Simulação Numérica como Ferramenta de Manutenção Preditiva de uma UTE

Ferreira, V. C. S., Cordeiro, S. C. e Kaehler, J. W.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida para prever o desgaste prematuro de peças e partes de uma Usina Termelétrica UTE empregando um pacote de simulação numérica. A simulação visa identificar regiões do escoamento onde há grande concentração de cinzas altamente abrasivas (alto teor de sílica), sua energia cinética e a potencialidade de erosão. Conhecida a resistência à erosão do material estrutural ou dos materiais que compõem os permutadores de calor (super-aquecedores, pré-aquecedores e economizadores), poder-se-á prever o tempo de vida útil das partes sujeitas ao desgaste.

PALAVRAS - CHAVE

Simulação Numérica, Escoamento Multifásico, Gases de Combustão, Erosão, Impingimento.

I. INTRODUÇÃO

Nas indústrias químicas e petroquímicas, nas de siderurgia e fundição, ou em plantas termo geradoras de eletricidade, sejam convencionais ou termonucleares, escoamentos complexos têm provocado desgaste prematuro de partes da instalação devido as elevadas temperaturas e tensões a que freqüentemente estão submetidas. A erosão e corrosão acentuadas devido a ação abrasiva em altas temperaturas de particulados coexistindo no meio fluido têm provocado acidentes promovendo, no mínimo, a interrupção da operação de uma planta. O conhecimento mais exato do comportamento do fluido multifásico num escoamento complexo, através de metodologias convenientemente validadas, pode identificar os pontos críticos de uma instalação e auxiliar nas tomadas de decisão de manutenção preditiva e preventiva, evitando paradas não programadas ou mesmo, sinistros.

O escoamento interno, multifásico de um fluido sujeito a altas trocas de calor (em combustão, por exemplo) tem sido um grande desafio nas diferentes áreas da engenharia. As condições internas da fornalha de um gerador de vapor usado numa Central Termelétrica, apresenta um escoamento extremamente complexo e de singular importância. Definidas quantidades de diferentes fluidos (ar + combustível líquido), eventualmente adicionado com partículas sólidas (carvão pulverizado), são injetadas por bocais misturadores (queimadores) num amplo ambiente (fornalha) a fim de produzir a queima do combustível. Para que a queima seja completa e mais eficientemente controlada, os modernos queimadores (tipo vórtice) apresentam características que favorecem à mistura uma homogeneização no escoamento multifásico. A figura 1 esquematiza uma queima de combustível em vórtice no interior de uma fornalha de um gerador de vapor.

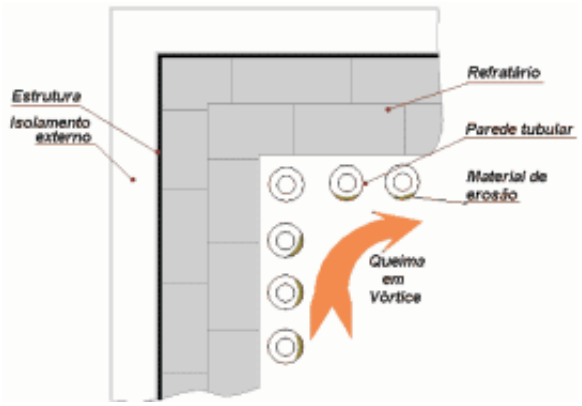

FIGURA 1 - Queima de combustível em vórtice

O posicionamento dos diversos bocais queimadores numa fornalha é, também, estrategicamente estudado para que o escoamento ascendente e incandescente da mistura de fluidos, apresente um melhor contato possível com as superfícies de troca térmica dos intercambiadores (paredes tubulares, super-aquecedores, reaquecedores, economizadores, etc.). Desta forma, os gases de tiragem no final da combustão têm um comportamento extremamente complexo. Os condutos de exaustão, principalmente aqueles com mudança de direção, sofrem desgaste excessivo devido ao impacto do particulado incandescente ou, eventualmente, ainda não queimado, junto com as cinzas quentes e altamente abrasivas. Neste processo, pontos quentes nas superfícies dos trocadores de calor são gerados concorrendo ainda mais para a erosão e corrosão.

Os intercambiadores de calor (economizadores) que,

- Agradecimentos a apoio financeiro. Este trabalho foi apoiado pela Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica - CGTEE.
- Ferreira, V.C.S., Cordeiro, C. e Kaelher, J.W. trabalham no Instituto Pesquisas Científicas e Tecnológicas da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – IPCT – PUCRS (e-mail: vilsonferreira@pucrs.br; cristian@ee.pucrs.br; kaehlerj@pucrs.br).

eventualmente são colocados nos condutos de exaustão com a finalidade de aproveitar parte da energia térmica dos gases da combustão, têm seu desempenho térmico afetado pelas condições deste complexo escoamento. A distribuição não uniforme do fluxo de gases da combustão pode causar excessiva velocidade e temperatura numa região do banco de tubos enquanto que em outras haverá deficiência na circulação do fluido primário.

Este é o caso da fornalha do gerador de vapor da Usina Térmica de Candiota fase B. Relatórios internos comentam paradas não programadas para a recuperação das espessuras dos tubos dos economizadores com dimensões abaixo do limite recomendado [7] ocasionadas por problemas de erosão. As figuras a seguir mostram o desgaste do tubo de um permutador de calor e seu conseqüente colapso provocado pela ação da erosão das cinzas em alta temperatura e velocidade.

FIGURA 2 - Erosão provocada pelas cinzas com alto teor de sílica;

Colapso do tubo de vapor em alta pressão.

O presente trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida para prever o desgaste prematuro de peças e partes de uma UTE empregando um pacote de simulação numérica. A simulação numérica identifica as regiões do escoamento onde há grande concentração de cinzas com alto teor de sílica, sua energia cinética e a capacidade de erosão. Com a resistência à erosão dos materiais que compõem os trocadores de calor (super-aquecedores, pre-aquecedores e economizadores) ou do material estrutural, pode-se prever o tempo de vida útil destas partes.

II. METODOLOGIA

O método empregado para a solução do escoamento multifásico está baseado na solução segregada de algoritmos, onde as equações do movimento (tridimensional) são resolvidas uma a uma e a pressão é incrementada na equação da conservação da massa (continuidade). Para um escoamento unifásico e sem a atuação das forças de flutuação, a única realimentação do processo entre as equações da química e do escoamento acontece através da variação da massa específica causada pelas reações endotérmicas ou exotérmcias. Por exemplo, na combustão, o calor de reação aumenta a temperatura e reduz as massas específicas dos componentes. As equações para as frações de massa são divididas em duas partes: parte de transporte, formada pelos termos de advecção e difusão, e parte de reação.

A. Equações governantes

As equações diferenciais parciais, não lineares, transientes (da conservação da massa, do movimento e da energia) para cada fração de massa do escoamento multifásico, podem ser escritas genericamente como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + F(\phi) - C(\phi) = 0 \qquad (1)$$

onde é a quantidade conservada. Na equação genérica o operador F representa parte da equação do escoamento (os termos de advecção e difusão dos componentes) e C representa as reações químicas entre eles.

Note que o operador C é local e somente contém valores no centro de cada volume de controle enquanto que o operador F é global e envolve o transporte de componentes entre os pontos vizinhos.

Estas equações são discretizadas de forma usual através do método dos volumes finitos. O operador F pode ser posteriormente dividido num componente central ao volume de controle F_D e num outro devido a contribuição do seu contorno, através dos termos de advecção e difusão, F_N:

$$F = F_D + F_N \qquad (2)$$

B. Solução das equações

Para a progressão da solução numérica é adotado o método de avanço, onde a solução no nível de tempo ***n+1*** é obtida a partir do nível ***n***:

Passo 1 – Solução implícita das equações químicas:

$$\frac{\partial \phi*}{\partial t} - C(\phi*) + F_D(\phi*) = -F_N(\phi^n) \qquad (3)$$

Passo 2 – Solução implícita das equações do movimento:

$$\frac{\partial \phi^{n+1}}{\partial t} + F_N(\phi^{n+1}) + F_D(\phi^{n+1}) = C(\phi*) \qquad (4)$$

Os valores da variável ϕ^* devem ser considerados como valores intermediários entre o passo atual e o anterior (passo $n+1/2$ ou seja $\phi^{n+1/2}$).

O lado esquerdo da Eq. 3 contém apenas termos de natureza química e termodinâmica adicionados à contribuição diagonal do termo de escoamento (equações do movimento). Estes termos são todos termos locais e calculados em cada elemento computacional.

Os termos transientes destas equações são discretizados de forma normal como nos métodos tradicionais de diferenças finitas:

$$\left.\frac{\partial \phi}{\partial t}\right|_{n+1} = \left(\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{t^{n+1} - t^n}\right) \qquad (5)$$

Para problemas em regime permanente, a Eq. 5 não tem sentido e o passo de tempo é escolhido apenas para acelerar a convergência, com diferentes valores adotados para cada uma das equações (do movimento e das reações químicas).

As equações são resolvidas segundo a seguinte orientação num passo de tempo:

1. Solução das equações da conservação do movimento e da conservação da massa global.
2. Solução das equações dos componentes químicos, da entalpia e da temperatura;

3. Solução da equação convecção – difusão para os escalares dos componentes químicos e da equação da entalpia.

Um método convencional de solução segregada é usado para resolver as equações do movimento da conservação da massa no passo de tempo correspondente a solução do movimento. O método SIMPLEC é um dos usados para o acoplamento pressão/velocidade.

C. Linearização

As equações dos componentes químicos são acopladas e com alto grau de não linearidade. O efeito da temperatura é também altamente não linear através da equação de estado e das taxas de reação. A solução numérica exige uma linearização destas equações. O conjunto de equações químicas é estendido para incluir a equação de transporte para a entalpia e as relações termodinâmicas entre entalpia-temperatura (relações algébricas). São as variáveis escolhidas para a linearização: as frações de massa dos componentes químicos, a entalpia, e a temperatura. Os escalares em cada volume de controle podem ser escritos na forma vetorial, como:

$$\phi = \begin{vmatrix} Y_i \\ H \\ T \end{vmatrix} \qquad (6)$$

onde Y_i são as frações de massa, H a entalpia e T a temperatura em cada volume de controle. Com a estrutura das equações conhecida, a linearização de Newton é obtida para as interações das reações químicas usando diferenciação analítica e a regra da cadeia. As equações químicas que formam um conjunto não linear, acopladas para o vetor ϕ^* podem ser representadas em cada volume de controle, como:

$$\frac{(\phi^* - \phi^n)}{(t^* - t^n)} - C(\phi^*) = -F(\phi) \qquad (7)$$

Adotando-se a linearização de Newton, teremos:

$$(I - HJ)\phi^* = -hF(\phi^n) + \phi^n \qquad (8)$$

onde I é a matriz unitária e J a matriz jacobiana.

D. A Região Problema

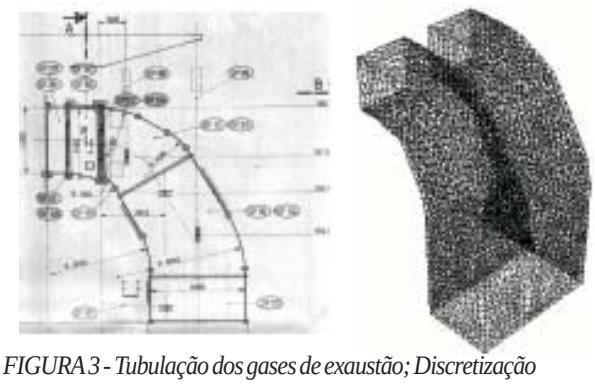

FIGURA 3 - Tubulação dos gases de exaustão; Discretização tridimensional

A figura 3 mostra o desenho de projeto do conduto de descarga (curva difusora) para os gases de exaustão do gerador de vapor da UTE de Candiota, fase B, e a respectiva discretização para a simulação numérica. A discretização mostrada na figura 3 é apenas esquemática. A real discretização é mais densa, contém 400 mil elementos (volumes finitos).

A parte superior do conduto se acopla ao gerador de vapor e a face inferior, que contém o economizador 1, se conecta a canalizações intermediárias que conduzem os gases de combustão até o precipitador eletrostático. Internamente ao conduto curvo um conjunto estrutural formado por contra-ventamentos e homogenizadores de fluxo tornam o escoamento ainda mais complexo.

E. Parâmetros de simulação

As principais premissas, condições de contorno e parâmetros empregados nas simulações numéricas realizadas até o presente momento, são constantes das Tabelas seguintes. Dados de campo mais realistas serão implementados num futuro próximo. O escoamento foi considerado multifásico formado por um meio contínuo (gases de combustão) e por um meio disperso composto por dois particulados, Cinza 1 e Cinza 2.

TABELA 1
Características dos fluidos

Fluido	Descrição	Condição Básicas	Equações Governantes
Meio Contínuo	TipoFração VolumétricaModelo Turbulência	Ar CNTP9,8 x 10^{-1}T. Reynolds	Continuidade Movimento Energia
Meio Disperso	Cinza 1Fração volumétricaModelo Turbulência	-1,0 x 10^{-2}Zero Equation	Continuidade Movimento Energia
Meio Disperso	Cinza 2Fração volumétricaModelo Turbulência	-1,0 x 10^{-2}Zero Equation	Continuidade Movimento Energia

TABELA 2
Condições de Contorno

Condições Contorno	Meio Contínuo	Cinza 1	Cinza 2
Velocidade Entrada	8,22 m/s	8,22 m/s	8,22 m/s
Temperatura Entrada	465 ^{0}C	465 ^{0}C	465 ^{0}C

TABELA 3
Principais Propriedades Físicas

Meio	Contínuo (ar)	Cinza 1	Cinza 2
Densidade - kg/m^3	1,284	2,5 x 10^3	2,5 x 10^3
Viscosidade - kg/m s	1,72 x 10^{-5}	-	-
Cal. Específico Ws/kg^{0}C	1,00 x 10^{-3}	2,5 x 10^{-1}	2,5 x 10^{-1}
Cond. Térmica – W/m^{0}C	2,42 x 10^{-2}	9,0 x 10^{-2}	4,0 x 10^{-2}
Exp. Térmica – 1/^{0}C	3,67 x 10^{-3}	-	-
Diâmetro Médio - µm	-	20	70

F. Resultados

De posse das premissas e condições de contorno adotadas, a simulação foi realizada usando o pacote CFX, versão 5.6. Os resultados destas simulações podem ser apresentados na forma de tabelas ou diagramas de distribuição de propriedades. No presente trabalho preferiu-se apresentar a energia cinética específica da fase dispersa já que é uma propriedade fundamental para atingir os objetivos. Diversos diagramas de distribuição de energia podem ser obtidos ao longo da região em estudo. As figuras 4 e 5 mostram dois planos transversais ao escoamento com a distribuição de energia cinética específica dos dois particulados Cinza 1 e Cinza 2 próximo a entrada do economizador 1 da UTE de Candiota B. A intensidade de energia cinética é mostrada numa escala colorimétrica. Pode-se perceber as regiões de maior intensidade de energia e, consequentemente, as de maior efeito de erosão. Estas regiões se situam próximo à parte côncava, no final da curva.

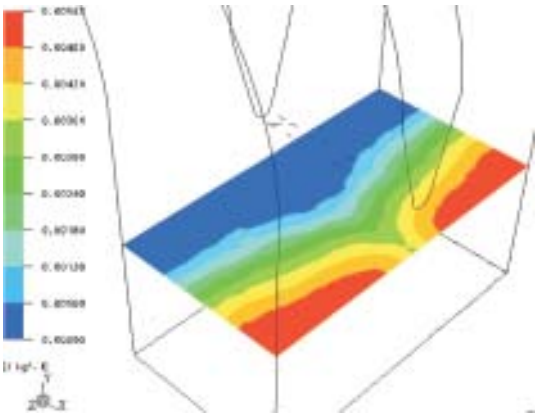

FIGURA 4 - Distribuição de Energia Cinética Específica da Cinza 1

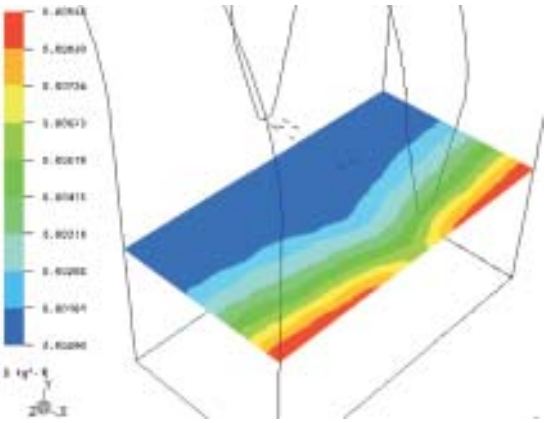

FIGURA 5 - Distribuição de Energia Cinética Específica da Cinza 2

G. Desgaste por Erosão

Define-se *EROSÃO* como perda progressiva de material de uma amostra devido a interação entre um jato de fluido unifásico, multifásico ou de partículas sólidas sobre superfície da amostra. O processo resultante desta interação continuada (sucessivos impactos de partículas ou fluido sobre uma superfície sólida) é denominado de *IMPINGIMENTO*. A norma da ASTM que regulamenta o ensaio de erosão por impingimento é denominada por G 76-95 [7]. O ensaio através desta norma consiste, na verdade, numa comparação entre o efeito de erosão de um material desconhecido com a erosão de um material tomado como referência, o aço carbono ASTM 1020.

A norma ASTM G 76-95 estipula além do material de referência: o particulado abrasivo, o óxido de alumínio (Al_2O_3) com dimensões médias de 50 mm; o fluxo de material abrasivo, 2,0 g/min ($\pm$0,5 g/min; a velocidade de impingimento, 30 m/s ($\pm$2 m/s); a vazão de ar comprimido, seco com ponto de orvalho –50^{0}C, em torno de 8 *l*/min; o ângulo entre o bocal de impingimento e o material a ser ensaiado, 90^0 ($\pm$2^0); a temperatura do ensaio, entre 18^{0}C e 20^{0}C; o tempo mínimo de ensaio, 10 minutos. Muitas outras características e propriedades físicas do ensaio bem com do dispositivo que promove o impingimento, são também definidas. Estas características são importantes de serem normalizadas para permitir um programa de comparação interlaboratorial.

Cada ensaio deve ser formado por, pelo menos, 4 medidas da taxa de erosão. A *Taxa média de erosão* ($\overline{T}_e$ - mg/min) é definida como a relação entre a massa de material retirado por impingimento e o tempo de realização do ensaio. A figura a seguir representa um ensaio de erosão por impingimento. A taxa média de erosão é determinada pelo coeficiente angular da reta de ajuste de curva linear obtido sobre os pontos experimentais do ensaio (Figura 6).

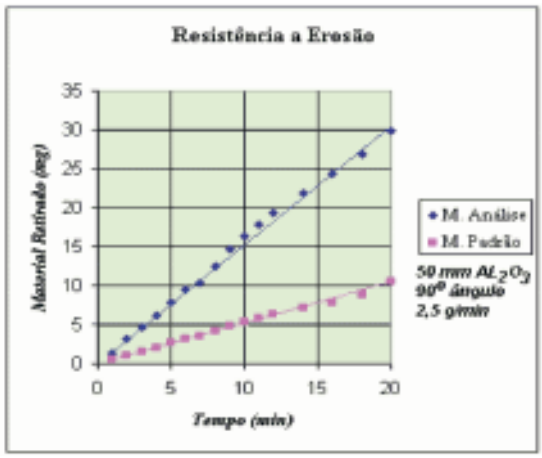

FIGURA 6 - Taxa de erosão

No diagrama da figura 6, a resistência à erosão é apresentada para dois materiais distintos (material de análise e material de referência (ASTM 1020). Percebe-se que o material em análise sofre mais a erosão do que o de referência. O material de análise apresenta T_e = 1,53 mg/min enquanto que o material padrão T_e = 0,52 mg/min.

Outras grandezas são determinadas através do mesmo ensaio e são definidas como:

Valor médio de erosão ($\overline{V}_e$) é volume de material perdido pelo processo de impingimento dividido pela massa total das partículas abrasivas que o proporcionaram (mm^3/g).

Fluxo de material abrasivo ($\dot{m}_a$) dado em g/min.

O valor médio de erosão pode ser calculado em cada ensaio, como:

$$\bar{V}_e = \frac{\bar{T}_e}{\rho_m \dot{m}_a} \qquad (9)$$

onde ρ_m (g/cm^3) é a massa específica do material em análise.

H. Correlação entre Simulação e Ensaio de Erosão

O ensaio de erosão fornece o parâmetro físico de interrelação entre o material abrasivo e um material em análise, enquanto que a simulação numérica apresenta a característica potencial de erosão de um determinado meio multifásico. O primeiro fornece, indiretamente, a *Energia Efetiva de Erosão* enquanto o segundo a *Energia Disponível de Erosão*.

O uso da energia ao longo do processo de impingimento numa bancada de teste de erosão é esquematizado na Figura 7. A bancada demanda uma energia de entrada (E_1) para realizar o serviço final de aceleração do material abrasivo nas condições de ensaio até promover a erosão (E_4). Assim a taxa de erosão ($\bar{T}_e$) revela, em última análise, qual foi a energia efetivamente usada na erosão dado que se dispunha de uma energia disponível (energia cinética das partículas abrasivas).

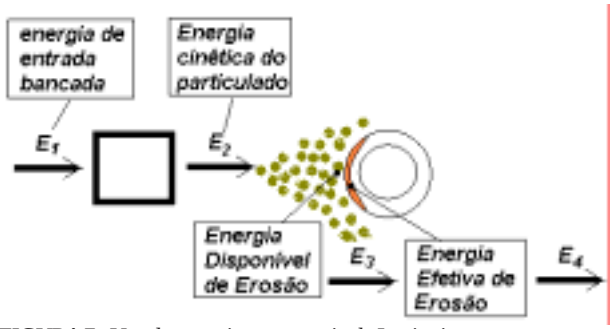

FIGURA 7 - Uso da energia num ensaio de Impingimento

A energia cinética disponível de um ensaio de erosão pode ser obtida já que se monitora as condições do ensaio: velocidade do escoamento bifásico (30m/s) e fluxo de massa das partículas abrasiva (2g/min). Como se conhece as características das partículas abrasivas (massa específica ρ_a, composição química e geometria) a Energia Cinética devido ao ensaio de erosão (E_{CE}), por unidade de área de impacto (1 mm^2) é dada por:

$$E_{CE} = \frac{1}{2}\left(\frac{\dot{m}}{\bar{\rho}_a A}\right)^2 = \frac{5{,}56}{\bar{\rho}_a^2} \qquad \text{Joule/kg} \qquad (10)$$

considerando um fluxo médio de 2g/min de partículas abrasivas.

A mesma energia cinética pode ser também calculada pela expressão envolvendo a concentração volumétrica do particulado abrasivo x_a.:

$$E_{CE} = 450(x_a)^2 \qquad \text{Joule/kg} \qquad (11)$$

considerando uma velocidade do escoamento multifásico de 30 m/s.

Se a simulação apresentasse a mesma situação física do ensaio de erosão, as energias cinéticas específicas seriam similares. Seria possível, neste caso, determinar o tempo limite (t_L) em que a quantidade máxima de material poderia ser removida por erosão (M_{cr}) antes de provocar o colapso da estrutura:

$$t_L = \frac{M_{cr}}{\bar{T}_e} \qquad (12)$$

A massa crítica M_{cr} deve ser calculada através de relações de resistência dos materiais e da geometria da estrutura.

A situação simulada, difere da situação do ensaio de erosão. A equivalência no entanto poderá ser ainda alcançada se forem incluídos os seguintes coeficientes de correção:

- Fator de forma, f_F – devido ao diferente posicionamento do fluxo de partículas abrasiva com relação a superfície de erosão (ângulo de erosão) e da área de impacto não ser plana (curvatura do tubo);
- Fator de temperatura, f_T – devido a diferença de temperatura entre a condição de ensaio e a situação simulada (o material em análise terá sua resistência a erosão diferente da condição estabelecida pela norma);
- Fator f_P - devido o material das partículas abrasivas ser diferente do utilizado no ensaio. Partículas abrasivas diferentes tem diferentes propriedades abrasivas.. (No caso a cinza com alto teor de sílica);
- Fator de velocidade, f_V – devido a velocidade do fluxo ser diferente da velocidade normalizada.

Sendo considerados estes efeitos, a equivalência entre a energia cinética simulada (E_{CS}) e a energia cinética do ensaio de erosão correspondente a situação real (E_{CR}) pode ser equacionada da seguinte forma:

$$E_{CR} = f_F f_T f_P f_V E_{CS} \qquad (13)$$

A taxa de erosão para a situação simulada será, então:

$$\bar{T}_R = \frac{E_{CR}}{E_{CE}} \bar{T}_e \qquad (14)$$

Finalmente, o tempo necessário para uma erosão até a situação crítica será dado por:

$$t_L = \frac{M_{cr}}{\bar{T}_R} \qquad (15)$$

I. CONCLUSÃO

Foi apresentada uma metodologia capaz de prever o tempo de desgaste de peças e partes de uma estrutura sujeita a forte erosão devido ao escoamento multifásico com particulado abrasivo. A confiabilidade desta metodologia e dos resultados está fortemente vinculada a

exatidão com que os quatro coeficientes, f_F, f_T, f_P e f_V forem determinados.

A determinação destes coeficientes é uma tarefa teórico- experimental em desenvolvimento, a ser apresentada num futuro próximo.

III. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições e colaborações dos alunos de graduação bolsistas Marcos Muller e Francesco Schissi.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Periódicos:

[1] Boothroyd, R.G.,- "Pressure Drop in Duct of Gaseous Suspensions of fine Particles" Trans.I.Chem. Eng., vol 44, 1996.

[2] Choi, Y.D. and Chung, M.K. , " Analysis of Turbulent Gas-solid Suspension Flow in a Pipe". J. Fluid Eng., ASME, vol 105. 1983

[3] Chow, J.C.F., 1970, " On a Macroscopic Theory of a Two-phase Fluid Flow and its Effetive Viscosity", 1st International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, USA

Livros:

[4] Badcok & Wilcox, Steam, its Generation and Use", USA, 1972.

[5] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. – An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, Longman, 1995.

Relatórios Técnicos:

[6] Ferreira, V.C.S. e Cordeiro, S.C. – Relatórios Técnicos do Projeto "Simulação Numérica Do Escoamento Dos Gases No Gerador De Vapor E Auxiliares"- CGTEE e IPCT-PUCRS, REL 01-06, POA, 2003.

Dissertações e Teses:

[7] Indruslak, M. L. S. - " Escoamento Turbulento na Saída de um Duto Curvo de Seção Retangular", Dissertação de mestrado do PROMEC. Porto Alegre, RS, Dez/97.

[8] Andrade, A., - "A Caracterização das Cinzas Volantes do Carvão de Candiota"- Dissertação de Mestrado do PPGEMM, UFRGS, 1985.

Normas:

[9] ASTM - *Standard test Method for Conducting Erosion Tests by solid Particle Impingement using Gas Jets* – vol. 03.02, wear and erosion; metal Corrosion, ASTM - 100, Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, 1996.