

ESTUDO NUMÉRICO DA TURBULÊNCIA GERADA EM FALÉSIAS: ESCOAMENTO SOBRE DIFERENTES GEOMETRIAS INCLINADAS

Michael Ladeira Balbino, e-mail: balbinomichael@gmail.com

Mara Nilza Estanislau Reis, e-mail: mara@pucminas.br

Frederico Rodrigues da Costa Horta, e-mail: fredericorchorta@hotmail.com

Mateus Gustavo Gonçalves, e-mail: mateus13gustavo@gmail.com

Wender Pereira de Oliveira, e-mail: wender-7@hotmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico-BH

Resumo: Este trabalho estudou a região de Alcântara-MA, no qual sua costa litorânea é formada por falésias (estrutura geométrica variáveis), sendo que tais estruturas possuem grande potencial para produção de energia eólica. Com auxílio do software STAR-CCM+, foi possível analisar as variações e transições dos escoamentos modificados pela geometria irregular das falésias, obtendo resultados de perfis de velocidade do vento, energia cinética dos ventos, tipo de escoamento e variações de parâmetros das zonas de recirculação de ar ao longo da região. Através das simulações com diferentes inclinações, percebeu-se que o refinamento de malha e a inclinação da falésia são fatores importantes que afetam os resultados obtidos, quanto maior a inclinação da geometria em direção à superfície, menos iterações eram necessárias para verificar se a solução convergia, não sofrendo alterações dos resíduos ao longo de sucessivas iterações. A literatura mostra uma grande disparidade de valores no comprimento da bolha de recirculação para condições geométricas semelhantes e mesmo número de Reynolds, onde o comprimento da bolha de recirculação é muito sensível aos parâmetros do escoamento e à geometria da falésia de degrau ascendente, como por exemplo, altura da camada limite atmosférica, altura do degrau, número de Reynolds e inclinação da falésia, sendo que está última, quanto maior o grau de inclinação da falésia, menor a altura da bolha de recirculação e maior comprimento longitudinal. Entretanto, a partir dos resultados obtidos, confirmou-se a influência da geometria sobre o comportamento da camada limite interna e sobre as zonas de recirculação, onde obsevou-se que em zonas de baixa pressão, há variações de altura e comprimento da bolha de recirculação sem serem diretamente proporcionais, fato tal, que pode ser devido a influência de parâmetros não utilizados e configurados, como a rugosidade da superfície e temperatura.

Palavras chaves: Camada limite; CFD; Falésia; Turbulência.

1. INTRODUÇÃO

O uso de inovações tecnológicas aumentou-se consideravelmente com o passar das gerações. A necessidade de maiores quantidades de energia para provimento e funcionamento das indústrias foi crescendo e novos tipos de energias eram requeridas. Contudo, quanto mais energia demandava-se, proporcionalmente, ocorria-se a instauração da poluição sobre diferentes formas. Eventualmente, fontes alternativas de energia, denominadas energias limpas ou sustentáveis, eram precisas para mitigar os efeitos desastrosos causados à natureza.

Uma destas energias limpas é a energia eólica, proveniente dos ventos, no qual é considerada uma das mais limpa, de baixo custo e confiável já utilizadas no mundo. Os ventos, que são gerados por meio das disparidades de temperaturas, entre a crosta terrestre e as águas, das diferenças entre superfícies, das regiões equatoriais e dos polos do globo, são as promovedoras da fonte de energia eólica (RAMOS; SEIDLER, 2011). Gerar essa energia varia de acordo com cada região, cada estação do ano, rugosidade superficial, da altura do local e de interferências que estão na redondeza do local da medição, ou seja, a estrutura de toda a região é fundamental para tal geração.

Os levantamentos desses parâmetros relacionados à dinâmica sob o local são extremamente precisos para quaisquer elaborações de projetos concernentes à sua geração, como a velocidade do vento, que pode sofrer alteração graças à geometria das regiões. Perante esses fatores, é necessário conhecer o comportamento do fluido (ar) para se obter uma eficiência sobre as resoluções de problemas atmosféricos, estruturais e ambientais.

No Brasil, há diversas regiões mapeadas com excelente potencial eólico, como a costa litorânea do Nordeste, onde se encontra essas principais regiões além da maioria dos parques eólicos instalados. Os regimes de vento em território brasileiro se intensificam nos meses em que o índice pluviométrico é menor e os níveis das barragens das hidrelétricas,

principal fonte de energia elétrica nacional, estão nos níveis mais baixos, favorecendo assim a implantação de parques eólicos como fonte complementar de energia.

A área analisada, refere-se a uma costa litorânea formada por falésias, onde as mesmas são estruturas geométricas variáveis encontradas no litoral brasileiro, caracterizadas por um encontro abruptamente desnivelado da costa (superfície) com o mar (PIRES, 2009), sendo que as mesmas criam alterações nas velocidades dos ventos, gerando turbulência. Tais turbulências acontecem dentro de uma região específica delimitada pela camada limite interna (CLI), camada composta de aproximadamente 10% da camada limite atmosférica (CLA) e que se forma na parte inferior em consequência de mudanças abruptas (descontinuidades) nas condições da superfície, tais como a topografia, rugosidade, temperatura e/ou umidade. A existência dessas falésias causa a alteração dos campos de vento sobre elas, gerando uma CLI, situada na parte junto à superfície, quando o vento sopra do oceano.

A camada limite atmosférica é uma camada de fluido que sofre influência direta da superfície terrestre. Fatores como força de atrito, efeitos térmicos, movimentos verticais e emissão e propagação de poluentes são variáveis que alteram os parâmetros de análise de uma camada limite (CL), podendo ser definida como camada de ar adjacente à superfície da terra em que o escoamento apresenta um elevado número de Reynolds, onde a turbulência gera transporte de energia, massa e quantidade de movimento entre a superfície da terra e sua atmosfera (MOREIRA, 2012).

O conhecimento das características da CLI são de relevada importância para entender as influências que podem ocasionar quando há sotavento (lado oposto da origem do vento) das falésias sob cidades, balneários, fábricas, usinas eólicas, aeroportos e outros. No caso da região de Alcântara-MA, onde há um centro de lançamentos de foguetes, localizado junto a uma falésia, as atividades de lançamento requerem um conhecimento apropriado das condições meteorológicas, em especial, do vento e da turbulência atmosférica junto à superfície, tanto para o projeto e desenvolvimento de foguetes, quanto para procedimentos durante o lançamento. As condições micrometeorológicas se tornam ainda mais complexas, devido à presença de falésias de 50,00 metros de altura em relação ao oceano, no entanto, observa-se que o efeito das falésias é benéfico devido sua contribuição para a geração de turbulência.

2. CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NA FALÉSIA

A geometria da falésia em estudo pode ser simplificada considerando-a como um degrau ascendente, *Forward Facing Step* (FFS), Fig. 1. O escoamento sobre um degrau ascendente é complexo e possui características únicas, tais como zonas de separação e recirculação.

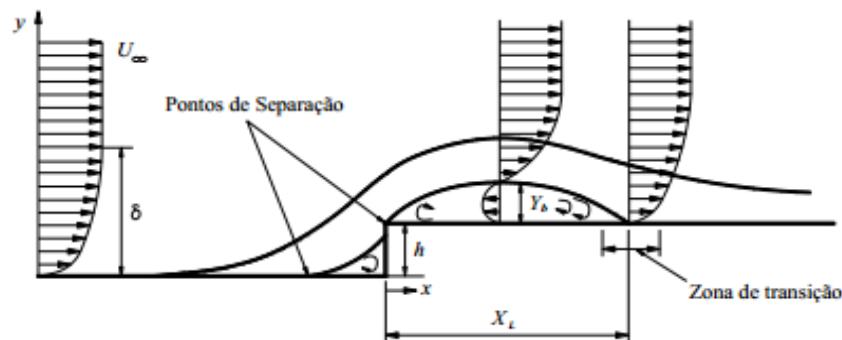


Figura 1. Degrau Ascendente (*Forward Facing Step*) - Sherry (2009)

O efeito de bloqueio provocado pelo degrau implica uma forte curvatura das linhas de corrente, criando gradientes de pressão adversos, o que origina zonas de separação e recirculação do escoamento. O escoamento é caracterizado por pontos muito singulares, como, o ponto de separação seguido de uma bolha de recirculação menos intensa a barlavento (origem do vento) do degrau e um ponto de estagnação na parede vertical do degrau. Esta bolha a barlavento influencia a inclinação do escoamento a sotavento afetando o comprimento da outra bolha de recirculação. A bolha de recirculação a sotavento do degrau é originada pela presença da aresta viva, sendo que esta recirculação do escoamento provoca um aumento de intensidade de turbulência, o que pode impossibilitar a colocação de turbinas eólicas (DIAS, 2011).

A maioria dos escoamentos na área da engenharia do vento são turbulentos. O escoamento é designado turbulento quando as forças de inércia são predominantes face às forças viscosas, o que resulta em flutuações caóticas do escoamento. A caracterização do escoamento turbulento pode ser feita a partir do número de Reynolds (Re), que representa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas (DIAS, 2011).

Segundo Sherry (2009), a literatura mostra uma grande disparidade de valores no comprimento da bolha de recirculação para condições geométricas semelhantes e mesmo número de Reynolds, onde o comprimento da bolha de recirculação é muito sensível aos parâmetros do escoamento e à geometria do FFS, como por exemplo, altura da camada limite atmosférica, altura do degrau e do número de Reynolds. Outro parâmetro envolvido se trata da inclinação da falésia, sendo que, quanto menor a inclinação, menor a altura da bolha de recirculação, no entanto mais extensa na direção longitudinal (PIRES, 2009).

3. METODOLOGIA

Os programas de simulação computacional que empregam códigos *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*), são elaborados a partir da Mecânica dos Fluidos Computacional, onde estes códigos são estruturados em torno de algoritmos numéricos, que podem solucionar problemas, como os de escoamento em uma determinada superfície, através de sofisticadas interfaces que possibilitam a entrada de parâmetros e suas variações e análises de seus resultados. Todos os códigos contêm três elementos principais, sendo eles: pré-processamento, solução matemática e pós-processamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3.1. Pré-Processamento

O pré-processamento consiste na entrada do problema de escoamento na interface do programa *CFD*, para isso as atividades são divididas em: definição da geometria, região de interesse, geração de malha, especificação das condições de contorno (seleção de fenômenos físicos e químicos a serem modelados), definição das propriedades do fluido e testes de malha.

Para reduzir o número de elementos e o tempo de processamento computacional, configurou-se a geometria numa escala de 100:1, selecionando uma área de controle de 3,00 metros de altura por 10,50 metros de comprimento e 0,50 metros de extrusão, contendo uma falésia de degrau ascendente de 0,50 metros de altura, ângulo de inclinação de 90° e 4,00 metros à superfície de entrada. Segundo Reuter (2004), a altura máxima da Camada Limite Oceânica (CLO) na região de Alcântara é de 300,00 metros, o que justifica a escolha da altura da área de controle.

Em relação aos comprimentos a barlavento e a sotavento à falésia, estas configurações foram escolhidas visando permitir o desenvolvimento do escoamento induzido pelo degrau, pois dimensões menores podem delimitar a área de estudo da zona de recirculação.

Para análise das zonas de recirculação e comportamento aerodinâmico, realizou-se inclinações de 70°, 110° e 135°, entre a falésia e a superfície, para os quais permaneceram os mesmos parâmetros físicos utilizados para inclinação de 90°.

Após a configuração da geometria, definiu-se os volumes de controle, no qual estes analisaram as áreas que sofreram maiores influências e variações do escoamento sobre uma falésia, como: o degrau ascendente que representa o obstáculo ao escoamento e as áreas anterior e posterior a falésia, onde se encontram as zonas de recirculação e a CLI. Definiu-se estas áreas como regiões de interesse, no qual gerou-se dois diferentes planos, devido a possibilidade de um maior refinamento de malha, etapa fundamental que garantiu uma melhor precisão dos resultados encontrados.

Definidas as dimensões de análise das regiões, denominou-se os limites de cada parte do volume de controle. Essas fronteiras do volume de controle foram elaboradas para analisar de forma mais detalhada e separada cada parte da falésia, escolhendo a propriedade adequada para cada área.

Para a geração da malha necessitou-se escolher/configurar as propriedades físicas do volume de controle, sendo esta etapa parte fundamental da simulação, onde uma configuração errônea de quaisquer parâmetros afetará os resultados obtidos. Neste trabalho gerou-se uma malha quadrilateral com a discretização do domínio contínuo utilizando elementos discretos, ou seja, separou-se a área contida entre a superfície do mar, a parede da falésia, o solo e o contorno da área de controle em diversos elementos computacionais. A malha gerada possuiu uma geometria simples, bidimensional, com elementos quadráticos de arestas a 90° entre si, sendo que o valor do comprimento da aresta é o que caracteriza o tamanho base (*Base Size*) de cada elemento. A escolha por uma malha bidimensional se dá pela eficiência que a mesma tem para este tipo de simulação, garantindo assim uma eficiência maior e menores custos computacionais quando comparadas com uma malha 3D. No modelo construído, a velocidade do vento flui nas direções x e y, no qual estas são as coordenadas/dimensões de interesse.

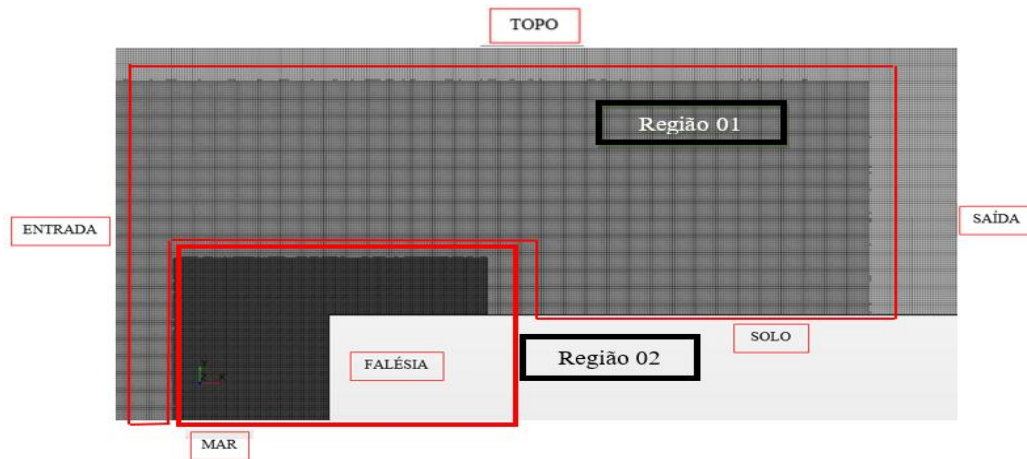
Em relação ao tamanho de base de cada elemento, realizou-se simulações com diferentes tamanhos, comparando o número de elementos, tempo de geração de malha e iterações para convergência dos erros. Neste trabalho aplicou-se um tamanho base de cada elemento no valor igual 0,01 metros, sendo que nas regiões de interesse utilizou-se tamanho de base menores, como, na região 01, 25% de área da base original e na região 02, 12,5% da área da base original, tornando a malha não uniforme. O detalhamento da malha tornou-se necessária devido à capacidade de processamento e tempo de operação, além de auxiliar em resultados realmente válidos, por isso ocorreu as divisões de área dos elementos das regiões de interesse, conforme Tab. 1.

Tabela 1. Tamanhos de Base dos Elementos

<i>BaseSize</i> (m)	<i>PrismLayer</i>	Resíduo (Iterações)	Tempo (s)	Elementos
1	2	150	31,925	2035
0.5	2	425	50,352	7956
0.3	2	510	65,903	12874
0.1	2	715	163,767	16437
0.01	2	6100	5722,542	269105
0.01	10	3550	3443,974	275521
0.01	20	3000	13099,779	286041

As soluções matemáticas para cada elemento são resolvidas levando em conta a capacidade de processamento, pois quanto maior a quantidade destes elementos, mais lento será a simulação devido as equações e iterações matemáticas a serem resolvidas. Em contrapartida, para malhas com áreas de controle maior, ou seja, com menos quantidades de elementos, haverá um processamento rápido quanto comparado ao caso citado anteriormente, entretanto, a precisão dos resultados poderá ser prejudicada, onde alguns fenômenos não serão corretamente representados.

Na superfície inferior do domínio, onde os gradientes de velocidade são maiores e sua variação é acentuada, camadas finas de elementos prismáticos na direção vertical e substancialmente maiores nas direções longitudinais são empregadas, camadas estas chamadas de camadas prismáticas (*prismalayer*), recurso usado para gerar elementos prismáticos ortogonais próximos a superfícies ou limites da parede. Esta camada de elementos é necessária para melhorar a precisão da solução, permitindo que os gradientes próximos da parede sejam captados sem que seja necessário um número exagerado de elementos, Fig. 2.



**Figura 2. Diferença e Refinamento da Malha na Região de Interesse
Elaborado pelos Autores - StarCCM+ (2017)**

Para as diferentes inclinações, obteve-se diferentes número de elementos, vértices e pontos, devido a diferença do volume de controle, conforme Tab. 2.

Tabela 2. Diferenciação da Malha para Diferentes Inclinações

Inclinação	Elementos	Faces	Vértices
70°	653.307	1.305.408	656.057
90°	639.614	1.277.985	642.260
110°	663.357	1.326.291	666.746
135°	671.225	1.341.915	674.372

Na seleção de fenômenos físicos e químicos, quando se considera um escoamento, existem diversas variáveis que o influencia, como, fluxo de energia, velocidade e pressão, dentre outros.

Usando o modelo de simulação numérica *RANS*, selecionou-se o modelo de turbulência *k- ω SST* (*Shear-Stress Transport*) desenvolvido por Menter em 1995, modelo de turbulência híbrido, que combina o modelo *k- ω* com o modelo *k- ϵ* padrão. Este método foi utilizado devido à sua operacionalidade sobre zonas de descolamento da camada limite e modelos onde contém arestas vivas.

O tipo de escoamento adotado se caracteriza como turbulento, devido ao elevado n° de Reynolds no escoamento entre 10^5 e 10^7 . Diante deste tipo de escoamento, utilizou-se o recurso de supressão da turbulência nas regiões próximas as paredes. A supressão da turbulência se caracteriza por um modelamento matemático que simula a região de transição do escoamento do fluido numa região definida. Sabendo que existe uma região de transição, escolheu-se o limite da distância de transição, no qual o mesmo é o limite onde se tem os efeitos de turbulência em supressão.

A escolha do modelo de escoamento segregado tem como metodologia ser um solucionador que resolve as equações de momento em cada dimensão do modelo.

A temperatura do modelo é constante durante a simulação, considerando-se que as trocas de calor são desprezíveis, devido a velocidade de escoamento. A simulação foi executada em condições ideais de temperatura e pressão (CNTP), tendo como valores: 300 K de temperatura e 101,325 kPa de pressão.

Os modelos de tratamento de parede são um conjunto de premissas para modelagem da quantidade de turbulência próxima a parede, como esforços de cisalhamento próximos a parede, geração e dissipação da turbulência. Deste modo, utilizou-se o recurso do software chamado *All y+ treatment*, sendo este um tratamento híbrido, tendendo a combinar os tratamentos de *high y+* e *low y+*.

O tratamento *high y+* é uma abordagem onde os esforços de cisalhamento da parede, a turbulência e a dissipação da mesma são derivadas da teoria da camada limite turbulenta, utilizando valores de $y^+ > 30$. O tratamento *low y+* possui uma abordagem onde assume-se que a subcamada viscosa é bem resolvida pela malha, fazendo com que as leis de parede não sejam necessárias. O valor de y^+ geralmente é menor ou próximo a 1.

A grandeza y^+ é definida como uma grandeza adimensional que representa a distância da parede do elemento adjacente a mesma, considerando a distância do centroide deste elemento, velocidade relativa e a viscosidade cinemática.

Próximo a subcamada viscosa (camada de aproximadamente 3,00 quilômetros que pode variar em função da hora e local, onde as tensões cisalhantes são variáveis e a estrutura de vento é forçada pelo atrito, gradientes de pressão e rotação da terra), a turbulência é insignificante enquanto os efeitos viscosos são pequenos na subcamada inercial (camada em que o perfil de velocidade nas condições de neutralidade é logarítmico). No entanto, na camada de amortecimento (camada de alguns micrômetros, no qual a turbulência e os perfis médios são fortemente afetados pela estrutura dos elementos rugosos como superfície e oceano), tanto a turbulência quanto os efeitos viscosos são predominantes. Para estimar a distância da parede um certo valor de y^+ é determinado. Para o modelo simulado, obteve-se o valor aproximado de y^+ de 0,233, sendo que o Reynolds encontrado está entre 10^5 e 10^7 , demonstrado pelas seguintes equações Eq. 1 a 4:

$$C_f = 0,0592 * Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad \text{para} \quad 5.10^5 < Re_x < 10^7 \quad (1)$$

Onde:

C_f = Coeficiente de Atrito Superficial;

Re_x = Número de Reynolds Local.

$$\tau_{wall} = C_f * \frac{1}{2} * U^2 \quad (2)$$

Onde:

τ_{wall} = Tensão de Cisalhamento na Parede (Pa);

U = Velocidade do Fluido em um Determinado Ponto (m/s).

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}} \quad (3)$$

Onde:

u^* = Velocidade de Atrito (m/s);

ρ = Massa Específica do Fluido (kg/m^3).

$$y^+ = \frac{\rho * u^* * y}{\mu} \quad (4)$$

Onde:

y^+ = Distância da parede do elemento adjacente a mesma, considerando a distância do centroide deste elemento, velocidade relativa e a viscosidade cinemática;

μ = Viscosidade Dinâmica do Fluido (kg/m.s ou Pa.s).

x, y e z = Componentes das Coordenadas Físicas (m).

A distância da parede do elemento adjacente a mesma foi desenvolvida através de um cálculo que se baseia em uma triangulação da malha de superfície.

Como a simulação avalia o escoamento do vento sobre as falésias, selecionou-se a opção em que o fluido se comporta como um gás ideal. A opção no qual o fluido se comporta como um gás real foi desconsiderada devido a sua maior complexidade de configuração de seus parâmetros. As propriedades do gás ideal estão retratadas na Tab. 03, conforme padronização do software.

Tabela 3. Propriedades do Material – Gás Ideal

Propriedade	Valor
Ar	Ar (Padrão)
Viscosidade Dinâmica	1,85508 E-5 Pa.s
Peso Molecular	28,9664 kg/kmol
Calor Específico	1003.62 J/kg-K
Condutividade Térmica	0,0260305 W/m-K
Número de Prandtl Turbulento	0

Considerando que o modelo em simulação é um plano, pode-se observar seis contornos/fronteiras, sendo que os mesmos estão retratados na Fig. 3. Para estudos de Mecânica dos Fluidos em *CFD*, os contornos devem ser condicionados para que os mesmos assumam suas funções, dando assim precisão para a simulação, sendo estes:

- **Velocidade de Entrada** (*Velocity Inlet*): Contorno onde se tem a entrada do perfil de velocidade. Para a simulação, selecionou-se um perfil de entrada de acordo com dados experimentais da região de Alcântara (OLIVEIRA, 2016). O contorno que recebe esta função neste modelo é a “Entrada de Ar”. O perfil de velocidade exponencial é descrito pela Eq. 5 e mostrado na Fig. 3.

$$U_{zInlet} = U_{ref} \left(\frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)} \right) \quad (5)$$

Onde:

U_{zInlet} = Velocidade de Entrada em Determinada Altura (m/s);

U_{ref} = Velocidade na Altura de Referência (m/s);

Z = Altura Relacionada a U_{zInlet} (m);

Z_0 = Altura em Relação a U_{ref} (m).

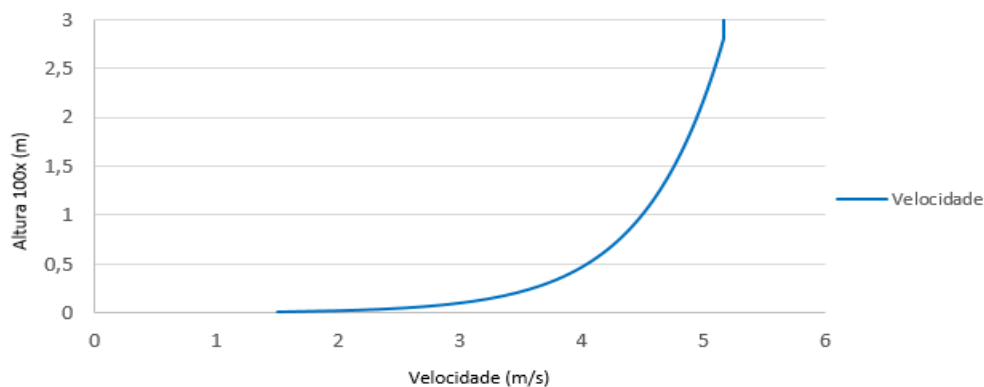


Figura 3. Perfil de Velocidade de Entrada - Oliveira (2016)

- **Pressão de Saída** (*Pressure Outlet*): Contorno onde se tem a saída de pressão, portanto é a região onde se segue o escoamento analisado. O contorno que recebe esta função neste modelo é a “Saída de Pressão”. No modelo simulado, não houve modificação deste parâmetro, utilizando-se o valor padronizado pelo programa de 101,325 kPa de pressão.

- **Parede** (*No-Slip*): Contorno onde se tem uma superfície física, sendo que esta influencia no escoamento devido ao não deslizamento gerado entre o fluido e a parede, e também pelas diferenças geométricas. Os contornos que recebem esta função neste modelo são “Mar”, “Falésia” e “Solo”.

- **Plano de Simetria** (*Symmetry Plane*): Contorno onde o escoamento externo ao mesmo é considerado igual aos dos elementos adjacentes, fazendo com que este contorno não tenha influência significativa no modelo, como atrito, entrada de velocidade ou saída de pressão. O contorno que recebe esta função no modelo é denominado “Topo”.

3.2. Solução Matemática

O Método de Volumes Finitos (*Finite Volume Method - FVM*), método utilizado, tem sua dedução em bases físicas, isto é, realizou-se equacionamentos de balanços de massa, de quantidade de movimento e de energia sobre um determinado volume de controle (VC) onde as variáveis atravessaram as faces do volume.

Como se trata de escoamento turbulento, selecionou-se o modelo de simulação por equações média de Reynolds - *RANS* para escoamentos médios.

Durante a simulação sucedeu-se várias iterações, sendo que estas iterações têm como princípio de funcionamento a análise de parâmetros em cada elemento discretizado, no qual estes parâmetros se baseiam nas variáveis de entrada e nas variáveis das iterações anteriores, buscando redução dos erros matemáticos acumulativos durante o processamento, com a finalidade de convergência de resultados.

Na resolução dos equacionamentos, o fechamento do balanço em cada VC é um valor pequeno, não nulo, que em circunstâncias normais, diminui com a progressão da solução, valor esse designado como resíduo. A convergência de uma solução computacional é um problema em todas as aplicações de *CFD*. A diminuição dos resíduos é um método para controlar a evolução da solução numérica. Porém, não é o único fator que indica convergência. Uma solução verdadeiramente convergente não sofre alterações dos resíduos ao longo das sucessivas iterações (DIAS, 2011).

Neste trabalho, para as simulações de CLI, utilizou-se a tabela de validação de resíduos (DIAS, 2011), no qual a convergência da solução deve ser avaliada sempre com base na ordem de redução do resíduo e na evolução do resíduo ao longo do processo iterativo, onde valores residuais iguais ou abaixo de 10^{-4} são considerados satisfatórios.

3.3. Pós-Processamento

Conforme Malalassekera (2007), na solução de escoamento de fluido é preciso estar ciente da complexidade dos fenômenos e que os dados gerados pelo código *CFD* apresentam resultados próximos à física imposta no modelo. O usuário deve avaliar se os resultados obtidos são os esperados e ainda qual a confiabilidade deles. É impossível avaliar a confiabilidade do modelo físico e químico incorporados em um programa com código complexo como o *CFD* ou a exatidão dos seus resultados, exceto quando comparados com um trabalho experimental.

Os resultados encontrados durante uma simulação puderam ser vistos a qualquer momento através de recursos que permitiam o acesso após cada iteração, sendo estas iterações configuradas de acordo com a quantidade de vezes que se desejava observar determinado ponto num instante de tempo.

Para análise dos dados e posterior validação, montou-se cenas (*Scenes*), recurso que demonstra a malha, a representação escalar e a representação vetorial da velocidade em escalas de diferentes colorações, no qual possibilitou-se analisar a formação da CLI e o comportamento do escoamento sob a superfície, além da geração de gráficos/dados que permitiam comparar as alturas da camada limite simuladas numericamente com as alturas medidas experimentalmente por Pires (2009).

4. ANÁLISES DE RESULTADOS

Através da disposição de dados experimentais encontrados na literatura, tais como: Oliveira (2016), Moreira (2012), Dias (2011), Moreira e Roballo (2008), Pires (2009), Moreira (2007) e Roballo (2007), utilizou-se o software STAR-CCM+ (versão 2016) da empresa Siemens, no qual os resultados gerados pelo mesmo foram comparados.

Após a criação do modelo numérico, efetuou-se simulações com diferentes inclinações, e, em diferentes geometrias, sendo que pôde-se observar disparidades no comprimento e altura das bolhas de recirculação, como também nos gradientes de pressão gerado pelo degrau do modelo. Em todas as simulações houve a convergência dos resíduos, estando os mesmos abaixo de 10^{-4} , conforme Dias (2011).

Para as diferentes inclinações da geometria, os resíduos dos parâmetros, como energia cinética turbulenta (*turbulent kinetic energy – tke*), apresentaram convergência, conforme Tab. 4. Na Fig. 4 demonstra, como exemplo, a geometria inclinada a 135° e sua convergência de resíduos.

Tabela 4. Comparativo entre as Diferentes Inclinações e sua Convergências de Resíduos

Inclinação (°)	Iterações
70	5.600
90	6.500
110	5.400
135	3.600

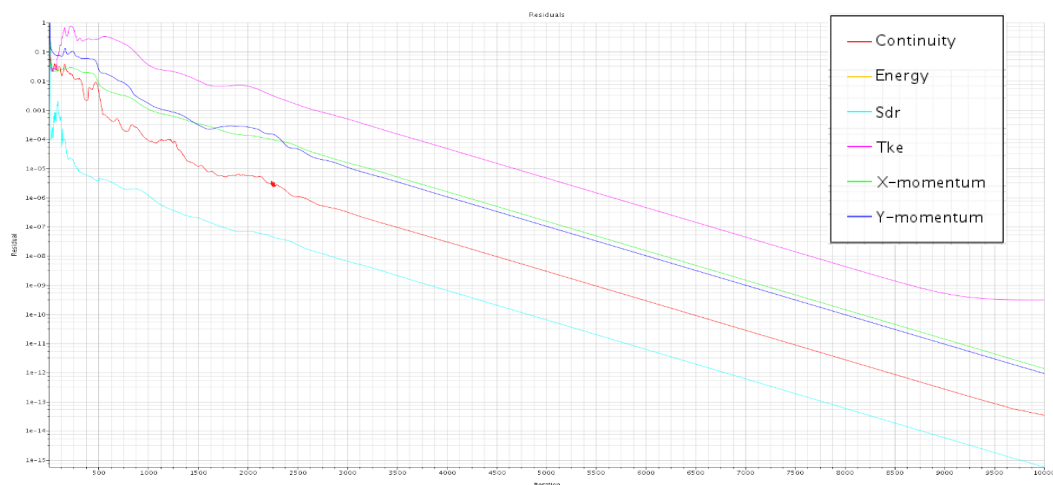


Figura 4. Gráfico Residual – Valores de Resíduos X Iterações - Inclinação 135°

Contudo, percebeu-se que quanto maior a inclinação da geometria em direção à superfície, menos iterações eram necessárias para verificar a convergência dos resultados, não sofrendo alterações dos resíduos ao longo das sucessivas iterações (DIAS, 2011).

Em relação a variação de velocidade, apresentou-se nos modelos simulados, uma região de velocidade máxima de aproximadamente 6,20 m/s e velocidade mínima entre $5,80 \times 10^{-6}$ e $1,68 \times 10^{-6}$, aproximadamente. Além disso, observou-

se duas regiões onde ocorreu o descolamento da camada limite, confirmando a geração de duas bolhas de recirculação causadas por um obstáculo (falésia), Fig. 5.

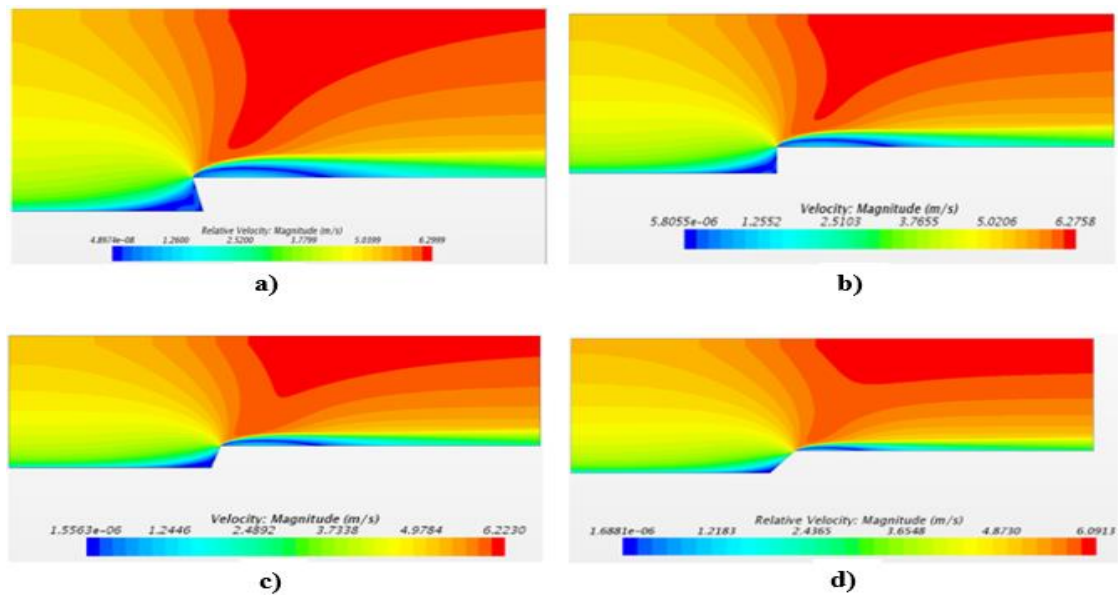


Figura 5. Velocidade de Escoamento: a) 70°, b) 90°, c) 110° e d) 135° Respectivamente

A geração de duas bolhas de recirculação, uma a barlavento à falésia e a outra a sotavento, sendo a barlavento caracterizada por zona de alta pressão e a sotavento por zona de baixa pressão, ocorreu-se devido ao gradiente de pressão localizada nessas regiões, sendo que este gradiente de pressão é causado pela variação de velocidade do escoamento ao encontrar-se com um obstáculo (falésia), tendo-se maior velocidade nas zonas de baixa pressão, exceto na região da camada limite e na zona de recirculação de baixa pressão, Fig. 6.

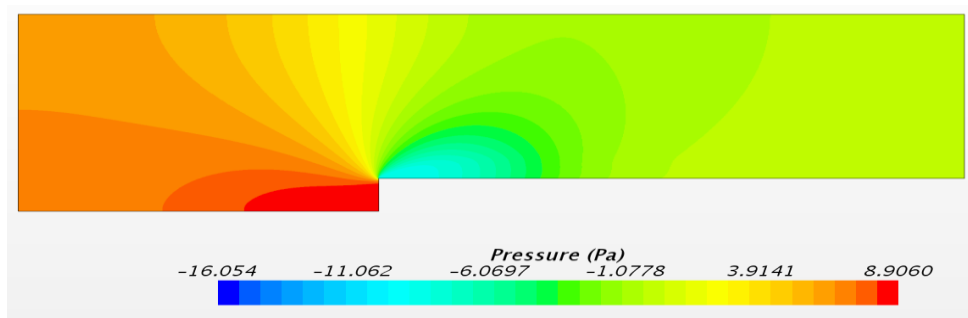


Figura 6. Variação de Pressão – Inclinação 90°

Em relação a zona de baixa pressão gerada, observou-se variações de altura e comprimento da bolha de recirculação, porém, Pires (2009) descreve que quanto maior o grau de inclinação da falésia em relação à superfície, menor a altura da bolha de recirculação e maior comprimento, entretanto, nos modelos notou-se que essa premissa não é totalmente verificada, conforme Tab. 5. Fato tal, que pode ser devido a influência de parâmetros não utilizados e configurados, como a rugosidade da superfície e temperatura.

Tabela 5. Dimensões Aproximadas das Bolhas de Recirculação à Baixa Pressão

Inclinação (°)	Altura (m)	Comprimento (m)
70	24,2	368,3
90	20,2	325,0
110	18,6	318,9
135	12,7	220,8

O aumento da velocidade na zona de baixa pressão se deu pela convergência das linhas de corrente, ou seja, convergência do fluxo de ar para uma determinada região, Fig. 7.

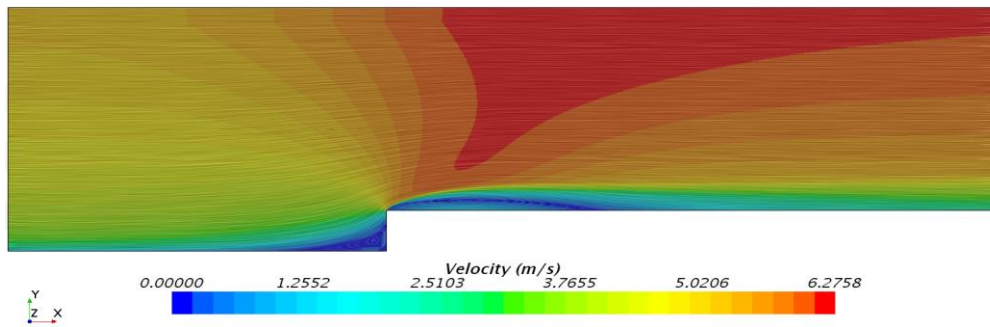


Figura 7. Convergência das Linhas de Corrente - Inclinação 90°

A presença de turbulência causada pela inclinação de geometria, foi percebida a partir da energia cinética turbulenta (*turbulent kinetic energy*), transporte de energia através de movimento turbulento, tem-se uma zona turbulenta na bolha de recirculação de baixa pressão e uma dissipação da energia cinética turbulenta ao longo da extensão a sotavento, Fig. 8.

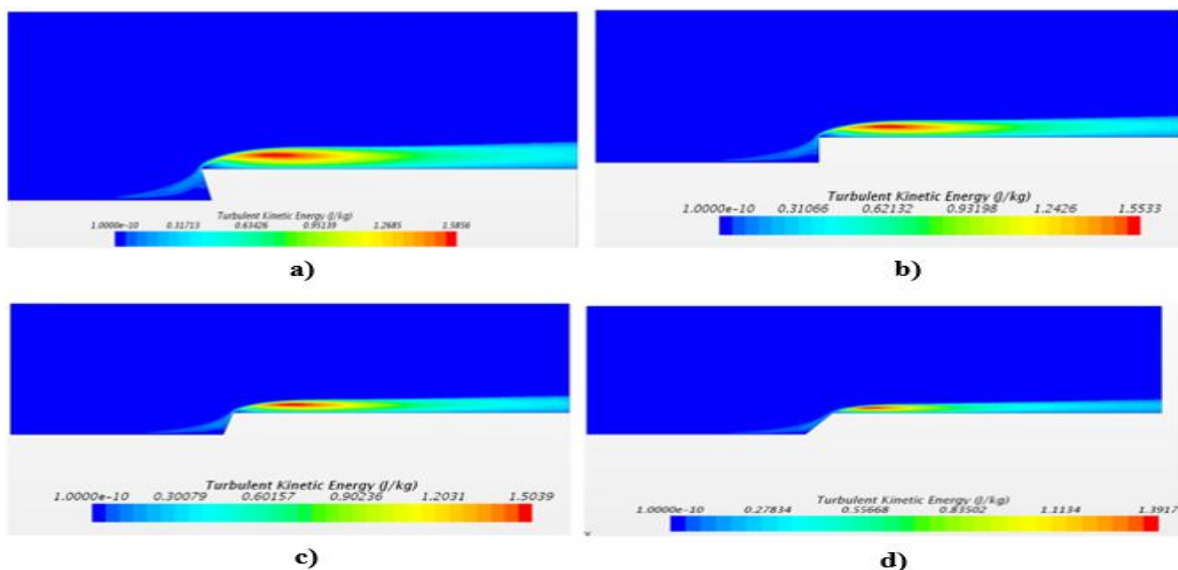


Figura 8. TKE: a) 70°, b) 90°, c) 110° e d) 135° Respectivamente

Para os diferentes modelos, há diferentes comportamento da turbulência gerada pela falésia, sendo que na geometria com inclinação de 70°, a turbulência ocorre de forma mais abrangente, e esta vai diminuindo com o aumento do ângulo de inclinação.

Um estudo sobre a geometria de 90° foi realizado com objetivo de comparar resultados com diferentes y^+ , sendo os valores utilizados de y^+ igual a 0,233, 0,5, 1,0 e 5. Entretanto, para diferentes tipos de inclinações de geometria, não se obteve diferenças expressivas nos resultados y^+ , provavelmente devido à pequena variação da distância de um elemento computacional para um elemento computacional adjacente, ou seja, devido ao alto refinamento da malha nas camadas próximas da superfície analisada.

5. CONCLUSÃO

Através das simulações dos modelos utilizados, percebe-se que a inclinação da falésia e refinamento de malha são fatores importantes que afetam os resultados obtidos. Quando considerado uma geometria, por exemplo, a geometria de inclinação 70° em relação à superfície, em direção ao mar, percebeu-se que esta geometria é a que mais afeta o escoamento da região, pois a mesma possui uma zona de baixa pressão maior do que as demais inclinações, apresentando a maior altura e comprimento de bolha de recirculação.

Além disso, o trabalho não permite concluir sobre o crescimento da energia cinética turbulenta e bolhas de recirculação em geometria entre 0° e 90° entre parede e mar, uma vez que os resultados encontrados divergem dos apresentados por Pires (2009), provavelmente devido a parâmetros não usados, como rugosidade da superfície e temperatura, sendo necessário mais e novos estudos sobre o assunto.

A partir dos resultados obtidos, confirmou-se a influência da geometria sobre o comportamento da CLI, sendo que as zonas de recirculação do escoamento são bastante imprevisíveis, transportando uma grande quantidade de energia e afetando o deslocamento da massa de ar. Todavia, um equilíbrio é causado quando os efeitos dissipativos superam os de

produção da turbulência. Contudo, percebeu-se que quanto maior a inclinação da geometria em direção à superfície, menos iterações eram necessárias para verificar se a solução convergia, não sofrendo alterações dos resíduos ao longo das sucessivas iterações (DIAS, 2011).

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pela ajuda financeira e incentivo para publicação deste artigo e a empresa Siemens pela utilização de seu software Star-CCM+.

7. REFERÊNCIAS

- Dias, João P. A. Simulação Numérica do Escoamento em Turbinas Colocadas numa Falésia. Lisboa, Portugal, 2011.
- Moreira, Gilberto A. Modelagem Numérica da Camada Limite Atmosférica com Validação Experimental. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2007.
- Moreira, Gilberto A. Desenvolvimento de Modelos de Camada Limite Atmosférica Aplicados a Microrregiões. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2012.
- Oliveira, W.; Reis, Mara N. E.; Pires, Luciana. Análise Iniciais da Estrutura Atmosférica Turbulenta sobre Terrenos Complexos. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, Ceará, 2016.
- Pires, Luciana. B. Estudo da Camada Limite Interna Desenvolvida em Falésias com Aplicação para o Centro de Lançamento de Alcântara. São José dos Campos, Brasil, 2009.
- Seidler, Nelson; Ramos, Felipe. Estudo da Energia Eólica para Aproveitamento em Pequenos Empreendimentos, Vivências. Vol.7, N.13: p.108-127, 2011.
- Sherry, Michael; Jacono, David Lo; Sheridan, John. Flow Separation Characterisation of a Forward Facing Step Immersed in a Turbulent Boundary Layer. Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena Seoul, Korea, 22-24, 2009.
- Versteeg; Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Glasgow: Parson Education Limited, 2007.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

NUMERIAL ANALYSIS OF TURBULENCE GENERATED IN CLIFFS: FLOW IN DIFFERENT GEOMETRIES

Michael Ladeira Balbino, e-mail: balbinomichael@gmail.com

Mara Nilza Estanislau Reis, e-mail: mara@pucminas.br

Frederico Rodrigues da Costa Horta, e-mail: fredericorchorta@hotmail.com

Mateus Gustavo Gonçalves, e-mail: mateus13gustavo@gmail.com

Wender Pereira de Oliveira, e-mail: wender-7@hotmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico-BH

Abstract. This work studied the region of Alcântara-MA, in which its coastline is formed by cliffs (variable geometric structure), and these structures have great potential for wind energy production. With the aid of the STAR-CCM + software, it was possible to analyze the variations and transitions of the flows modified by the irregular geometry of the cliffs, obtaining results of profiles of wind speed, kinetic energy of the winds, type of flow and variations of parameters of the recirculation zones of the region. Through the simulations with different inclinations, it was noticed that mesh refinement and slope are important factors that affect the obtained results, the greater the inclination of the geometry towards the surface, the less iterations were necessary to verify if the solution converged, not undergoing changes of the residues over successive iterations. The literature shows a large disparity of values in the length of the recirculation bubble for similar geometric conditions and even Reynolds number, where the length of the recirculation bubble is very sensitive to flow parameters and to the geometry of the cliff, as for example, height of the atmospheric boundary layer, height of the step, Reynolds number and slope of the cliff, being the last one, the greater the degree of inclination of the cliff, the smaller the height of the bubble of recirculation and greater longitudinal length. However, from the obtained results, the influence of the geometry on the behavior of the inner boundary layer and on the recirculation zones was confirmed, where it was observed that in low pressure zones, there are variations in height and length of the recirculation bubble without being directly proportional, a fact that may be due to the influence of unused and configured parameters such as surface roughness and temperature.

Keywords: Boundary layer; CFD; Cliff; Turbulence.