

X-016 – ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DE CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS NA DISPERSÃO DE GASES E PARTÍCULAS EMITIDOS DE UMA CHAMINÉ CILÍNDRICA ISOLADA

Evandro Roncete Deorce⁽¹⁾

Graduando no curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES.

Bruno Furiéri⁽²⁾

Doutor em Engenharia Ambiental, Professor da Coordenadoria de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES.

Endereço⁽¹⁾: Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara, Vitória - ES, 29040-780 - Brasil - Tel: (27) 3331-2237 - e-mail: evandrodeorce2@gmail.com.

RESUMO

As emissões atmosféricas exacerbadas, advindas de diversos tipos de fontes, representam impactos ambientais que afetam a saúde humana e a qualidade dos recursos naturais utilizados para a manutenção das demandas de produção da sociedade atual. Em resposta à problemática das dispersões atmosféricas de poluentes, métodos com o propósito de mensurar as emissões e compreender a complexidade das interações entre os mecanismos que descrevem o comportamento dessas emissões, têm sido desenvolvidos. Os métodos experimentais e numéricos permitem simular situações reais em escalas adaptadas, permitindo a análise de diversas situações hipotéticas. Os métodos numéricos implementados em *softwares* que permitem gerar domínios computacionais complexos são elementos chave nos estudos das dispersões atmosféricas, pois oferecem acurácia nos resultados, associados à agilidade e versatilidade dos *softwares* que permitem a realização dos estudos, além de promover a redução de gastos com infraestrutura. O presente trabalho utiliza de tecnologias da mecânica dos fluidos computacional para analisar a influência de condições meteorológicas na dispersão de gases e partículas emitidas por uma chaminé cilíndrica isolada. São propostas discussões sobre a influência e importância do domínio e malha computacional, modelos de turbulência e informações gerais do pré-processador, visando entender a relação dos resultados obtidos com os métodos numéricos que geraram tais resultados. Os estudos realizados puderam, através das representações gráficas de magnitude de velocidade, dispersão de partículas e vetores de velocidade, subsidiar discussões sobre o escoamento ao redor de obstáculos, formação de plumas de dispersão e problemas ambientais como a deposição de partículas nas proximidades de fontes pontuais.

PALAVRAS-CHAVE: Poluição Atmosférica, Simulação Numérica, Modelagem Matemática, Dispersão Atmosférica, Material Particulado.

INTRODUÇÃO

O aumento da urbanização e industrialização tem sido acompanhado pelo aumento da degradação ambiental e da qualidade de vida das populações, sendo as principais fontes poluidoras os automóveis e as unidades industriais (SANTOS; VAREJÃO; SILVA, 2011). As bacias aéreas de poluição não respeitam limites geográficos e não são fixas, tornando o problema da poluição atmosférica ainda mais complexo, uma vez que as áreas afetadas pela emissão dos poluentes não são apenas as áreas instantaneamente próximas às fontes.

Os poluentes atmosféricos podem gerar efeitos negativos na vegetação, em corpos hídricos e também na saúde humana e de animais, podendo agravar doenças já existentes, como por exemplo, gerando efeitos crônicos que lesam os organismos aos poucos, após longos períodos de exposição (ALMANÇA *et al.*, 2011). A relação entre a poluição do ar e a população pode ser revelada com o aumento de doenças respiratórias agudas em crianças, que representa uma parcela representativa das causas de internações em hospitais nos grandes centros urbanos (CASTRO *et al.*, 2007).

A qualidade do ar de uma região é o resultado de complexas interações, envolvendo a emissão de poluentes atmosféricos por fontes fixas e móveis, locais e remotas, naturais e antropogênicas que, juntamente com as condições meteorológicas e das características do terreno da região, determinam a concentração de poluentes presentes na atmosfera. Portanto, para realizar a quantificação dos parâmetros que afetam a qualidade do ar

referente à determinada região, é fundamental o conhecimento do inventário das emissões de poluentes (relacionam as emissões com as fontes emissoras) e as características meteorológicas e geográficas. Com a quantificação e espacialização das principais fontes emissoras de poluentes atmosféricos, é possível aprofundar os conhecimentos das matrizes emissoras, assim subsidiando a geração de informações necessárias na tomada de decisões concernentes às emissões atmosféricas, tornando a gestão da qualidade do ar mais eficaz (IEMA, 2011).

Os parâmetros de emissões quantificados devem ser escolhidos de acordo com as características da região (a presença de indústrias com emissões específicas devem ser levadas em conta, por exemplo), porém poluentes gerais como material particulado total (MP), material particulado menor que 10 μm (MP_{10}), material particulado menor que 2,5 μm ($\text{MP}_{2,5}$), dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COV) geralmente são quantificados e utilizados para a geração do panorama da qualidade do ar em regiões metropolitanas.

Os processos de emissão e dispersão de poluentes na atmosfera são objetos de crescente preocupação dos responsáveis pela gestão da qualidade do ar de regiões urbanas industrializadas. Segundo Ma *et al.* (2016), experimentos em túneis de vento, medições de campo e estudos computacionais (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) são os métodos de investigação do comportamento de dispersão de contaminantes mais adequados em áreas de construções urbanas. A abrangência das aplicações do CFD no contexto de poluição atmosférica é extensa.

Labovský e Jelemenský (2013) demonstraram que com o aumento da capacidade de processamento das infraestruturas utilizadas para a realização das modelagens matemáticas, a complexidade dos casos que podem ser avaliados também aumenta. Os autores utilizaram de uma metodologia de adaptação de um sistema de informação geográfica (SIG) em malha computacional. Para verificar a capacidade dessa técnica de adaptação da malha computacional e a dispersão atmosférica, foi analisado a dispersão de gás cloro em uma situação de acidente industrial em Zilina (Eslováquia), onde a malha foi gerada a partir do mapa digitalizado da mesma cidade. A metodologia mostrou um resultado satisfatório e apresentou possíveis usos na análise de risco de determinadas áreas que estão sujeitas à esse tipo de acontecimento.

Cui *et al.* (2016) estudaram a predição da dispersão de poluentes em diversas escalas urbanas, mostrando a eficiência do método numérico em obter dados similares aos dados experimentais, obtidos pelo estudo através de túnel de vento. Além disso, o estudo pôde demonstrar a importância da escolha do modelo de turbulência que será utilizado na modelagem: para determinado intervalo de valores de número de Richardson (representa a relação entre a energia potencial e a energia cinética) o modelo *standard k- ϵ* representa melhor o escoamento e a distribuição de temperatura e, para outra faixa de valores, o modelo *k- ϵ Realizable* se mostrou mais adequado (CUI *et al.*, 2016).

Capelli *et al.* (2009) apresentaram estudos de predição de emissões odorantes advindas de plantas de tratamento de esgoto que, através de modelos de dispersão atmosférica como o AERMOD, podem ser analisadas e gerar dados que auxiliem na tomada de decisões sobre odores provenientes das plantas de tratamento de esgoto. Esses estudos utilizam de dados de meteorologia, relevo e características das fontes emissoras de poluentes e a partir dos mesmos é possível criar representações gráficas das plumas de dispersão geradas pelas fontes de poluentes (EPA, 2004).

São diversas e variadas as aplicações da modelagem matemática computacional na Engenharia Sanitária e Ambiental, a citar: dimensionamento de reatores, transporte de poluentes gasosos e sólidos em meios aquáticos, previsão de eficiência de etapas de tratamento de água e esgoto. O presente trabalho é focado na dispersão atmosférica com inúmeras possibilidades de replicação da metodologia nestas atividades supracitadas. O objetivo geral do presente artigo é a simulação numérica do escoamento atmosférico turbulento incidente sobre uma chaminé cilíndrica isolada representando uma fonte pontual. Busca-se com a investigação analisar os efeitos das condições meteorológicas (especificamente a magnitude do vento incidente) e da fonte (velocidade de exaustão da chaminé) sobre a dispersão de partículas utilizando a dinâmica dos fluidos computacional.

PROCEDIMENTO DE VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Estudos numéricos que utilizam do método de validação se baseiam em resultados previamente obtidos por estudos experimentais em laboratório ou em campo que se assemelham à situação a qual o estudo aborda. No presente trabalho, o estudo utilizado como base para validação foi realizado por Saïd *et al.* (2005), que consiste na análise experimental e numérica da dispersão de poluentes a partir de chaminé. O aparato experimental utilizado pelos autores foi a estrutura (Figura 1) de um túnel de vento que inclui um cilindro (que simula a chaminé), um jato de ar (simulando o escoamento longitudinal de ar atmosférico), um espelho e um laser (utilizados na metodologia *Particle Image Velocimetry – PIV*). A partir dos experimentos realizados foi possível estabelecer o perfil de velocidade do escoamento incidente no domínio computacional. O presente trabalho irá inicialmente replicar as condições estabelecidas pelos autores do trabalho experimental com o intuito de reproduzir as suas condições. Porém, o *software Ansys Fluent* seguindo as mesmas condições foi validado por Nascimento (2004) para o escoamento sobre um leito de partículas. Com estas condições, priorizou-se as diferentes simulações realizadas com o objetivo de entender mais detalhadamente o fenômeno.

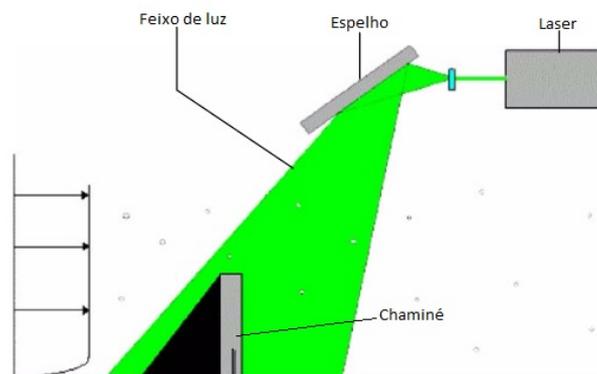


Figura 1: Aparato experimental utilizado para a realização do PIV (adaptado de Saïd *et al.*, 2005).

APRESENTAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é, hoje em dia, uma realidade graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento (MALISKA, 2004). Com o desenvolvimento dessas tecnologias, a mecânica dos fluidos computacional se tornou uma tecnologia viável na análise de sistemas de escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados.

Ansys Workbench e *Fluent* são ferramentas que permitem a simulação de problemas da mecânica dos fluidos de quaisquer aplicações que envolvam escoamento de gases, escoamento de líquidos ou transferência de calor (ANSYS, 2011). A partir dessa ferramenta, temos como objetivo reproduzir as condições que geraram os resultados experimentais de Saïd *et al.* (2005).

A ordem dos processos realizados pelo *software* e suas respectivas funções é dada por:

- i. Elaboração da geometria: são estabelecidas as condições de contorno (parede, entrada, saída e simetria) em cada face do domínio computacional.
- ii. Elaboração da malha computacional: o domínio computacional proposto é discretizado, ou seja, dividido em vários volumes de controle para que as equações governantes do escoamento sejam aplicadas individualmente à cada novo volume de controle. Assim, promovendo o aumento da acurácia e da estabilidade das simulações numéricas. O *software* permite a definição do número e do tamanho das células da malha, bem como o refinamento da malha, sendo possível ajustar maior ou menor densidade de células numa região conforme o grau de detalhamento necessário ao estudo.
- iii. Estabelecimento das condições físicas: para a realização da simulação numérica é necessário a definição das características do escoamento e do(s) fluido(s) em estudo, sendo selecionadas condições de escoamento invíscido, viscoso, laminar, turbulento, entre outros. Além disso, é determinado o tipo de partícula que será simulada (ar, água, material particulado, etc) e as equações governantes de escoamento que devem ser resolvidas (equação da conservação da quantidade de movimento,

conservação da energia, etc). Por fim, associa-se partes da geometria às condições de contorno, que são utilizadas pelo *software* para aplicar as condições adequadas a cada face, como por exemplo, a condição de não deslizamento em regiões próximas às superfícies sólidas (ANSYS, 2011). Nessa etapa também se determinam os critérios de convergência para os cálculos das interações que serão realizadas.

- iv. Resolução das equações governantes do escoamento: é realizado o processamento das equações como a da conservação da quantidade de movimento, conservação da espécie química, conservação da energia, etc. É a fase que demanda o maior custo computacional (tempo operacional) de todo o processo. A partir dos resultados das equações, que são aplicados a todos os volumes de controle gerados a partir da discretização do domínio computacional, é possível gerar resultados.
- v. Pós-processamento: após o processamento das simulações numéricas é possível visualizar os resultados em forma de gráficos, obtendo os contornos de distribuição de resultados de velocidade, tensão cisalhante, temperatura, espécie química e/ou representação dos vetores de velocidade em superfície planas no domínio computacional, gerando gráficos de perfis de velocidade e demais variáveis.

A Figura 2 mostra um detalhamento da malha computacional essencial na resolução das equações governantes pelo programa computacional. Na imagem observa-se a condição de contorno de entrada do domínio computacional. Nela é imposto um perfil vertical de velocidade (obtido a partir dos experimentos em túnel de vento) e demais variáveis ligadas à modelagem da turbulência. Foram realizados refinamentos na malha, ou seja, aumento da quantidade de elementos em regiões de maior interesse, promovendo maior acurácia na simulação. Os refinamentos foram feitos próximos à fonte (através de esfera de influência) e às superfícies sólidas, incluindo a parte inferior do domínio (*inflation*), pois nesta a ação da condição de não-deslizamento torna pertinente o refinamento da região. Esta etapa é necessária pois os gradientes de velocidade mais importantes ocorrem na interface com tais superfícies. O refinamento permite ao programa visualizar com detalhes estas regiões.

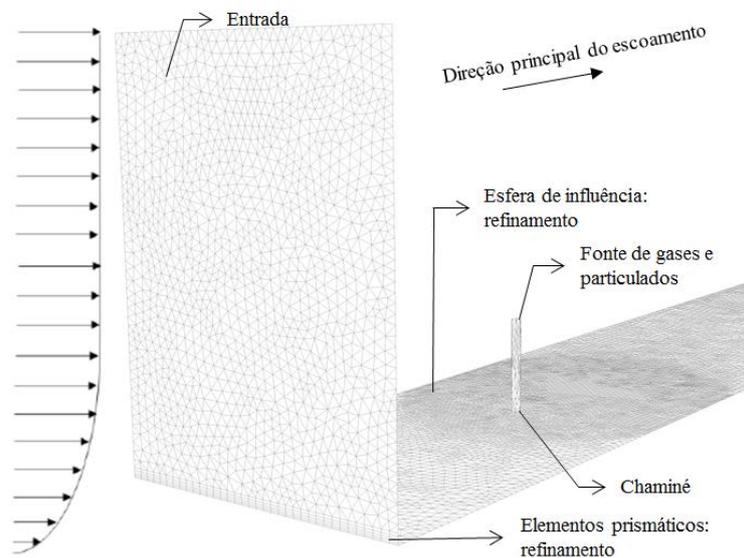


Figura 2: Detalhamento da malha computacional e condições de contorno do domínio baseadas no trabalho experimental em túnel de vento de Saïd (2005).

O método de acoplamento velocidade-pressão utilizado foi o SIMPLEC (Patankar, 1980), o método de interpolação utilizado para a discretização espacial da pressão foi o de 2ª Ordem. A discretização de *momentum* foi realizada pelo método de 2ª Ordem *Upwind*. As hipóteses simplificadoras aplicadas foram as seguintes: i) Fluido incompressível; (ii) Condição de estabilidade atmosférica neutra e (iii) Escoamento permanente.

O sistema conta com duas entradas de velocidade: a entrada do domínio, que foi associada a um perfil de velocidade, e a entrada pela chaminé, associada a uma velocidade constante (que forma o jato advindo da chaminé). No escoamento advindo da chaminé foram injetadas partículas de glicerina. As informações complementares do domínio e as propriedades físicas dos materiais são listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades físicas dos materiais utilizados e configurações de pré-processador e domínio computacional.

PROPRIEDADE	COMENTÁRIOS
Modelo de Turbulência	<i>k-ε realizable</i>
Fluido (entrada do domínio)	Ar
Fluido (entrada da chaminé)	Glicerina
DIMENSÕES DO DOMÍNIO	
X	1,4 m
Y	0,4 m
Z	0,3 m
Altura da Chaminé	0,1 m
Densidade do Ar	1,225 kgm ⁻³
Densidade da Glicerina	1260 kgm ⁻³

EQUAÇÕES GOVERNANTES DO ESCOAMENTO

As equações de conservação, mesmo após simplificações, não têm soluções analíticas, portanto é necessário a realização das soluções numéricas para as mesmas. Essas soluções são realizadas através do *software* (Fluent), que envolve a discretização no espaço e no tempo das variáveis de interesse. As equações que governam o escoamento de fluido na sua forma completa podem ser descritas por:

Equação da Conservação de Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{equação (1)}$$

Equação da Conservação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\rho \delta_{3i} g - 2\rho \varepsilon_{ijk} \Omega_j U_k - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad \text{equação (2)}$$

Equação da Conservação de Massa da Espécie Química

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_m * \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + M \quad \text{equação (3)}$$

Sendo t o tempo [s]; ρ a massa específica do fluido [kgm⁻³]; U_i, U_j, U_k as componentes instantâneas das velocidades nas direções i, j e k , respectivamente [ms⁻¹]; x_i, x_j identificam as coordenadas nas direções i e j , respectivamente [m]; δ_{3i} representa o Delta de Kronecker; Ω_j representa o vetor velocidade angular na direção j [s⁻¹]; $\partial \tau_{ij}$ – tenso das tensões [Nm⁻²]; ω – concentração do contaminante [kgkg⁻¹]; M – termo fonte de massa [kgs⁻¹m⁻³] e ε_{ijk} o símbolo de Levi-Civita ou tensor alternado.

As possíveis simplificações nas equações de conservação podem facilitar tanto a análise teórica quanto a análise numérica. Para o escoamento atmosférico, um parâmetro importante é a condição de estabilidade atmosférica, que pode ser definida como sendo a capacidade de resistir ou intensificar os movimentos verticais das partículas. A estabilidade atmosférica pode ser classificada com base no gradiente de temperatura potencial. Caso o gradiente de temperatura potencial for positivo, as condições atmosféricas são ditas “estáveis” e os movimentos verticais suprimidos. Porém, se o gradiente for negativo, a atmosfera é classificada como “instável” e os movimentos verticais são intensificados. E, finalmente, caso o gradiente seja nulo, os movimentos não são suprimidos nem intensificados e atmosfera é dita neutra e, nessa condição, não é necessária a análise da Equação da Conservação de Energia (NASCIMENTO, 2014).

MODELOS DE TURBULÊNCIA

Flutuações no campo de velocidades fazem com que haja mistura das quantidades transportadas, como *momentum* e energia, fazendo com que os valores das quantidades transportadas também flutuem. Essas flutuações podem ser de pequena escala, porém podem gerar custos computacionais altíssimos para aplicações desses modelos em casos de engenharia. A partir dessa problemática, são utilizados conjuntos de equações que exigem custo computacional reduzido, obtidos através da utilização de valores médios de tempo nas equações governantes que utilizam de variáveis de valores instantâneos. Por isso, modelos de turbulência são necessários para resolver essas variáveis desconhecidas.

Não há apenas um modelo de turbulência que se adequa e pode ser utilizado em todas as situações. Algumas considerações devem ser feitas quando é escolhido o modelo, incluindo: os princípios físicos abrangidos no escoamento, o nível de precisão que se deseja obter, os recursos computacionais disponíveis, etc (CABLE, 2009).

O modelo k-ε se tornou um dos modelos de turbulência mais utilizados pois promove robustez, economia e acurácia razoável para um grande espectro de escoamentos turbulentos. Esse modelo foi extensamente estudado e melhoramentos foram feitos ao modelo padrão, aprimorando seu desempenho. Os modelos RNG k-ε e k-ε *Realizable* têm formas similares nas equações de transporte para k (energia cinética turbulenta) e ε (dissipação da energia cinética turbulenta).

O modelo k-ε *Realizable* proposto por Shih (1995) é, dentre as variações dos modelos k-ε, o mais recente e apresenta duas diferenças principais quando comparado com o modelo padrão: i) a forma das equações de viscosidade turbulenta é baseada nas restrições de realização e ii) a tensão normal de Reynolds e a inequidade da turbulência de tensão de cisalhamento de Schwarz (ou seja, algumas restrições matemáticas são satisfeitas). Essas condições não são satisfeitas por nenhum dos outros dois modelos k-ε, o que faz o modelo *Realizable* seja mais preciso na predição de escoamentos, como em escoamentos separados e escoamentos secundários complexos (CABLE, 2009).

Nos termos propostos por Shih (1995), a equação de transporte se torna:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad \text{equação (4)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad \text{equação (5)}$$

Sendo G_k a produção de energia cinética por forças de empuxo; ϵ a taxa de dissipação de energia cinética; G_b a produção de energia cinética turbulenta por conta da flutuação; Y_M a dilatação flutuante em compressibilidade turbulenta que contribui para a taxa de dissipação; S_ϵ e S_k são termos fonte; σ_k e σ_ϵ são os números de Prandtl para energia cinética turbulenta e sua dissipação; C_1 , C_2 e C_3 são constantes determinadas experimentalmente.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Através do pré-processador Fluent foram processadas três situações diferentes de arranjos de velocidade do domínio computacional e da chaminé (Tabela 2).

Tabela 2 – Casos analisados nas modelagens realizadas.

CASO	VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO LIVRE (DOMÍNIO)	VELOCIDADE MÉDIA DO JATO (CHAMINÉ)
1	1 m.s ⁻¹	5 m.s ⁻¹
2	1 m.s ⁻¹	1 m.s ⁻¹
3	5 m.s ⁻¹	1 m.s ⁻¹

Os arranjos de velocidades dos casos 1, 2 e 3 mostrados na Tabela 2 podem ser utilizados para representar a pluma de concentração de partículas de glicerina nos escoamentos advindos da chaminé. A Figura 3 apresenta a distribuição de concentração de partículas em um plano vertical e longitudinal no centro do eixo transversal.

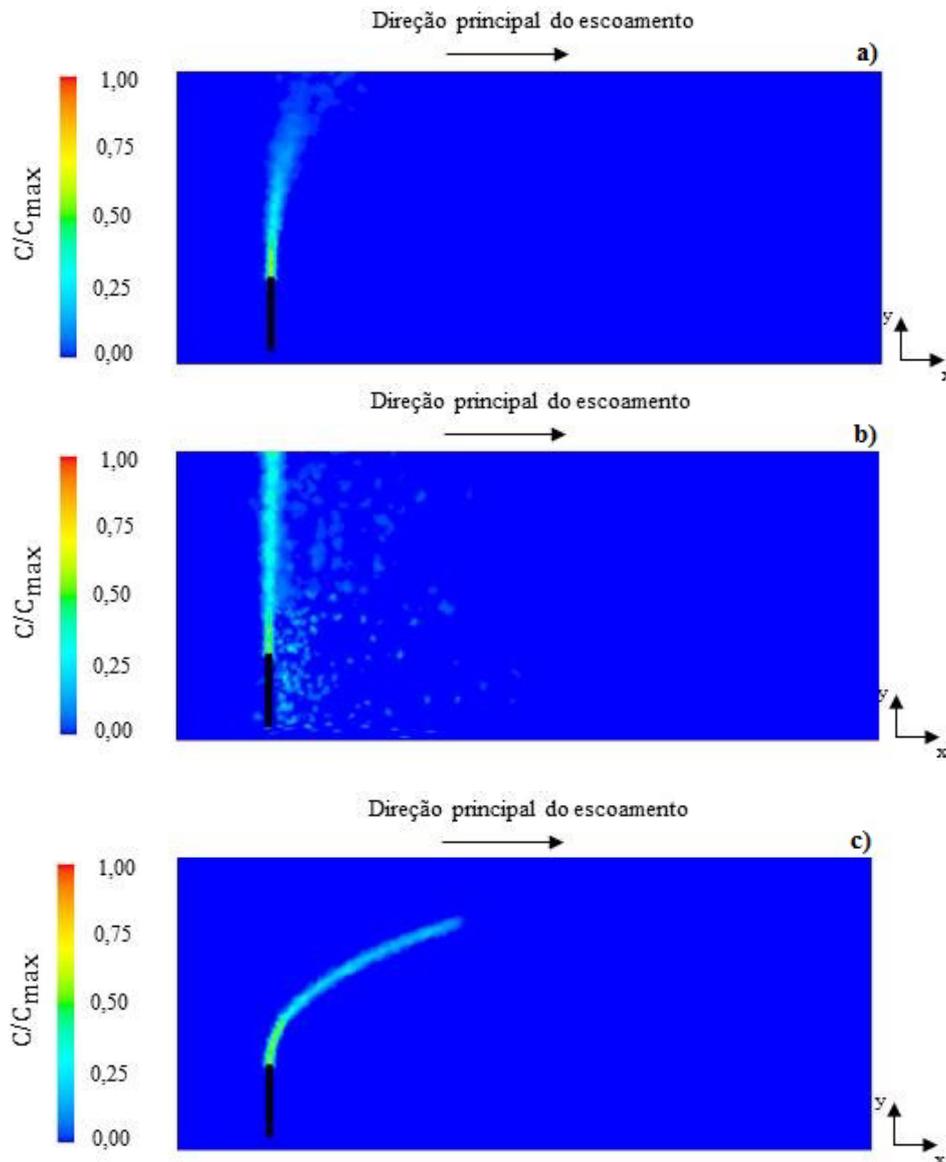


Figura 3: Distribuição da concentração de partículas para os casos 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

A parte inferior sólida (*ground*) do domínio computacional também é representada nas mesmas figuras. As escalas de cores da Figura 3 mostram os dados de concentração de forma adimensional, como uma razão da concentração máxima observada para a dada simulação. O material simulado é o mesmo que o utilizado nos experimentos, almejando uma comparação e validação futura.

Plumas geradas por fontes pontuais, de forma geral, tendem a sofrer rapidamente os efeitos da direção do escoamento principal (vento incidente), porém é possível notar que na Figura 3(b), devido ao velocidade de saída das partículas na chaminé ser significativamente mais alta que a velocidade média do escoamento principal, o jato consegue vencer o escoamento em zonas próximas à superfície da chaminé. Na Figura 3(a) podemos notar que com velocidades mais baixas do jato, a pluma gerada começa a se curvar para a direção do escoamento predominante, porém, na Figura 3(c) é possível notar evidentemente a formação da pluma de dispersão atmosférica.

Os gráficos gerados à partir da distribuição da concentração de partículas também podem ilustrar a problemática da deposição das partículas emitidas pela chaminé. As Figuras 3(a), (b) e (c) são representações de um plano xy (localizado no centro da dimensão no eixo z) e a parte inferior do domínio (*ground*). É possível notar que no caso 2 (Figura 3 (b)) há deposição de partículas próximas à fonte, enquanto nos casos 1 e

3, onde a velocidade do jato é igual ou inferior à velocidade do escoamento incidente, não há deposição desse material. Em estudos do transporte e dispersão de poluentes atmosféricos, esse fenômeno é de grande importância, pois afeta diretamente a maneira como esses poluentes se comportam próximos às fontes pontuais que os emitiram. Vale ressaltar que muitos outros fatores influenciam o comportamento de plumas de dispersão de poluentes, como por exemplo as condições atmosféricas, estabilidade atmosférica, temperatura, etc.

Os vetores de velocidade representados pelas Figuras 4 (a) e (b) permitem analisar a influência da velocidade do jato nas regiões próximas a chaminé. No caso em que a velocidade é consideravelmente mais baixa que o escoamento principal, a predominância do jato é rapidamente vencida e os vetores de velocidade do escoamento principal não demonstram sofrer influência significativa. No segundo caso, em que a velocidade é mais alta do que o escoamento principal, é possível notar a zona em que os vetores de velocidade advindos da chaminé são predominantes, além disso, é possível notar a influência nos vetores de velocidade à jusante da chaminé, demonstrando a capacidade do jato em influenciar o escoamento principal.

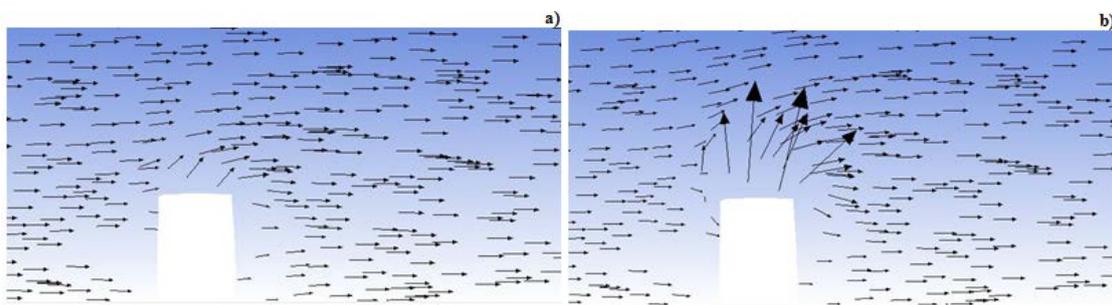


Figura 4 – Vetores de velocidade saindo da chaminé para os casos 1 (a) e 2 (b).

A Figura 5 mostra a distribuição de velocidade longitudinal média do caso 3 representando o escoamento ao redor do obstáculo cilíndrico. A visualização representa a vizinhança do obstáculo e os resultados apresentado está adimensionalizado pela velocidade do escoamento na corrente livre $u_{\infty} = 5 \text{ ms}^{-1}$.

Escoamentos ao redor de obstáculos, de forma geral, apresentam zonas de recirculação bem definidas e observáveis, próximas às faces de incidência do escoamento, sobre o obstáculo e a jusante do obstáculo (sendo essa a de maior de dimensão). Essas zonas de recirculação podem ser caracterizadas por velocidades longitudinais agindo no sentido contrário da direção principal do escoamento. No presente estudo, porém, podemos observar que não há formações relevantes das zonas de recirculação à montante ou sobre a chaminé, e esse fenômeno pode ser explicado pelo baixo diâmetro da estrutura (10 mm). Através da análise da magnitude de velocidade, podemos notar a influência da condição de não-deslizamento, onde o fluido em contato com a superfície sólida possui velocidade nula em relação à superfície. A velocidade aumenta até o estabelecimento da camada limite, onde a velocidade média de escoamento permanece constante. Na região à montante podemos observar a redução da magnitude da velocidade longitudinal até a altura da chaminé, ocasionada pelo contato incidente do escoamento principal com a estrutura física do obstáculo. Essa influência na velocidade à jusante da chaminé se estende até a extremidade da dimensão longitudinal do domínio.

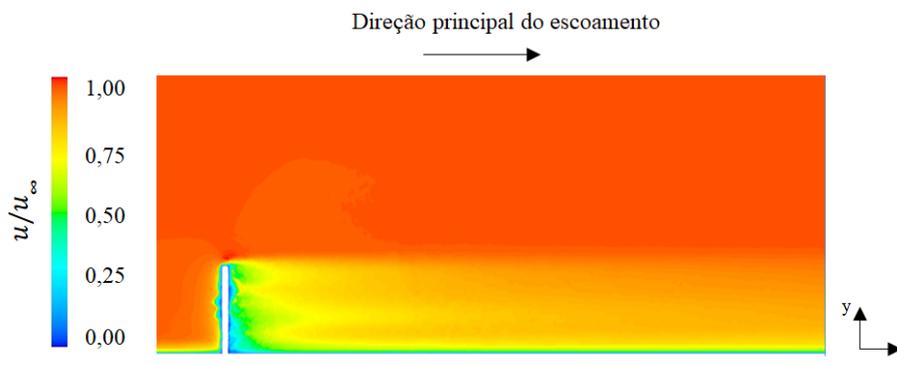


Figura 5 – Distribuição de magnitude de velocidade longitudinal em plano vertical, $u_{\infty} = 5 \text{ ms}^{-1}$.

CONCLUSÕES

Foram aplicados conceitos da mecânica dos fluidos computacional para gerar um domínio computacional similar à estudos experimentais realizados previamente. Foi possível estudar a importância do refinamento da malha computacional e a relação direta com os resultados gerados após o processamento do domínio. Além disso, foi possível notar a complexidade das interações dos fatores que influenciam os escoamentos de forma geral, principalmente os de extrema importância na execução do estudo presente, como modelos de turbulência, equações governantes, condições simplificadoras, injeções de partículas, perfis de velocidade, etc. Foi possível verificar a influência do escoamento incidente à pluma gerada pela chaminé, influenciando diretamente a forma da mesma. A partir dos estudos supracitados foi possível verificar a problemática das zonas de recirculação à jusante de obstáculos que, em casos como os de chaminé, podem ser muito significativos no aspecto ambiental, uma vez que caso hajam estações de coleta de dados para desenvolvimento de relatórios de controle e qualidade do ar, podem comprometer a precisão dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANSYS. *Fluid Dynamics*. 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/y9Cgol>>. Acesso em: 10 dez. 2016.
2. ALMANÇA, N. C. V. *et al.* Poluição atmosférica – Análise sobre as medidas de controle da poluição atmosférica e o sistema de informação do Parque do Ibirapuera. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, n. 2, p. 87-100, 2011.
3. CABLE, M. *An evaluation of turbulence models for the numerical study of forced and natural convective flow in Atria*. Dissertação de Mestrado. Queen's University. Kingston - Ontario. Canada, 2009.
4. CAPELLI, L. *et al.* Predicting odour emissions from wastewater treatment plants by means of odour emission factors. *Water Research*, v. 43, p. 1977-1985, 2009.
5. CASTRO, H. A. *et al.* Air pollution and respiratory diseases in the Municipality of Vitória, Espírito Santo State, Brazil. *Cad. Saúde Pública*, v. 23, n. 4, p. S630-642, 2007.
6. CEZANA, F. C. Simulação numérica da dispersão de poluentes ao redor de um obstáculo isolado sob diferentes condições de estabilidade. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES. Brasil. 2007.
7. CUI, P. *et al.* Buoyancy flows and pollutant dispersion through different scale urban areas: CFD simulations and wind-tunnel measurements. *Buildings and Environment*, v. 104, p. 76-91, 2016.
8. COSTA, I. B. Avaliação de desempenho do modelo de turbulência k- SST para dispersão de poluentes ao redor de obstáculo cúbico em diferentes condições de estabilidade atmosférica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES. Brasil, 2016.
9. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. AERMOD: *Description of model formulation*. EPA-454/R-03-002. 2004. 91 p.
10. INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA; ECOSOFT. Inventário de Emissões Atmosféricas da Região da Grande Vitória. Acordo de Cooperação Técnica IEMA-ECOSOFT RTC10131-R1. 2011. 48p. Disponível em: <goo.gl/Jl48yz>. Acesso em: 15 abr 2017.
11. LABOVSKÝ, J.; JELEMENSKÝ, L. *CFD-based atmospheric dispersion modeling in real urban environments*. *Chemical Papers*, v. 67, p. 1495-1503, 2013.
12. MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. 2 ed. Brasil: LTC, 2004.
13. NASCIMENTO, E. L. N. Suspensão e deposição de material particulado emitido por pilhas de estocagem de granulados: uma abordagem numérica empregando LES. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, Brasil, 2014.
14. PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow, series in computational methods in mechanics and thermal sciences*, 1970.
15. SAÏD, N. M. *et al.* Three-dimensional numerical calculations of a jet in an external cross flow: application of dispersion of pollutants. *Journal of Heat Transfer*, v. 125, p. 510–522, 2003.
16. SAÏD, N. M. *et al.* Experimental and numerical analysis of pollutant dispersion from a chimney. *Atmospheric Environment*, v. 39, p. 1727-1738, 2005.
17. SANTOS, A. R.; VAREJÃO, A. S.; SILVA, K. G. Modelagem do impacto da ampliação da avenida Fernando Ferrari (Vitória- ES) na qualidade do ar em sua redondeza. *Soc. & Nat.*, v. 23, n. 2, p. 249-262, 2011.
18. SHIH, T. H. *et al.* A new k-ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: model development and validation. *Computers Fluids*, v. 24, p. 227-238, 1995.

19. X. Ma, *et al.*, *Modelling of pollutant dispersion with atmospheric instabilities in an industrial park. Powder Technol.*, v. 314, p. 577-588, 2017.
20. ZINOUBI, J. *et al.* *Experimental study of the resulting flow of plume-thermosiphon interaction: application to chimney problems. Thermal Engineering*, v. 25, p. 533-544, 2004.