

# SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO E MULTICOMPONENTE EM TORRE DE APAGAMENTO DE COQUE \*

Antônio Carlos Simões de Santana Filho<sup>1</sup>

## Resumo

Este trabalho propõe a utilização de simulação computacional adotando princípios de volumes finitos para avaliação do escoamento gasoso em torre de apagamento de coque. Tal simulação poderá fornecer dados, favorecendo a aplicação de tecnologias para redução e controle de emissões de material particulado no período do banho do coque, assim como estimar as variações e características da pluma emitida com a instalação de dispositivos de controle ambiental. Neste estudo são destacados os principais fatores para aplicação da simulação computacional, considerando as condições de contorno; modelos de evaporação; propriedades termofísicas e previsão de saída. Como variáveis de entrada para o modelo apresentado, foram selecionadas a concentração e granulometria do material particulado de vapor d'água da torre de apagamento de coque, através de ensaio de isocinética; as características físico-químicas da água de apagamento; as condições estruturais da torre de apagamento de coque e ciclos de apagamento de coque. Para validar a proposta apresentada, são mostrados resultados baseados nas simulações com o modelo computacional proposto.

**Palavras-chave:** Simulação Computacional, Volumes Finitos, Torre de Apagamento Coque, Emissão de Material Particulado.

## COMPUTATIONAL SIMULATION OF MULTISTAGE AND MULTICOMPONENT FLOW IN QUENCHING TOWER COKE

### Abstract

This study proposes the use of computer simulation by adopting principles of finite volumes for evaluation of gaseous flow in quenching tower. Such simulation can provide data, facilitating the application of technologies to reduce and control emissions of particulate matter in the bath period of Coke, as well as estimate the variations (characteristics) of the plume emitted with the installation of environmental control devices. In this work are the main factors for the application of the computer simulation, which are boundary conditions; drag models; Thermophysical properties; output forecast. As input variables to the model presented, were selected: concentration and particle size of particulate matter from water vapor of erasure of Coke (isokinetic test), physico-chemical characteristics of the water of erasure, structural conditions of erasing Coke, coke deletion cycle. To validate the proposal submitted are shown results based on simulations with the proposed model.

**Keywords:** Computer Simulation, Finite Volumes, Coke Deletion Tower, particulate matter.

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia Metalúrgica. Engenheiro Ambiental, Licenciatura em Matemática, Especialista em Meio Ambiente da CSN, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo computacional de previsão de escoamento gasoso em torre de apagamento de coque, favorecendo a escolha de tecnologias de abatimento de emissão de particulado em processos de apagamento de coque à úmido e previsão do lançamento de material particulado no momento do banho de coque.

Os objetivos específicos seriam a busca na revisão bibliográfica, diferentes tipos de variáveis de entrada para alimentar o modelo computacional à base de volumes finitos na aplicação de dispersão na torre de apagamento; estudar os fenômenos de dispersão e carreamento de material particulado no processo de apagamento de coque; comparar os resultados modelados com medições em campo e estimar a redução de emissão de material particulado no processo de apagamento de coque com aplicação de técnicas de controle ambiental, como chicanas e sprays de lavagem.

A modelagem computacional é uma área de ciência multidisciplinar que trata da utilização de modelos matemáticos e técnicas da computação à análise, compreensão e estudo de fenômenos complexos em áreas tão abrangentes como as engenharias, ciências exatas, biológicas, humanas, economia, aeroespacial e ciências ambientais. O Método dos Volumes Finitos (MVF) tem sido largamente utilizado na modelagem nas mais diversas áreas do conhecimento científico, [1] (Neves e Bezerra, 2013). É vasta a literatura que trata deste assunto, porquanto este trabalho não tem a pretensão de reproduzir as deduções do desenvolvimento do MVF precisamente tratado em [2] (Patankar, 1980).

Dentre as ciências que mais possuem potencial para utilização de técnicas de simulação com aplicação de modelos computacionais destaca-se a indústria siderúrgica. Com seus mais diversos processos termofísicos, assim como a engenharia ambiental com aplicação de tecnologias e procedimentos que podem ser efetivamente previstos os resultados ambientais, sejam através de dispersão de efluentes líquidos e/ou gasosos, degradação forçada ou natural, adsorção e absorção de compostos químicos, reações biológicas, oxidação química, incineração e tantas outras técnicas utilizadas em controle ambiental.

Especificamente na indústria siderúrgica modelos computacionais têm sido utilizados com bastante frequência em estudos de dispersões atmosféricas, avaliação de fluxos gasosos e avaliação de lançamento de materiais particulados. Neste contexto, se aplica para todas estas variáveis um modelo matemático que avalie os fenômenos de escoamento dos gases de vapor d'água da torre de apagamento de coque, assim como, o comportamento físico do material particulado desprendido do coque no momento do choque térmico e sólidos suspensos e dissolvidos contidos na própria água de banho. Tal entendimento do comportamento do fluxo gasoso no interior da torre de apagamento fornecerá dados importantes para dimensionamento de dispositivos e/ou anteparos para reter na própria torre o material particulado carregado pela pluma de vapor d'água.

Em termos operacionais, as chicanas são as mais utilizadas para retenção de emissão de particulados em torres de apagamento, tanto de madeira como

metálicas. No processo onde são utilizadas as chicanas, o vagão de coque incandescente é posicionado na torre, e o banho de apagamento de coque é aplicado, através de tubos injetores de água ou bicos que aspergem água como jatos. Após a conclusão do ciclo de apagamento, os sprays de limpeza são acionados para limpeza das chicanas.

A CSN em busca de uma melhor eficiência na retenção dos materiais particulados emitidos no banho do coque, iniciou em 2014 o projeto de instalação de novas chicanas e sprays de lavagem na torre 1 das baterias de coque 1, da bateria 1 da Usina Presidente Vargas (UPV) da CSN. Tal projeto considerou a instalação de chicanas, tipo demister, na elevação de 12 metros, com área de corte transversal (área de painel) de aproximadamente 100 m<sup>2</sup>. Uma segunda camada de chicanas foi considerada, esta camada está localizada a aproximadamente 1,0 m acima da camada inferior, conforme a figura-01.

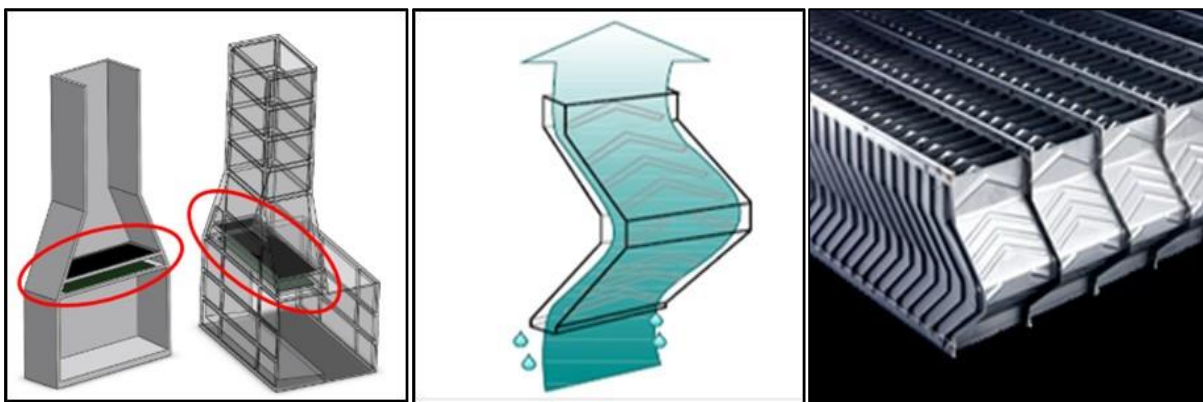


Figura-1: Localização das chicanas e modelo de uma chicana tipo demister.

Um dos principais desafios no dimensionamento e escolha de sistemas para retenção de material particulado em vapores liberados em torres de apagamento de coque é o efeito de retorno do fluxo gasoso na base da torre, o fenômeno ocorre quando os sistemas de retenção de material particulado proporcionam uma perda de carga superior ao empuxo do fluxo gasoso dentro da torre. Neste sentido, mais uma vez, um estudo comportamental dos fluxos gasosos e modelos matemáticos desenvolvidos para prever o comportamento da pluma gasosa dentro do sistema de captação de vapor d'água podem favorecer no dimensionamento adequado de sistemas de captação de material particulado, sobre tudo, com custos menores do que simulações em plantas de escala piloto.

### 1.1 Torres de Apagamento de Coque (Apagamento à úmido)

Em relação aos processos de coqueria, uma das fontes de emissão de materiais particulados, é a torre de apagamento, ou conhecida como torre de extinção, utilizada para canalizar o vapor de água liberado no momento do banho de coque para apagar ou extinguir o material que está em combustão. No momento do apagamento uma elevada massa de vapor de água é lançada pelo topo da torre, estima-se uma quantidade de 0,5 t de vapor d'água por t de coque produzido, esta massa é lançada em grande velocidade, podendo carrear grande quantidade de material particulado do coque ou até mesmo contido na água utilizada no próprio processo de apagamento. Neste contexto, a EPA, Agencia Ambiental Americana, divulgou em 1979 dois amplos trabalhos específicos sobre torres de apagamento, o primeiro denominado Coke Quench Tower Emission Testing Program e o segundo

trabalho denominado Analysis of Coke Oven Quench Tower water and coke samples, onde foi realizado um estudo mais abrangente do processo de apagamento de coque, seus controles e impactos ambientais.

Uma das primeiras conclusões deste trabalho foi sobre a qualidade da água, testes demonstraram que o aumento de lançamento de material particulado estava diretamente relacionado com a qualidade da água de apagamento.

Outros fatores determinantes para emissão de materiais particulados na torre de apagamento são: As condições de processo, como o uso de água limpa no apagamento de coque e não uso de água excedente de outros processos, como licor de limpeza e blow down de outros processos. Além das características que o coque é direcionado para a torre, como o coque verde, quando não há a queima total da matéria volátil do carvão. A grande pluma de vapor que ocorre a partir do contato da água em coque quente faz com que as emissões de extinção de coque a úmido uma das fontes mais visíveis da poluição do ar associados as baterias de fornos de coque. Esta pluma de vapor d'água tende a mascarar as partículas sólidas na pluma, além de dificultar a amostragem na torre de apagamento [3] (MRI for EPA; 1979).

### 1.2 Emissão de material particulado por torres de apagamento de coque.

Os testes realizados pela agência ambiental americana, considerou após campanhas de coletas de amostras para ensaios de material particulado nas emissões de torre de apagamento, onde foi verificado que a qualidade da água interfere diretamente na concentração e tamanho das partículas emitidas pela torre. Apesar de não apresentar correlação da característica do coque verde com a concentração e material particulado na pluma emitida pela torre, observações visuais indicam que há uma relação entre o coque verde e as partículas visíveis acima do carro ou vagão, antes do processo de apagamento, também há uma relação do coque verde e uma nevoa escura na torre de apagamento antes de iniciar o processo do banho do coque.

Resultados dos testes realizados pela EPA são apresentados na tabela 1. Uma média de 0,79 kg/t de carvão, utilizando água limpa e coque não verde, e para água limpa com coque verde a média foi de 0,62 kg/ t de carvão.

Comparando com a utilização de água contaminada para o processo de apagamento o nível de emissão aumentou substancialmente 1,1 kg/t de carvão.

Tabela 1: Resultado de análises de material particulado de torre de apagamento

Resultados	Apagamento com água limpa		Apagamento com água contaminada	
	Não verde (Kg MP/t carvão)	Coque Verde (Kg MP/t carvão)	Não verde (Kg MP/t carvão)	Coque Verde (Kg MP/t carvão)
Média	0,79	0,62	1,10	-
Variação	(0,61 – 0,97)	(0,29 – 0,74)	(1,0 – 1,2)	-

### 1.3 Métodos de Volumes Finitos

Uma definição simplificada para o Métodos de Volumes Finitos é “um método de solução de equações diferenciais parciais na forma de equações algébricas”. Derivado do Método dos Elementos Finitos (MEF), também faz uso de pequenos elementos, os quais menores possíveis, resultam em melhores aproximações dos resultados quando comparados aos valores obtidos por uma solução exata das equações de governo do fenômeno físico investigado.

O procedimento comumente aplicado no método dos volumes finitos pode ser descrito pelas etapas de identificação do domínio ou volumes de controle do



fenômeno investigado, a divisão deste domínio em pequenas partes ou volumes localizando no centro de cada volume a variável calculada, integrar a equação diferencial em cada volume de controle e aplicação do método numérico na solução de problemas. Os modelos matemáticos aplicados com frequência no controle e diagnóstico ambiental são os de dispersão ou de difusão, tanto atmosférica como em meio aquoso.

#### 1.4 Modelo de turbulência k-Epsilon

O modelo matemático para simulação do escoamento consiste em sistemas de equações de continuidade, de Navier-Stokes, de conservação de energia e equações de modelo de turbulência. No modelo de turbulência k- $\epsilon$  (k- epsilon), k representa a energia cinética de turbulência e  $\epsilon$  a dissipação do redemoinho de turbulência (taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam). O modelo k-epsilon enquadra-se na classe dos chamados modelos de duas equações. É também o mais largamente utilizado, pois oferece boa representação de uma ampla gama de fenômenos a baixo custo computacional. No caso do modelo k-epsilon, são duas as variáveis empregadas: a energia cinética turbulenta (k), que representa a variância das autuações na velocidade, e a dissipação da energia cinética turbulenta e  $\epsilon$ , que quantifica a taxa à qual se dá a dissipação das autuações de velocidade. Este modelo faz uso da hipótese da viscosidade turbulenta, que considera que a turbulência pode ser modelada como sendo um aumento na difusividade. Assim, a viscosidade é dividida em duas contribuições, uma laminar e a outra turbulenta.

#### 1.5 Lei de Parede

Os escoamentos turbulentos são afetados pela condição física de não deslizamento sobre paredes, neste sentido, a maioria dos modelos de turbulência são deduzidos para escoamentos afastados das paredes. No entanto, considerações são necessárias afim de tornar estes modelos utilizáveis para escoamentos limitados por paredes.

A lei da parede é utilizada próximo às paredes sólidas. Esta lei é obtida assumindo equilíbrio turbulento nas regiões próximas às superfícies sólidas. Deve ser aplicada na região entre a parede e o primeiro ponto nodal da simulação. Essa lei consiste em prescrever um perfil de velocidade logarítmico na região totalmente turbulenta e um perfil linear na subcamada laminar [4] (SILVA, VIELMO, FRANÇA; 2004).

## 2 METODOLOGIA

O método utilizado neste trabalho foi baseado no histórico de dados de monitoramento da CSN. Uma análise de validação de dados obtidos na etapa de medição das variáveis do processo foi necessária, principalmente dos parâmetros que possuem elevada incerteza de medição, seja por limitação da amostragem ou pelas interferências operacionais proveniente da particularidade do processo estudado.

Sobre o método utilizado neste estudo está fundamentado em análises de dados de monitoramento e informações operacionais. Neste contexto, os passos seguidos por este trabalho se baseia na definição do estudo (problema), coleta de dados, construção e validação do modelo e análises dos resultados.

Para este estudo foram adotados os dados dimensionais da torre de apagamento de coque-1, considerando sua estrutura interna, como implantação de chicanas e tomadas de água para o banho de extinção de coque. Dados de monitoramento da água de apagamento foram usados principalmente na avaliação do input de material

particulado em forma de sólidos suspensos ou totais contidos na água recirculada no sistema de extinção de coque. Importante considerar a granulometria média destes sólidos, com a utilização de técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para identificar o dimensional predominante das partículas sólidas suspensas na água de apagamento.

### 2.1 Variáveis Seleccionadas

Para os dados de sólidos da água de apagamento foram utilizados dados de monitoramento desde 2013, onde uma série de ensaios levantaram uma grande quantidade de informações da água de apagamento.

Como variável de contorno as dimensões da estrutura da torre, como altura, largura, profundidade; além do dimensional das chicanas instaladas e das chicanas recentemente instaladas foram utilizadas para alimentar o modelo computacional. Tais variáveis limitam as coordenadas espaciais do modelo proposto.

A velocidade do fluxo gasoso foi medida em três pontos da torre, esquerda, centro e esquerda; através de ensaio de isocinética, onde uma curva velocidade/tempo avaliou o comportamento do fluxo gasoso em escala temporal do processo de apagamento. O fenômeno de arraste de material particulado está diretamente correlacionado com o empuxo gerado pela alta velocidade no interior da torre, este também associado ao choque térmico da água de apagamento com o coque incandescente. A energia liberada em forma de vapor d'água no momento do apagamento está diretamente relacionada com o método de apagamento.

Este trabalho não considerou fatores ou características do carvão e tão pouco do coque, parâmetros como características físicas do carvão e/ou do processo de coqueificação não foram objeto de modelagem deste modelo matemático.

### 2.2 Modelos Utilizados no Estudo

O conceito chave usado durante toda a formulação de Volumes Finitos é o princípio de conservação de uma determinada quantidade física expressa pelas equações governativas sobre qualquer volume finito, também denominado volume de controle. O domínio é discretizado num conjunto de volumes de controle não sobrepostos, que podem ser irregulares no tamanho e na forma. Os valores de uma variável  $\phi$  são armazenados no centroide dos volumes de controle, ou seja, nos vértices dos triângulos da malha. As equações discretizadas da variável dependente  $\phi$  são obtidas integrando a equação governativa sobre cada um dos volumes de controle no domínio.

As equações que governam o escoamento de fluidos são as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e de energia [6] (VERSTEEG, MALALASEKERA, 1995), escritas no sistema cartesiano de coordenadas, seguintes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \mu_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mu_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \mu_j \mu_i) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right) + S^{\mu_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \mu_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S^T \quad (3)$$

### 2.2.1 Equações de quantidade de movimento

A dedução da equação que define a conservação de quantidade de movimento é deduzida partindo-se de um volume de controle genérico como o da Figura 2:

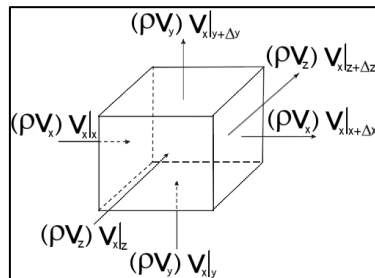


Figura 2: Fluxo de quantidade de movimento através de volume de controle

- Equação da conservação da quantidade de movimento monofásica direção x

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial t} + \left( \frac{\partial(\rho V_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial z} \right) = S^{V_x} \quad (4)$$

- Equação da conservação da quantidade de movimento monofásica, direção y

$$\frac{\partial(\rho V_y)}{\partial t} + \left( \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial z} \right) = S^{V_y} \quad (5)$$

- Equação da conservação da quantidade de movimento monofásica, direção z

$$\frac{\partial(\rho V_z)}{\partial t} + \left( \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z^2)}{\partial z} \right) = S^{V_z} \quad (6)$$

### 2.2.2 Equações de conservação de energia

Aplicando o 1º princípio da termodinâmica, em um volume elementar de fluido, obtém-se a equação de conservação da energia para um sistema de coordenadas cartesianas em três dimensões:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho e u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho e v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho e w)}{\partial z} = \frac{\partial Q}{\partial t} + K \nabla^2 T - p \operatorname{div} \vec{V} + \phi \quad (7)$$

### 2.2.3 Equações de conservação de espécies químicas

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \frac{\partial(U_x C_A)}{\partial x} + \frac{\partial(U_y C_A)}{\partial y} + \frac{\partial(U_z C_A)}{\partial z} = D \left[ \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] \quad (8)$$

Onde x, y e z são as coordenadas cartesianas nos eixos x, y e z [L] respectivamente, U<sub>x</sub> e U<sub>y</sub> são os componentes da velocidade na direção x, y e z [L/t], respectivamente, P é a pressão termodinâmica [M L<sup>-1</sup>t<sup>-1</sup>], C é a concentração da espécie química [M L<sup>-3</sup>], r é a massa específica [M L<sup>-3</sup>], μ é a viscosidade

dinâmica do fluido [M L-1t-1]. D é a difusividade molecular da substância A no fluido [L<sup>2</sup> t-1]. Com dimensões escritas em: massa [M], comprimento [L], tempo [t].

### 2.2.4 Modelos Cinéticos de Evaporação

A evaporação do solvente (geralmente água) e soluto (dissolvido ou partículas em suspensão) é uma questão importante, tanto durante e após a aplicação. Em todas as aplicações de pulverização práticas a pressão de vapor do soluto é muito menor do que a da água, e conseqüentemente a taxa de evaporação do soluto será muito menor do que a da água. Por isso, é razoável supor que a pulverização no ar vai perder o seu teor de água rapidamente.

$$t_{vida} = \frac{D^2}{78 \Delta T} \quad (9)$$

### 2.2.5 Modelos Cinéticos de Arraste

O modelo cinético de arraste utilizado neste trabalho baseia-se no conceito de pelo menos duas fases estarem presentes no mesmo volume de controle no mesmo tempo, e são caracterizados pela fração de volume,  $\alpha_i$ , de cada fase i (gás, sólido). As equações de conservação de massa e momento são resolvidas para cada fase em uma estrutura Euleriana. As equações constitutivas aproximadas são especificadas para o encerramento das equações de conservação.

Para  $\alpha_g$  (Fração de volume do gás) > 0,8 o coeficiente  $\beta$  é baseado na força de arraste do fluido gasoso na partícula, podendo ser expressado como:

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |U_s - U_g|}{d_s} \alpha_g - 2.65 \quad (10)$$

Onde o coeficiente de arraste é dado como:

$$C_D = \frac{24}{Re} [1 + 0.15 Re^{0.687}] \quad (11)$$

Onde o número de Reynolds é dado como:

$$Re = \frac{\rho_g d_s |U_s - U_g|}{\mu_g} \quad (12)$$

### 2.2.6. Modelo de turbulência (k-epsilon)

O modelo de turbulência mais utilizado em dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é o k-epsilon, onde é simulado o fluxo médio para condições de fluxo turbulento. Este modelo considera duas equações que descreve a condição de turbulência por meio de duas equações de transporte. A primeira variável da equação determina a energia da turbulência, determinada como energia cinética turbulenta (k). A segunda variável da equação é responsável pela avaliação da dissipação turbulenta ( $\epsilon$ ), que determina a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta.



Equação para energia cinética turbulenta ( $k$ ):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (13)$$

Equação para dissipação turbulenta ( $\epsilon$ )

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (14)$$

As equações  $k$ - $\epsilon$  também consistem de algumas constantes de ajustes. Os valores das constantes chegaram por várias interações de dados para uma ampla gama de escoamentos turbulentos. Segue as constantes adotadas:

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

### 2.2.7 Leis de parede

Para aplicação de Funções de Parede em relação a temperatura, são adotadas relações empíricas para ligar temperaturas nas vizinhanças de paredes com o fluxo de calor, nesta aplicação é adotada as relações de Kader. Neste trabalho vamos considerar que as paredes da torre de apagamento não possuem interferência pelo fluxo de calor externo, então  $\theta^+ = 0$ .

$$\theta^+ = \text{Pr} y^+ e^{-r} + [2.12 \ln(1 + y^+) + \beta(\text{Pr}_r)] e^{-1/R} = 0 \quad (15)$$

### 2.2.8 Condições de contorno iniciais

As condições de contorno iniciais se estabelecem através do dimensional da torre de pagamento-1 da coqueria da UPV com as medidas definidas na figura 3. Neste trabalho a dinâmica considerada para este processo é de gradiente nulo, definido como entradas de material particulado no volume de controle, os sólidos contidos na água de apagamento e os fragmentos de carvão que desprendem no momento do banho e conseqüentemente extinção das chamas. O fluxo de saída é definido como o material sólido carregado pela água de apagamento, assim como o vapor condensado que retorna para a base da estação, ambos direcionados para a bacia de decantação da torre, e o material particulado carregado pelo fluxo gasoso para o topo da torre no momento do apagamento de coque.

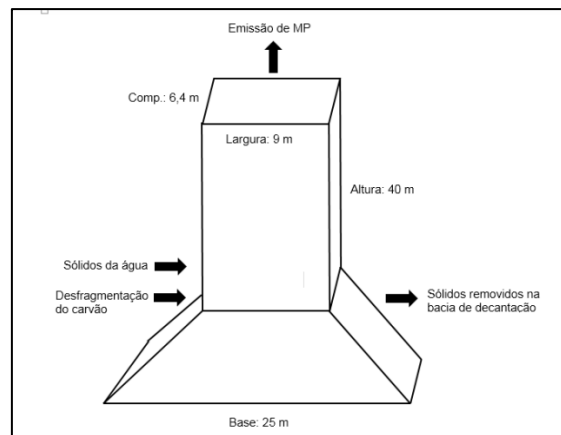


Figura 3: Dimensional e fluxo de entradas e saídas da torre de apagamento

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os recursos necessários para a realização da pesquisa foram disponibilizados pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFF e na Companhia Siderúrgica Nacional:

- FORTRAN
- MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura – Centro de Pesquisa da CSN
- Ensaios de Isocinéticas - CSN
- Ensaios de Sólidos Totais, Dissolvidos e Suspensos - Centro de Pesquisa da CSN
- Programa básico disponibilizado pelo prof. José Adilson

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

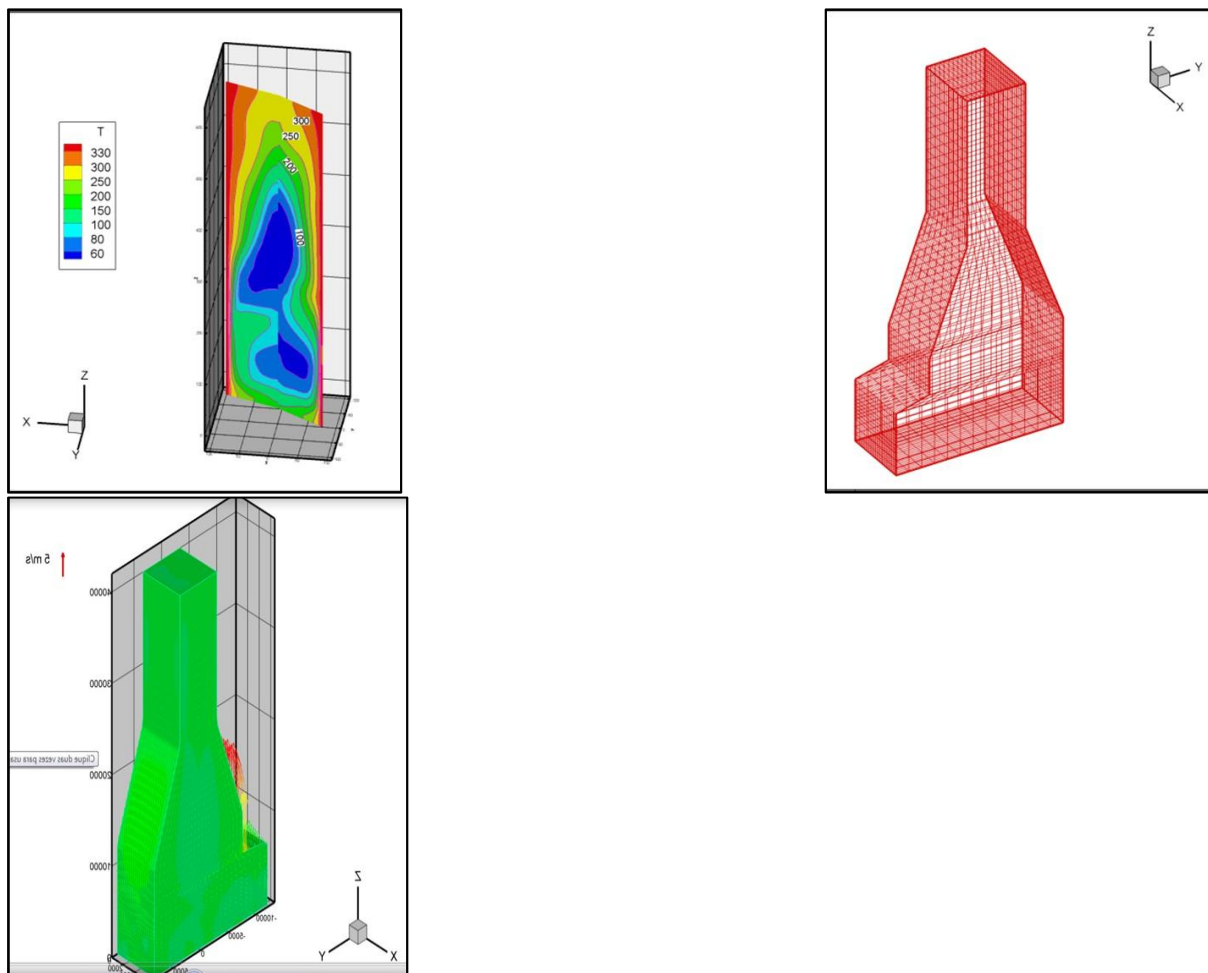
Com o desenvolvimento do modelo matemático de comportamento interno da torre de apagamento de coque e alimentação do modelo com os dados de controle, como monitoramento da água, dos fluxos de água evaporada, do coque e da própria estrutura da torre de apagamento, foi possível modelar os fenômenos de dispersão de vapor e material particulado no interior da torre, possibilitando a previsão de emissão de material particulado no topo da torre, o que é um enorme desafio a medição por métodos convencionais, como os tradicionais ensaios de isocinéticas. Esta dificuldade de medição ocorre pela grande turbulência na dispersão dos vapores e pelo curto espaço de tempo no momento de apagamento de coque. A tabela 2 apresenta alguns dados de entrada utilizado no modelo desenvolvido.

Tabela 2. Tabela com dados para alimentar modelo matemático

	Características	Unidade	Torre de Apagamento sem Chicanas	Torre de Apagamento após Chicanas
Estrutura da torre de apagamento de Coque (dimensões)	Largura interna da Base da Torre de apagamento	m	24	24
	Comprimento interno da Base da Torre de apagamento	m	6,4	6,4
	Altura da Base da Torre de apagamento	m	12	12
	Inclinação do estreitamento da Torre de apagamento	°	45	45
	Largura da Torre de apagamento	m	9	9
	Comprimento da Torre de apagamento	m	6,4	6,4
	Altura total da Torre de apagamento	m	40	40
	Abertura de entrada do vagão de coque (altura)	m	8,51	8,51
	Abertura de entrada do vagão de coque (largura)	m	6,6	6,6
	Abertura de entrada de ar na frente da torre	m	8,51	8,51
	Abertura de entrada de ar no fundo da torre	m	6,6	6,6
Abertura de entrada de ar na lateral da torre (superior)	m	3	3	

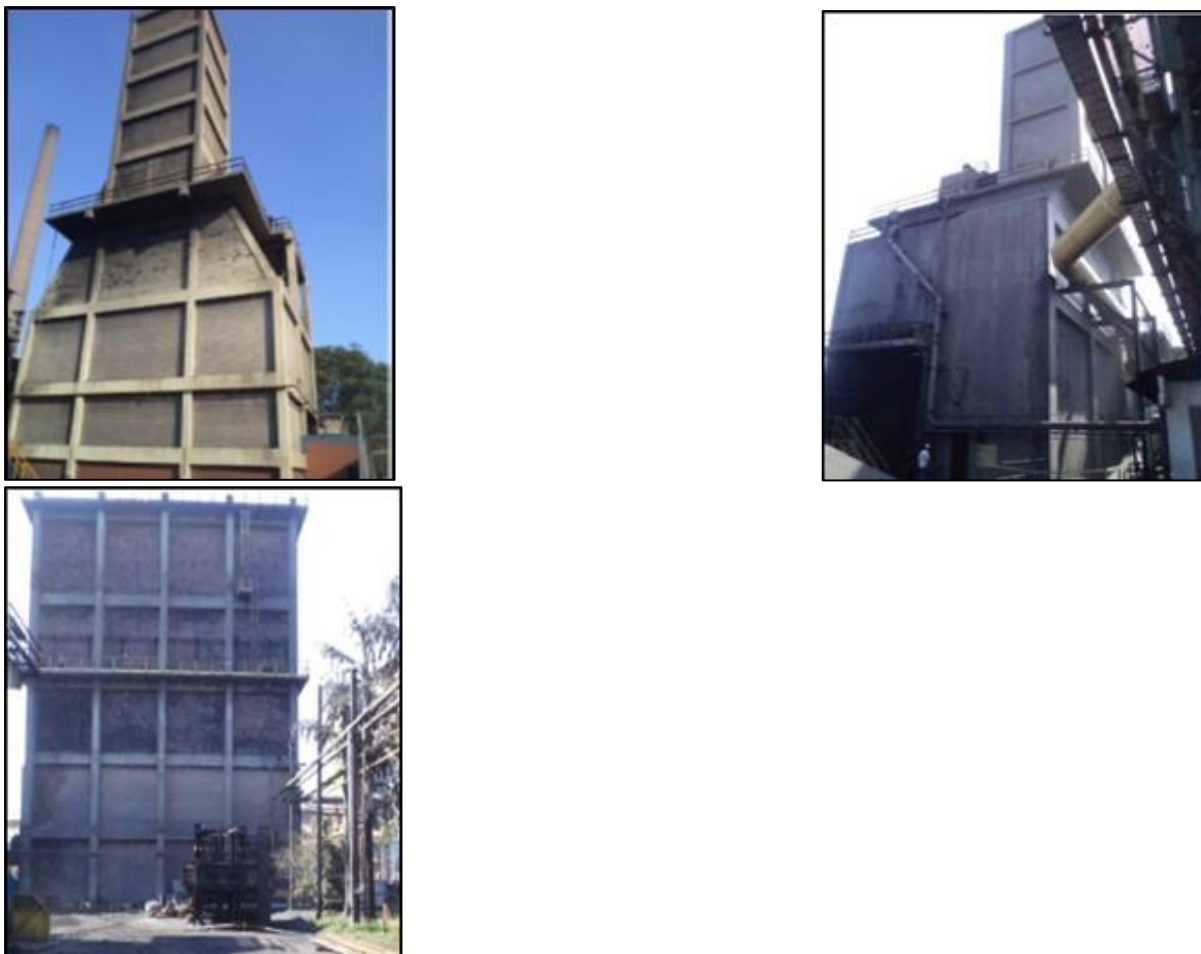
no de Água utilizada apagamento coque	Abertura de entrada de ar no lateral da torre (inferior)	m	0,8	0,8
	Volume de Água utilizada por apagamento	m <sup>3</sup>	30	30
	Temperatura da Água utilizada no apagamento	°C	70	70
	Volume de Água evaporada por apagamento	m <sup>3</sup>	6	6
	Concentração de Sólidos Totais na Água	mg/l	300	300
	Concentração de Sólidos Suspensos na Água	mg/l	200	200
	Concentração de Sólidos Dissolvidos na Água	mg/l	100	100
Dados do Coque	Dimensão do Material Particulado da água de apagamento	µm	20 a 85	20 a 85
	Massa de coque por apagamento	kg	12.000	12.000
	Temperatura do coque incandescente	°C	1.260	1.260
	Temperatura do coque apagado	°C	150	150
	Altura do leito de coque	m	1,5	1,5
	Temperatura do vapor na torre	°C	55	61
	Umidade da pluma de amostragem	%	30,97	26,9
	Velocidade da Pluma dentro da torre	m/s	7,36	8,27
Vazão		m <sup>3</sup> /s	289,3	325,4

A figura 4 demonstra em ordem a imagem da dispersão térmica, o estabelecimento do volume de controle e início do modelo de dispersão de material particulado.



**Figura 4:** Imagens da modelagem da torre de apagamento de coque

A figura 5 demonstra vistas da torre de apagamento da torre de apagamento em estudo e outras duas torres que podem ser aplicadas o modelo adotado.



**Figura 5:** Imagens de torres de apagamento de coque

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento termofísico dos vapores de água liberados em torre de apagamento de coque e simular as emissões atmosféricas em relação ao material particulado liberado neste processo.

Tal simulação é de ampla importância para a indústria siderúrgica, sobretudo para o processo de coqueificação, considerando a dificuldade e limitação de se realizar o monitoramento de material particulado em torres de apagamento por métodos convencionais. O método tradicional de monitoramento quando possível de realizado é bastante questionável, seja pela falta de acesso para ensaios de isocinética, seja pelo alto grau de incerteza do método de análise em um ambiente com forte variação de vazão, velocidade e grande turbulência.

O sistema de modelagem que avalia o comportamento interno do fluxo de vapor d'água dentro da torre, ainda pode ser útil para determinação de melhor eficiência tecnológica para evitar o arraste de material particulado pelo processo de apagamento, como o dimensionamento de chicanas ou defletores e lajes de impacto.

Os dados passíveis de medição, como temperatura e vazão, podem servir de base para uma calibração do modelo desenvolvido, o que garante um grau de precisão mais apurado após ajustes necessários na modelagem desenvolvida.

Com isso é possível mensurar os ganhos com o desenvolvimento e aplicação do modelo apresentado, como a previsão de lançamento de material particulado pela torre de apagamento, dando suporte as diversas áreas da engenharia em novos projetos de redução de emissão de material particulado em torres de apagamento, além da inovação com a criação do primeiro modelo matemático para previsão de emissões de material particulado em torres de apagamento.

## 6 REFERÊNCIAS

- 1 Neves E. E., Bezerra Y. S. F., Método dos Volumes Finitos: Uma Abordagem Prática e Aplicação Em Problemas de Difusão Térmica Com Matlab® Revista Cultura e Científica do UNIFACEX. v. 11, n. 11, 2013.
- 2 Patankar, S. V.; Spalding, D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 15, n. 10, p. 1787–1806, 1972.
- 3 Report, Engineering Analysis of Emission Controls for Wet Quench Towers, Prepared by MRI for EPA, Contract No. 68-02-2609, January 1979.
- 4 Silva, C. V.; Vielmo, H. A.; França, F. H. R. Simulação Numérica de Processos de Combustão de Gás Natural em Câmaras Cilíndricas Usando O Modelo SCRS; Tese de doutorado, 2005.
- 5 Henk Kaarle Versteeg, Weeratunge Malalasekera (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education Limited. ISBN 9780131274983.