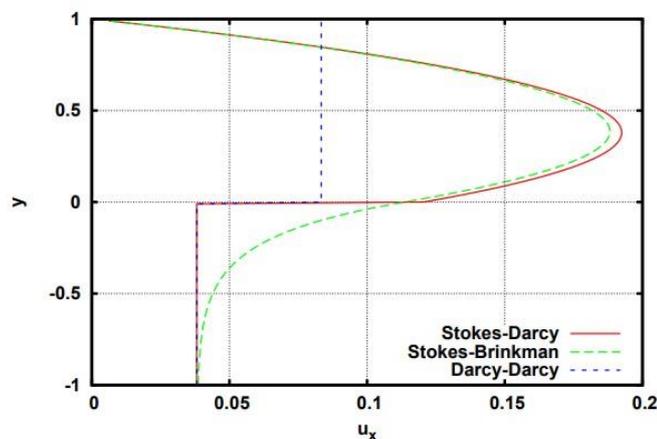


Figura 2.8: Representação do acoplamento entre meio livre e meio poroso no caso de escoamento paralelo. Retirado de Ehrhardt (2010)

Alternativamente, o Fluent não impõe condições de contorno na interface porosa e usa uma abordagem de um domínio, incluindo apenas um termo fonte nas equações de Navier-Stokes nas células do meio poroso. Para evitar que o escorregamento na interface desviasse demais da realidade foi usada uma correlação para feixes de fibras unidirecionais, a fim de calcular a viscosidade efetiva no meio poroso.

3. METODOLOGIA

Foi criado um perfil aerodinâmico para representar a pipa em duas dimensões, sendo que o dorso do perfil foi modelado com uma espessura de 1 mm para servir como meio poroso. O perfil médio de uma pipa LEI real é um composto de duas partes: o bordo de ataque e uma cobertura. O bordo de ataque é uma bexiga pressurizada e a cobertura é um tecido sustentado em parte pelo vento e em parte por talas, que são bexigas pressurizadas no sentido da corda e aqui foram suprimidas para a representação bidimensional. A figura 3.1 é uma representação da pipa.



Figura 3.1: Perfil representativo de uma pipa LEI

Existe uma região entre a cobertura e o bordo de ataque, logo acima deste, que dificulta a geração de malha. Como essa região não é de muito interesse para o problema, ela foi modificada. A figura 3.2 mostra a modificação.



Figura 3.2: perfil ajustado na região do bordo de ataque

A geometria foi analisada com número de Reynolds constante, variando ângulo de ataque e considerando cobertura impermeável e permeável.

O escoamento foi considerado com número de Reynolds igual a 10^6 calculado para a corda do perfil. Folkersma (2019) discute sobre o cálculo do número de Reynolds para esse perfil e conclui que, apesar da influência do bordo de ataque no escoamento, o uso da dimensão da corda é mais adequado devido à proporção entre as duas dimensões. Folkersma (2019) ainda detalha sobre a escolha do valor do número de Reynolds com base em dados experimentais e mostra que existe grande variação na aplicação de pipas de potência com carretel e que o valor de 10^6 é representativo da fase de tração.

O perfil impermeável foi definido com a condição de não deslizamento na superfície, retirando a malha na região interna da cobertura.

Para a condição permeável se utilizou o valor de 50 l/min/m^2 medido a 2 kPa , que é convertido para valor de resistência viscosa conforme manual do Fluent e Maslanka (2020). Esse valor representa um tecido em estado de bom a excelente para tecidos em parapentes. A referência em tecidos de parapente é adequada porque esses tecidos são parecidos com o das pipas.

Tabela 2: condições de permeabilidade

Condição	Impermeável	Permeável
Permeabilidade	-	$50 \text{ [l/min/m}^2] @ 2\text{kPa}$
Velocidade superficial	-	0.00083 [m/s]
Resistência viscosa ($1/\alpha$)	-	$1.341\text{E}+14 \text{ [1/m}^2]$

O Fluent usa a velocidade superficial para calcular a perda de carga na região porosa. Essa velocidade se calcula pela vazão média considerando que o meio é totalmente poroso. A velocidade superficial é usada, então, para calcular a resistência viscosa por:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\Delta p}{\tau * \mu * v_{sup}} \quad (15)$$

A viscosidade efetiva foi estimada conforme Almalki (2016) usando a correlação para feixe de fibras longitudinais para o parâmetro f :

$$f = \frac{24\sqrt{1-\varphi}}{(1-\sqrt{1-\varphi})^2} \left(\frac{h}{d}\right)^2 \quad (16)$$

Considerando que o ar pode atravessar entre os fios da malha, mas não entre as fibras dos fios,

$$\frac{h}{d} = 1 \quad (17)$$

Pois h é a espessura do tecido e d é o diâmetro da fibra. Ainda, a porosidade, φ , que é a fração volumétrica de fluido, foi considerada igual a 0,1.

Segundo Almalki (2016), a viscosidade relativa é um terço de f , o que resulta em uma viscosidade efetiva igual a 2882.

3.1. Domínio computacional e condições de contorno

Optou-se por uma malha tipo C híbrida com 3 zonas. A primeira zona é a cobertura da pipa, que é definida como zona porosa e tem malha estruturada de quadriláteros. A segunda zona é um círculo de raio igual a 3 cordas com centro no ponto médio da corda do perfil e é discretizada com uma malha de triângulos. Entre as zonas 1 e 2 foi criada uma camada de elementos quadriláteros para captar a formação de camada limite e controlar o y^+ , que foi estimado para ficar menor que a unidade. A última zona forma o restante do domínio e se estende 20 cordas a montante e 20 cordas a jusante do perfil. Essa região tem malha estruturada de volumes quadriláteros.

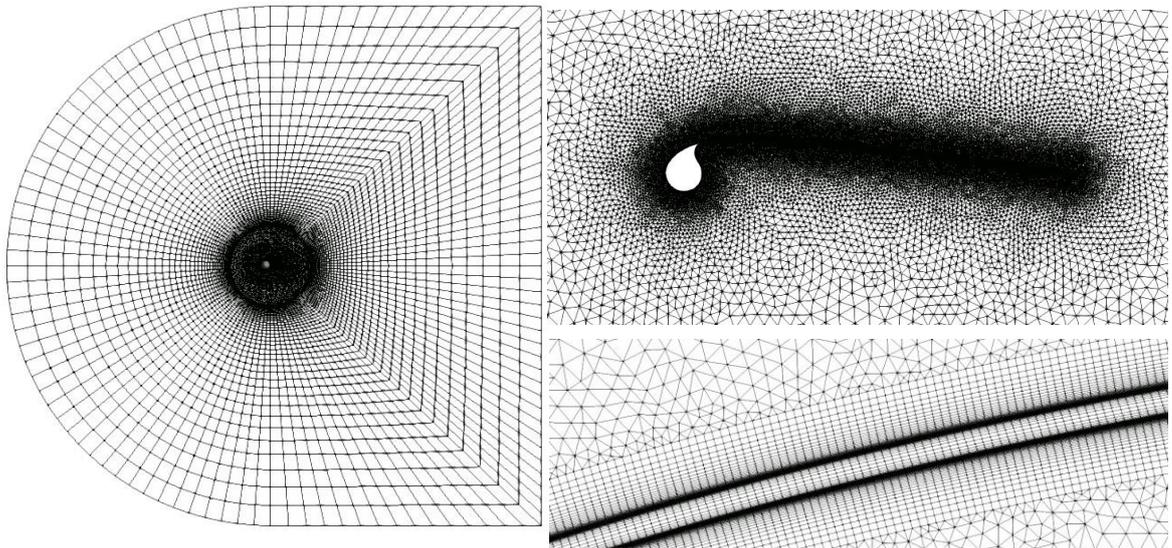


Figura 3.3: Domínio computacional. Malha tipo C e detalhe no entorno do perfil.

As condições de contorno são de velocidade prescrita para a parte C e as laterais do domínio, de pressão manométrica zero na parte de trás do domínio e de condição de não deslizamento no bordo de ataque para o perfil permeável e em todo o perfil para a condição impermeável.

Na solução foi utilizado o algoritmo SIMPLE e discretização de segunda ordem. O critério de parada foi o resíduo do coeficiente de sustentação e da continuidade menor que 10^{-5} .

4. RESULTADOS

4.1. Validação da metodologia e incerteza da malha

Folkersma (2019) analisou uma geometria semelhante à deste trabalho usando o modelo $k-\omega$ SST com e sem um modelo de transição e ainda validou experimentalmente a análise com dados para uma geometria de arco testada em túnel de vento de baixa turbulência.

Como a geometria analisada por Folkersma (2019) era impermeável, só é possível compará-la com a variação impermeável deste trabalho.

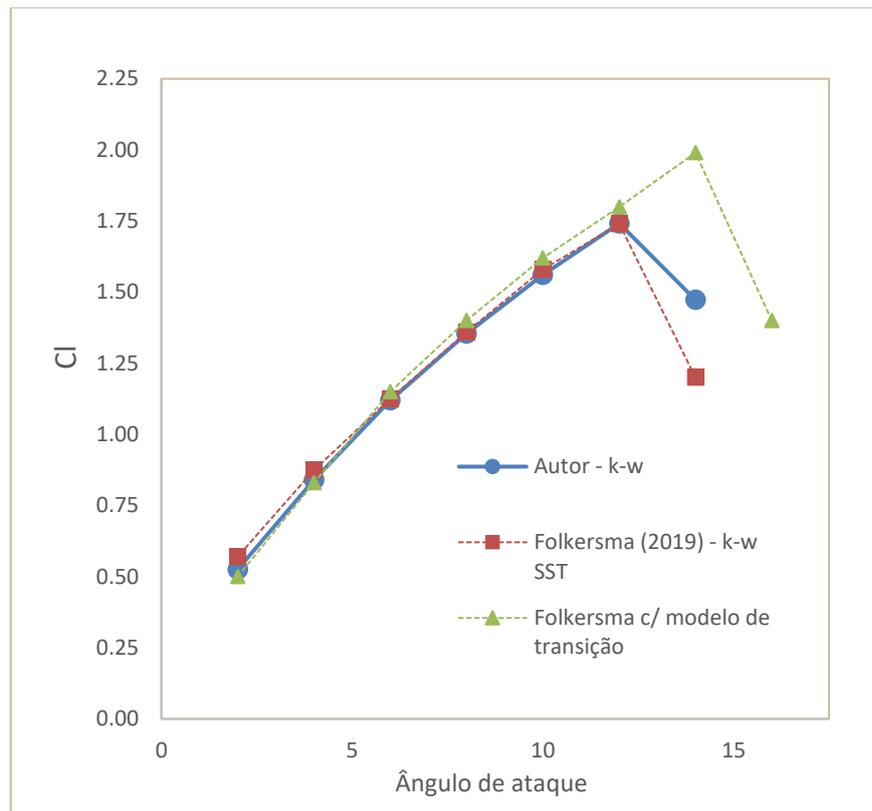


Figura 4.1: C_l -AoA entre o caso impermeável deste trabalho e a análise de Folkersma (2019).

A inclinação da curva do coeficiente de sustentação em relação ao ângulo de ataque é praticamente idêntica. A diferença está no ângulo de estol, que ocorre mais cedo para a geometria deste trabalho. Além disso, a diferença entre os valores de C_l aumenta para ângulos de ataque baixos. Folkersma (2019) argumenta que os modelos de turbulência para regime permanente não são adequados para representar as oscilações que ocorrem atrás do bordo de ataque. A figura 4.1 resume em um gráfico os resultados da validação para o caso impermeável comparado com os resultados de Folkersma (2019) usando SST com modelo de transição.

Não foi possível validar o caso impermeável porque não foi encontrada uma situação semelhante na literatura. A combinação de permeabilidade muito baixa e escoamento complexo no meio livre torna este trabalho muito incomum. Apesar de não existir trabalho semelhante para comparação, é possível observar que o comportamento do fluxo de massa pela cobertura da pipa é coerente com a redução da permeabilidade para ângulo de ataque igual a 8 graus e também com a variação de AoA para o caso permeável com $50\text{l/min/m}^2@2\text{kPa}$. Esses dados são plotados na figura 4.2.

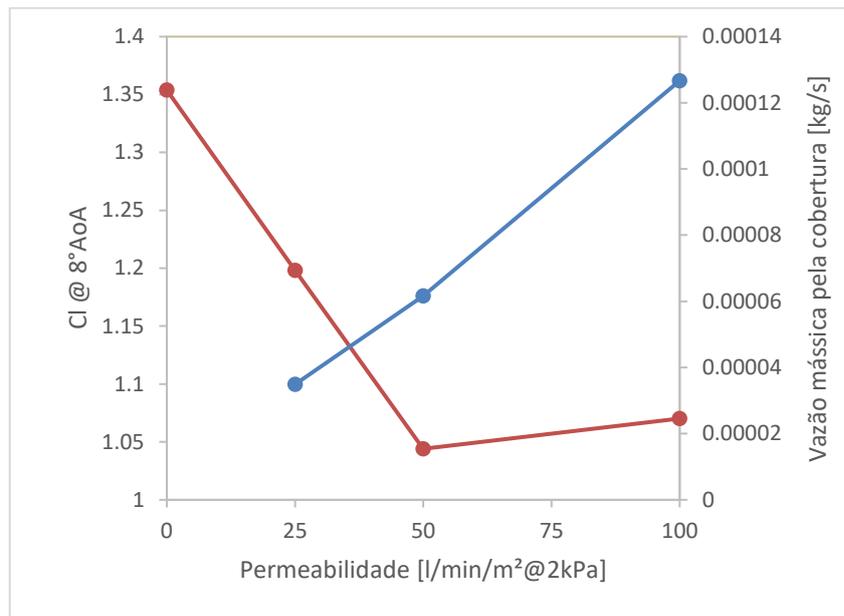


Figura 4.2.: Vazão mássica pela cobertura e Cl em função da permeabilidade da pipa operando com $AoA=8^\circ$. A linha azul mostra o aumento da vazão mássica com o aumento da permeabilidade e a linha vermelha mostra o coeficiente de sustentação.

Como foi descrito anteriormente, o modelo de turbulência de Spalart-Allmaras foi usado no início conforme feito nos estudos de Maslanka (2019; 2020). No entanto, foi observado que o SA não representa bem a camada limite na interface porosa e por esse motivo foi substituído pelo modelo $k-\omega$. Quando a substituição foi feita, já havia sido feito um estudo de sensibilidade de malha usando o modelo SA e se optou por usar a malha mais fina, coincidente com o maior número de volumes permitido na licença acadêmica do ANSYS Fluent. Os resultados desse estudo de sensibilidade usando o SA seguem na figura 4.3. Como a malha mais fina foi escolhida e não seria possível refinar mais, o estudo não foi repetido com o modelo $k-\omega$ e todos os experimentos com esse modelo foram realizados com a malha mais fina.

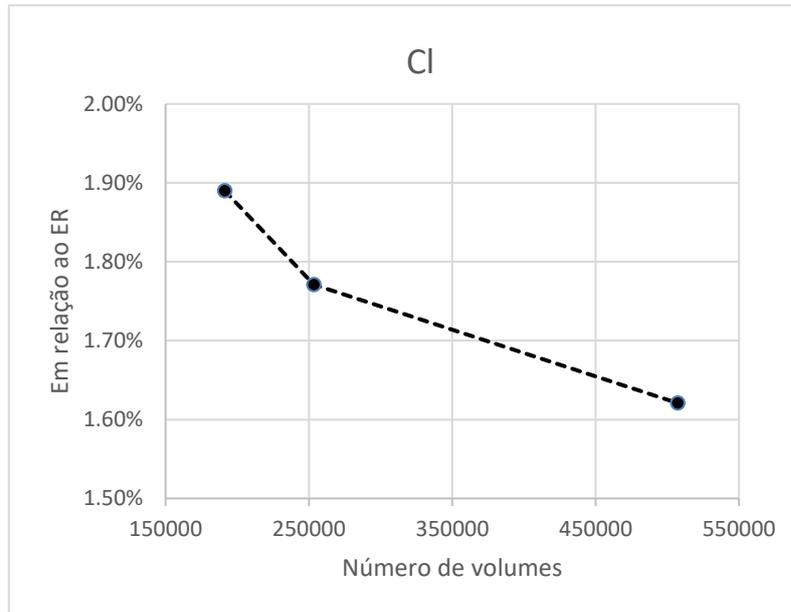


Figura 4.3: Erro entre as malhas testadas com o modelo Spalart-Allmaras em relação ao extrapolado de Richardson.

O gráfico mostra que o erro relativo ao extrapolado de Richardson diminui com a discretização mais fina, o que é esperado. O erro ainda é pequeno, mesmo na malha grosseira, no entanto, essa análise foi feita com AoA igual a 6° e permeabilidade alta, igual a 300 l/min/m^2 e foi observado que a convergência ficava mais instável para permeabilidades menores e para ângulos de ataque próximos do estol. Então, para favorecer uma convergência mais estável em todas as condições, foi escolhida a malha mais fina.

A malha apresenta um erro pequeno e o domínio com a pipa impermeável foi validada por comparação com outros códigos. No entanto, ainda restam incertezas na avaliação da permeabilidade que não puderam ser bem avaliadas neste trabalho. A literatura ainda é muito escassa em problemas envolvendo aerodinâmica acoplada ao escoamento em meios porosos e a avaliação de permeabilidades muito baixas apresenta dificuldades para o código empregado.

O acoplamento entre os meios é um problema difícil, mas que já é relativamente bem conhecido e geralmente envolve o uso de propriedades do material poroso para calcular o salto de velocidade ou as tensões na interface. Essas propriedades do material poroso são obtidas experimentalmente, mas para tecidos impregnados com impermeabilizante não foram encontrados esses dados. Na falta de informação experimental e buscando uma abordagem robusta na interface, isto é, que não envolve a imposição de uma condição de contorno artificial e potencialmente não física, foi utilizada uma correlação que relaciona um meio poroso formado de fibras com a porosidade e a viscosidade relativa do fluido neste meio poroso. Essa abordagem não pôde ser validada e é uma fonte de incerteza na metodologia.

4.2. Impermeável X permeável

A figura 4.4 traz o coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque. A pipa permeável, que representa uma pipa envelhecida em uso, tem o coeficiente de sustentação reduzido em relação a uma pipa impermeável, ou nova, para todos os ângulos de ataque avaliados. Ainda, o ângulo de estol foi reduzido de cerca de 12° para cerca de 10° entre as pipas. O estol ocorre antes na pipa permeável, o que limita o máximo ângulo de ataque e, consequentemente, o máximo coeficiente de sustentação.

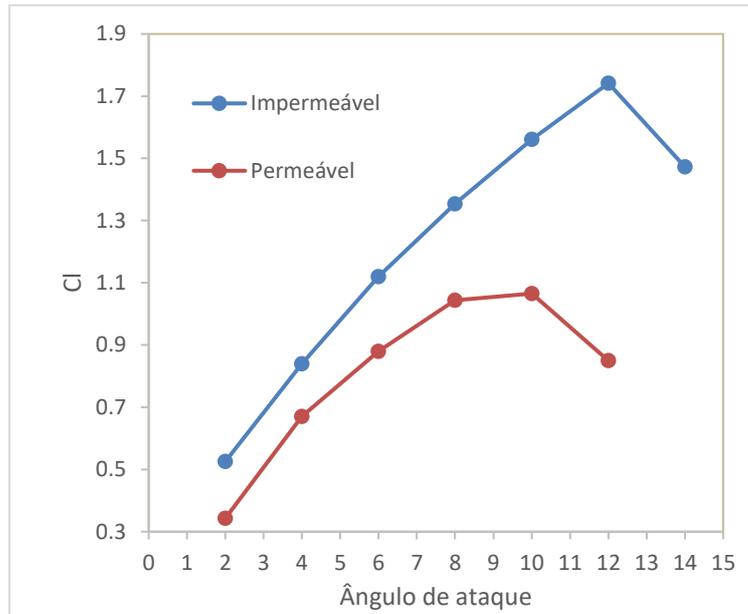


Figura 4.4: C_l x AoA para as duas condições testadas. Nota-se que o ângulo de estol para o perfil permeável fica entre 10° e 12° enquanto que para a pipa impermeável o ângulo de estol fica além dos 12° .

Considerando que as duas pipas operam com o coeficiente de sustentação máximo, a pipa impermeável pode operar com C_l aproximadamente igual a 1,74 enquanto a pipa permeável tem $C_{l\text{máx}}$ de aproximadamente 1,04. Essa diferença de 40% no coeficiente de sustentação resulta em uma redução de cerca de 77% na potência gerada na fase de tração.

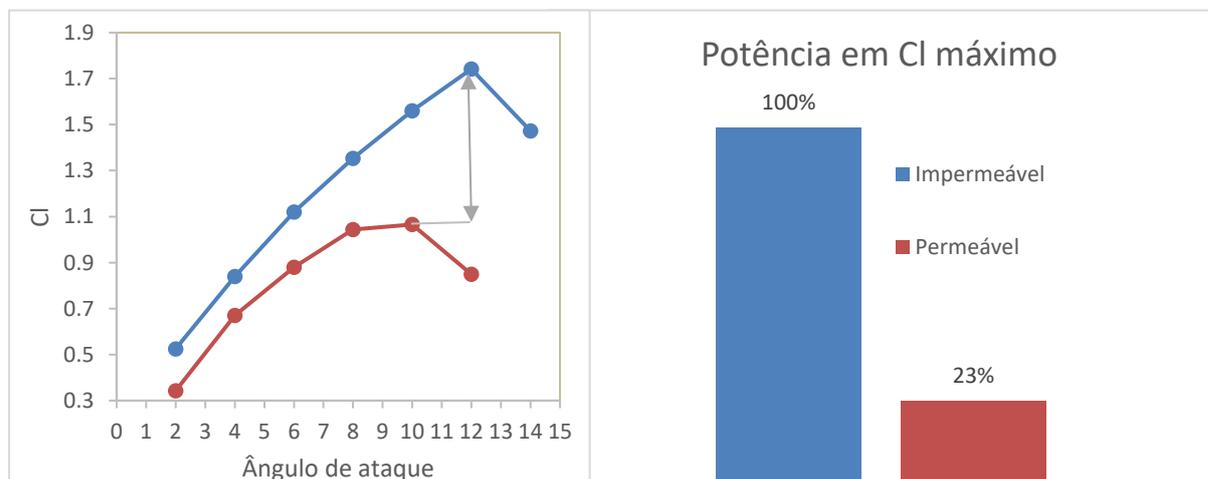


Figura 4.5: Redução da potência em relação a pipa impermeável (nova) na fase de tração da pipa permeável. Considerando $C_{l\text{máx}}$ para cada pipa, arrasto total constante e fator de eficiência equivalente $G = 10$ para a pipa impermeável.

Alternativamente, pode-se pensar em um cenário em que as duas pipas operam no mesmo ângulo de ataque. Neste caso, considerando $\text{AoA} = 8^\circ$, a potência cai cerca de 73% com o envelhecimento da pipa.

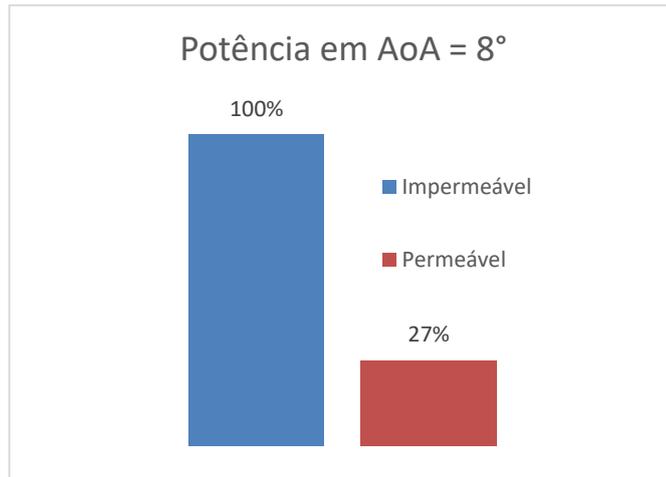


Figura 4.6: Comparativo entre as potências das pipas considerando $AoA=8^\circ$ e a pipa impermeável como base de comparação. Novamente o arrasto foi considerado constante e $G=10$ para a pipa impermeável.

Esses resultados mostram que a redução de potência de um sistema AWE de sustentação cai consideravelmente com o envelhecimento da pipa. No entanto, não se sabe quanto tempo uma pipa em operação levaria para desenvolver esse nível de permeabilidade. Essa é uma questão importante que fica para estudos futuros.

5. CONCLUSÕES

O efeito da permeabilidade do tecido de uma pipa LEI na sua capacidade de tração foi avaliado numericamente usando o modelo de turbulência $k-\omega$ em regime permanente em um domínio bidimensional. A literatura ainda é muito escassa de material sobre o assunto e não foi possível validar os resultados para a condição permeável, que envolve algumas incertezas, especialmente acerca do acoplamento na interface entre escoamento livre e em meio poroso.

A condição impermeável foi validada por comparação com os resultados numéricos de Folkersma (2019) e fornece uma boa base de comparação. Os resultados demonstram claramente a perda de potência de uma pipa envelhecida, que tem sua permeabilidade aumentada por degradação do impermeabilizante. A queda de potência na fase de tração chega a 77% considerando as pipas operando em $C_{lm\acute{a}x}$.

Ainda não se sabe quanto tempo uma pipa em operação leva para desenvolver esse nível de permeabilidade, então, a durabilidade das pipas ainda não pode ser estimada e a avaliação desse tempo fica para trabalhos futuros. Outro ponto que pode ser esclarecido em trabalhos futuros é a modelagem da permeabilidade, especialmente na interface. Seria interessante avaliar experimentalmente a abordagem tomada neste trabalho ou talvez comparar com outras condições de contorno na interface.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS; “**ANSYS Fluent Theory Guide**”, Release 20.1 2020a, ANSYS, Inc.

Cherubini, A. et al.; “**Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies**”, Scuola Superiore Sant’Anna, Italy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015;

Cherubini, A.; “**Advances in Airborne Wind Energy and Wind Drones**”, Scuola Superiore Sant’Anna, Italy. PhD Thesis. 2017. Disponível em: https://www.antonellocherubini.com/uploads/4/5/7/1/45719075/cherubini_phd_thesis_small.pdf

Dudek Paragliders.; “**Airworthiness inspection manual of Dudek Paragliders products**”, 2011;

Folkersma, M.; Schmehl, R.; Viré, A.; “**Boundary layer transition modeling on leading edge inflatable kite airfoils**”, Wind Energy, 22:908–921, 2019.

Maślanka, P.; Korycki, R.; “**Sensitivity of aerodynamic characteristics of paraglider wing to properties of covering material**”, AUTEX Research Journal, 2020.

Maślanka, P.; Korycki, R.; “**Textile Cover Effect on Aerodynamic Characteristics of a Paraglider Wing**”, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, 27, 1(133): 78-83, 2019.

Mengüç, G. S.; Bozdoğan, F.; Temel, E.; “**Sunlight exposure: the effects on the performance of paragliding fabric**”, Industria textile, vol. 69. Nr.5, 2018;

Wiser, R.; Bolinger, M.; Lawrence Berkeley National Laboratory; “**2018 Wind Technologies Market Report**”, U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 2019; Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/08/f65/2018%20Wind%20Technologies%20Market%20Report%20FINAL.pdf>

APÊNDICE A – Comparação SA X $k - \omega$ na região de interface

Conforme discutido anteriormente, o modelo SA apresentou comportamento estranho na camada limite na região de interface porosa e foi trocado pelo modelo $k-\omega$. A figura abaixo mostra a região de transição entre a condição de não deslizamento imposta no bordo de ataque e a interface porosa na cobertura. De cima para baixo estão representadas as condições: impermeável, permeável com modelo SA e permeável com modelo $k-\omega$. Observando o lado de sucção do perfil é possível identificar a formação da camada limite na condição impermeável. Nas três figuras a camada limite está presente de forma quase idêntica no bordo de ataque, mas muda quando entra na interface porosa: a desaceleração da velocidade tangencial à cobertura desaparece quando se usa o modelo de Spalart-Allmaras, enquanto no modelo $k-\omega$ parece ficar mais gradual, como se o escoamento sentisse uma rugosidade mais alta na interface porosa.

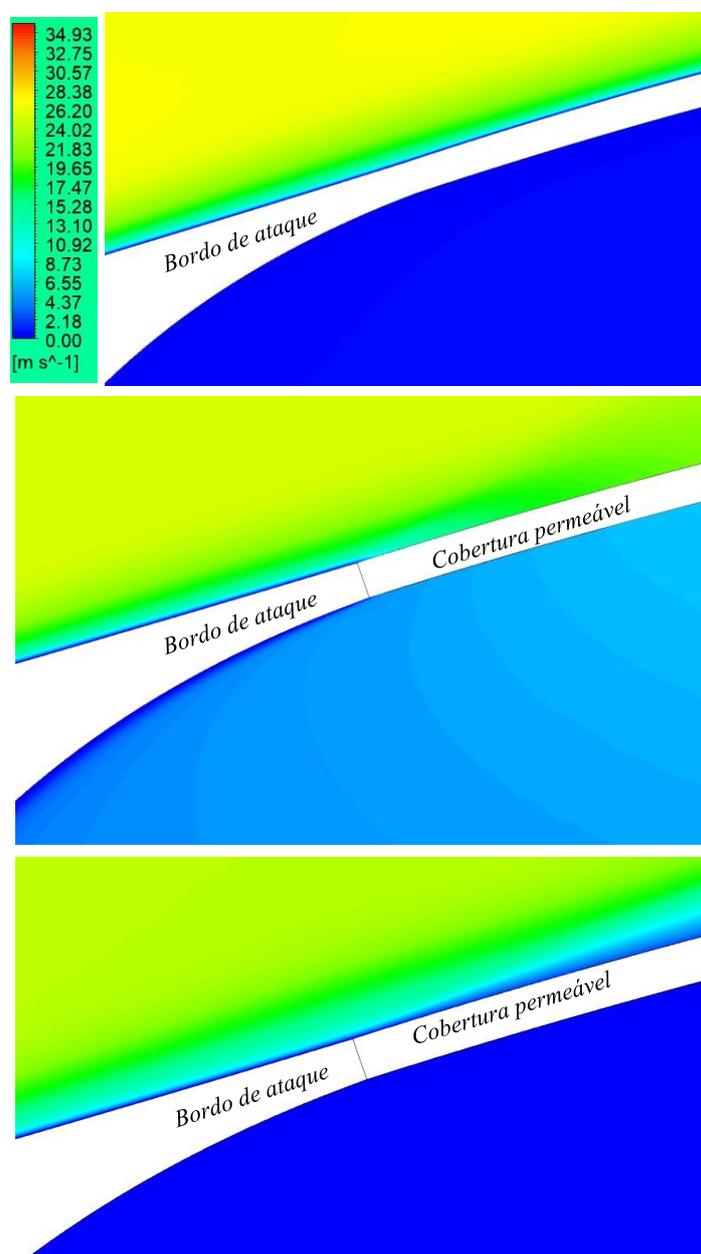


Figura Ap.1. Contornos de velocidade na região de transição entre a condição de contorno de parede e a interface porosa para os dois modelos de turbulência. De cima para baixo: pipa impermeável, permeável usando modelo SA, permeável usando modelo $k-\omega$. $AoA=6^\circ$.

ANEXO A – Modelos de turbulência

A.1. Modelo $k - \omega$

As equações de transporte têm a forma:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega$$

A difusividade efetiva é calculada como:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}$$

E a viscosidade turbulenta é

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega}$$

Como não foi utilizada correção para baixos números de Reynolds, $\alpha^* = 1$. Os termos de produção e dissipação de k e ω são definidos:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k$$

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + \frac{Re_t}{Re_\omega}}{1 + \frac{Re_t}{Re_\omega}} \right); \quad Re_\omega = 2,95; \quad Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}; \quad \alpha = \alpha_\infty = 1$$

A dissipação de k e w seguem,

$$Y_k = \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega$$

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & , \chi_k \leq 0 \\ \frac{1+680\chi_k^2}{1+400\chi_k^2} & , \chi_k > 0 \end{cases}; \quad \chi_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; \quad \beta^* = \beta_i^* [1 + \xi^* F(M_t)];$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/15 + (Re_t/Re_\beta)^4}{1 + (Re_t/Re_\beta)^4} \right); \quad \xi^* = 1,5; \quad Re_\beta = 8; \quad \beta_\infty^* = 0,09;$$

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2$$

$$f_\beta = \frac{1+70\chi_\omega}{1+80\chi_\omega}; \quad \chi_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij}\Omega_{ik}S_{ki}}{(\beta_\infty^*\omega)^3} \right|; \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

As demais constantes são:

$$\sigma_k = \sigma_\omega = 2,0; \quad M_{t_0} = 0,25$$

A.2. Modelo de Spalart-Allmaras

A variável de transporte no modelo SA, $\tilde{\nu}$, é idêntica à viscosidade cinemática turbulenta, exceto na região próxima de paredes. A equação de transporte para $\tilde{\nu}$ fica:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \tilde{\nu} u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu$$

A viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1}$$

E o amortecimento viscoso, f_{v1} :

$$f_{v1} = \frac{x^3}{x^3 + C_{v1}^3}$$

$$x \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$$

O termo de produção turbulenta é modelado como:

$$G_\nu = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{\nu}$$

$$\tilde{S} = S + \frac{\tilde{\nu}}{k^2 d^2} f_{v2}$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{x}{1 - x f_{v1}}$$

No código usado, assim como no modelo original, o escalar do tensor deformação, S , é baseado na magnitude da vorticidade:

$$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

A modelagem do termo de destruição turbulenta fica:

$$Y_\nu = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2$$

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}$$

$$g = r + C_{w2}(r^6 - r)$$

$$r \equiv \frac{\tilde{v}}{\tilde{S}k^2d^2}$$

Foram mantidos os valores padrão para as constantes:

$$C_{b1} = 0,1355$$

$$C_{b2} = 0,622$$

$$\sigma_{\tilde{v}} = 7,1$$

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma_{\tilde{v}}}$$

$$C_{w2} = 0,3$$

$$C_{w3} = 2$$

$$k = 0,4187$$

Em paredes, a viscosidade turbulenta modificada é ajustada para zero e tensão cisalhante na parede é calculada pela relação laminar:

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{\rho u_\tau y}{\mu}$$