

UNIPAC UNIVERSIDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS FACULDADE REGIONAL DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS DE BARBACENA

## CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Tiago André Carbonaro de Oliveira

**CFD na indústria cimenteira:** *estudo do escoamento de ar primário até o queimador em fornos de clinquer* 

BARBACENA 2006

### TIAGO ANDRÉ CARBONARO DE OLIVEIRA

**CFD na indústria cimenteira:** *estudo do escoamento de ar primário até o queimador em fornos de clinquer* 

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Presidente Antônio Carlos, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Ciência da Computação.

ORIENTADOR: Prof. Leandro Alves Resende

BARBACENA 2006 Tiago André Carbonaro de Oliveira

# **CFD na indústria cimenteira:** *estudo do escoamento de ar primário até o queimador em fornos de clinquer*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Presidente Antônio Carlos, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Ciência da Computação.

Aprovado em \_\_\_\_/ \_\_\_/

#### BANCA EXAMINADORA

Prof. Leandro Alves Rezende (Orientador) Universidade Presidente Antônio Carlos

Prof. Ms. Frederico de Miranda Coelho Universidade Presidente Antônio Carlos

Prof. Ms. Wender Magno Cota Universidade Presidente Antônio Carlos

Dedico este trabalho a meus pais Cida e Lázaro, aos meus irmãos Henrique, Daniel e Mariana, a minha querida Roberta, a meus avós, a minha tia avó e a toda minha família. Sem esquecer dos companheiros de trabalho da Holcim, que foram de grande valia para o desenvolvimento deste estudo.

Agradeço a Deus por tudo, ao meu orientador Leandro pela seriedade, dedicação e apoio, ao Professor Luis Augusto e ao Coordenador Emerson por estarem sempre prontos a ajudar, aos Professores Frederico e Wender, e a todos da grande equipe UNIPAC.

#### **RESUMO**

O uso de modelagem matemática no desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias é atualmente prática constante na engenharia, principalmente com o advento de computadores velozes a preços acessíveis. A modelagem por Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) permite, por exemplo, determinar as características de um escoamento (pressões, velocidades, temperaturas, concentrações de espécies químicas, etc.), por meio da resolução numérica de equações diferenciais a derivadas parciais. A utilização do CFD aporta uma série de benefícios, entre eles a eliminação de etapas intermediárias no desenvolvimento de equipamentos, minimiza o processo de "tentativa e erro", reduz custos e riscos de "*scale-up*". Com base na CFD, será simulado – através do *Ansys* CFX 10.0 – o escoamento de ar primário até o queimador em um forno de clinquer (Fábrica de cimento).

Palavras chave: CFD, Ansys CFX 10.0, Ar Primário, Queimador, Forno de Clinquer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1.	Processo de Fabricação de Cimento	. 18
2.	Indicação esquemática	. 21
3.	Vetores de velocidade na região próxima ao queimador	. 22
4.	Distribuição axial dos fluxos de calor radiativo	. 23
5.	Comparação das predições	23
6.	Variação da composição do clinquer	. 24
7.	Variação da temperatura com o comprimento do forno - Figuras 07 e 08	. 25
8.	Variação da temperatura interna dos gases do forno	. 26
9.	Fração mássica de gás natural e campo de velocidade axial	. 27
10.	Efeito do ângulo do queimador	. 28
11.	Mains Steps in CFX Analysis	. 29
12.	ToolBar in CFX Analysis	. 30
13.	Geometria no DesignModeler	. 31
14.	Guia Sketching	. 31
15.	Exemplo de malha refinada	. 32
16.	Ansys CFX 10.0 - Figuras de 17 a 20	. 33
17.	Geometria da Tubulação de Ar Primário	. 39
18.	Malha Refinada da Tubulação de Ar Primário	40
19.	Condições de Contorno - Figuras de 23 a 35	. 42
20.	Velocidades: Ar Axial e OutA - Figuras 36 e 37	. 51
21.	Pressão próxima à área de estrangulamento	. 52

### LISTA DE TABELAS

1. '	Tipos de combustíveis simulados	24	ŀ
------	---------------------------------	----	---

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 A Mecânica dos Fluidos	12
2.1.1 Equações de Navier-Stokes	12
2.1.1.1 Suposições Básicas	14
2.1.1.2 Leis de Conservação	14
2.2 O CFD e o Processo de Fabricação de Cimento	17
2.2.1 Aplicações do CFD e Correlação com Processo de Fabricação de Cimento	20
2.2.1.1 Processo de Clinquerização	20
3. METODOLOGIA	29
3.1 Ansys CFX 10.0	29
3.1.1 Geometria	30
3.1.2 Malha	32
3.1.3 Condições de Contorno - CFX PRE	33
3.1.4 Solver	34
3.1.5 Pós Processamento	35
3.2 Plano de Desenvolvimento da Simulação	36
3.2.1 Criação da Geometria	36
3.2.2 Refinamento da Malha	37
3.2.3 Condições de Contorno	37
3.2.4 Próxima Etapa	37
4. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO DO AR PRIMÁRIO ATÉ O QUEIMADOR	R
EM FORNO ROTATIVO	38

4.1 Iniciação	38
4.2 Método Numérico	39
4.3 Resultados e Discussões	50
5. CONCLUSÃO	53
5.1 Trabalhos Futuros	53
BIBLIOGRAFIA	54

### 1 INTRODUÇÃO

O processo industrial de fabricação de cimento a seco, envolve as seguintes operações: britagem; dosagem, moagem e homogeneização da mistura crua (farinha); clinquerização (queima da Farinha); resfriamento; dosagem, moagem e ensacamento do cimento.

A clinquerização consiste, basicamente, na condução da farinha (calcário + argila de fina granulometria) a um trocador de calor, uma torre de ciclones, onde é aquecida, com os gases provenientes do forno em fluxo co-corrente.

Neste trabalho, será realizado um estudo sobre o escoamento de ar primário até o queimador em um forno rotativo, que se encaixa na etapa de clinquerização. E foi motivado pela discussão sobre os efeitos do ar primário no perfil da chama em queimadores. O ar primário, gerado por sopradores, juntamente com combustíveis são responsáveis pela chama do queimador.

Na cimenteira Holcim, onde todo o estudo de campo foi elaborado, são utilizados dois sopradores, conectados a uma tubulação (geometria de trabalho) que conduzirá o ar primário até o queimador. Observando o problema citado, fica fácil perceber a presença de fenômenos influenciados pelo escoamento de fluidos. Dessa maneira será utilizada a modelagem por Fluidodinâmica Computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics) que permite, por exemplo, determinar as características de um escoamento (pressões, velocidades, temperaturas, concentrações de espécies químicas, etc.), por meio da resolução numérica de equações diferenciais a derivadas parciais. A utilização do CFD aporta uma série de benefícios, entre eles a eliminação de etapas intermediárias no desenvolvimento de equipamentos, minimiza o processo de "tentativa e erro", reduz custos e riscos de "scale-up".

O CFD é considerado hoje como uma ferramenta indispensável para a análise de problemas relacionados a escoamento de fluidos e transferência de calor. Em praticamente todos os ramos da engenharia o CFD é usado para desenvolvimento de produtos, projetos e otimização de processos e equipamentos; inclusive no processo produtivo de cimento.

Contudo, neste estudo será simulado uma situação fora do normal na Holcim. Apenas um soprador vai ser utilizado buscando o ótimo (como funciona atualmente - com dois sopradores) e minimizando gastos na empresa. Através do CFD, utilizando um software licenciado pertencente a *Ansys inc.* o *Ansys* CFX 10.0, ficarão claros os resultados e conclusões poderão ser tomadas.

No capitulo 2 será apresentado uma revisão bibliográfica, onde a mecânica dos fluidos, base do CFD, e a correlação entre o processo de fabricação de cimento e o CFD farão parte de seu conteúdo.

No capítulo 3 a metodologia empregada será explicada, assim como detalhes do desenvolvimento de simulações dentro do software Ansys CFX 10.0, e por fim os passos que irão ser seguidos.

O capítulo 4 mostrará a simulação propriamente dita, o que foi feito e como foi feito. E o capítulo 5 trará as conclusões do estudo.

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 A Mecânica dos Fluidos

A Teoria da Mecânica de Fluidos procura dar uma descrição matemática dos fluidos e do seu comportamento. É difícil fornecer uma definição precisa do que é um fluido. Uma primeira definição, forçosamente pouco rigorosa, diz-nos que um fluido é uma substância capaz de sofrer deformações consideráveis quando sujeito a forças exteriores. Na natureza, a matéria pode ser encontrada em um de três possíveis estados: sólido, líquido ou gasoso. De entre estes três, os líquidos e os gases são aqueles que melhor se podem caracterizar como fluidos. Um sólido, em princípio, não corresponde a esta definição pois não possui capacidade para se deformar1. Existem, no entanto, algumas exceções que não se enquadram facilmente no estado sólido nem no estado líquido. Algumas resinas sintéticas fraturam-se quando sujeitas a impactos súbitos (caracterizando-se portanto como sólidos) mas são capazes de se deformar significativamente quando sujeitas a forças de ação lenta (podendo então ser consideradas como fluidos extremamente viscosos). Outras substâncias vão ainda mais longe, como as soluções de polímeros, exibindo simultaneamente comportamentos de sólido e de líquido.

Excetuando-se estas substâncias mais "exóticas" pode-se afirmar, com alguma segurança, que apenas os líquidos e os gases possuem a capacidade de fluidez. Entre eles estão os fluidos que mais vulgarmente se encontram na natureza como a água ou o ar.

No presente estudo o ar será o fluido de pesquisa.

A seguir as equações de Navier-Stokes serão detalhadas, por serem de grande importância no decorrer do trabalho.

#### 2.1.1 Equações de Navier-Stokes

As equações de Navier Stokes são equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos.

#### Equações:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Quando muito tem capacidade para sofrer deformações limitadas, dizendo-se então que é um sólido elástico.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &+ \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0 \\ \rho \bigg( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + vz \frac{\partial v_z}{\partial z} \bigg) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \bigg( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \bigg) \\ \rho \bigg( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + vz \frac{\partial v_z}{\partial z} \bigg) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \bigg( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \bigg) + \rho g \\ \frac{\partial}{\partial t} u i + \sum u j \frac{\partial u i}{\partial x j} = V \Delta u i - \frac{\partial p}{\partial x i} + f i(x, t) \end{aligned}$$

As equações de Navier-Stokes foram denominadas assim após *Claude-Louis Navier* e *George Gabriel Stokes* desenvolverem um conjunto de equações que descreveriam o movimento das substâncias fluidas. Estas equações estabelecem que mudanças no momento e aceleração de uma partícula fluída são simplesmente o produto (resultado) das mudanças na pressão e forças viscosas dissipativas (similar a fricção) atuando em dentro do fluido. Esta força viscosa se origina na interação molecular e atua como gavinhas para fluido. Portanto, a equação de Navier-Stokes é um equilíbrio dinâmico do balanço de forças atuando em qualquer região do fluido.

Estas equações, diferentes das equações algébricas, não procuram estabelecer uma relação entre as variáveis de interesse (por exemplo. velocidade e pressão), em vez disto, elas estabelecem relações entre as *taxas de variação* ou fluxos destas quantidades. Em termos matemáticos, estas razões correspondem a suas derivadas. As equações de Navier-Stokes para o caso mais simples de um fluido ideal com viscosidade zero, estabelecem que a aceleração (a razão de variação da velocidade) é proporcional a derivada da pressão interna [INGE, 1991].

Isto significa que as soluções das equações de Navier-Stokes para um dado problema físico devem ser obtidas com a ajuda do cálculo. Em termos práticos, somente os casos mais simples podem ser resolvidos desta forma e suas soluções exatas são conhecidas. Estes casos freqüentemente envolvem fluxo não-turbulento em estado estacionário (o fluxo não varia como o tempo) no qual a viscosidade do fluido é grande ou sua velocidade pequena (número de Reynolds pequenos).

Para situações mais complexas, tais como um sistema de clima global como o *El Niño* ou a sustentação em uma asa, as soluções para a equação de Navier-Stokes freqüentemente devem ser encontradas com a ajuda de computadores (CFD).

#### 2.1.1.1 Suposições Básicas

Antes de entrar nos detalhes da equação de Navier-Stokes, é necessário fazer várias suposições à cerca dos fluidos. A primeira é que um fluido é um meio continuo. Isto significa que ele não contém vazios, como por exemplo, bolhas dissolvidas no gás, ou que ele não consiste de partículas como da neblina. Outra hipótese necessária é que todas as variáveis de interesse tais como pressão, velocidade, densidade, temperatura, são diferenciáveis (isto é, não tem transição de fase).

Estas equações são obtidas de princípios básicos de conservação da massa, momento, e energia. Para este objetivo, algumas vezes é necessário considerar um volume arbitrariamente finito, chamado de um volume de controle, sobre o qual estes princípios possam ser facilmente aplicados. Este volume é representado por  $\Omega$  e sua superfície de confinamento por  $\partial\Omega$ . O volume de controle permanece fixo no espaço ou pode mover-se como o fluido. Isto conduz, contudo, para considerações especiais, como será mostrado a seguir[POLYANIN,2002].

#### 2.1.1.2 Leis de Conservação

As equações de Navier-Stokes são derivadas dos princípios da conservação da: massa, energia, momento e momento angular.

Adicionalmente, é necessário assumir uma relação constitutiva ou lei de estado para o fluido.

Na sua forma mais geral, uma lei de conservação estabelece que a razão de mudança de uma propriedade continua *L* definida em todo volume de controle deve ser igual àquilo que é perdido através das fronteiras do volume, carregado para fora pelo movimento do fluido, mais o que é criado/consumido pelas fontes e sorvedouros dentro do volume de controle. Isto é expresso pela equação integral:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} L \ d\Omega = -\int_{\partial\Omega} L \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} d\partial\Omega + \int_{\Omega} Q d\Omega$$

Onde v é a velocidade do fluido e representa as fontes e sorvedouros no fluido.

Se o volume de controle é fixado no espaço então a equação integral pode ser expressa assim:

$$\frac{d}{dt}\int_{\Omega}Ld\Omega = -\int_{\Omega}\nabla\cdot(L\mathbf{v})d\Omega + \int_{\Omega}Qd\Omega$$

Note que o teorema da divergência de Gauss foi usado na dedução desta última equação, de forma a expressar o primeiro termo do lado direito no interior do volume de controle. Portanto:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} L d\Omega = -\int_{\Omega} (\nabla \cdot (L\mathbf{v}) - Q) d\Omega$$

A expressão acima é válida para  $\Omega$ , que é um volume de controle que permanece fixo no espaço. Devido a  $\Omega$  não variar no tempo, é possivel trocar os operadores " $\frac{d}{dt}$ " e " $\int_{\Omega} d\Omega$ ". E como esta expressão é valida para *todos* os domínios podemos, além disso, remover a integral.

Com a introdução da derivada substantiva obtemos, quando Q = 0 (nenhuma fonte ou sorvedouro):

$$\frac{\partial}{\partial t}L + \nabla \cdot (L\mathbf{v}) = \frac{D}{Dt}L + L\left(\nabla \cdot \mathbf{v}\right) = 0$$

#### a) Equação da continuidade

A conservação da massa é descrita assim:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) &= 0\\ &= \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho\\ &= \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \end{aligned}$$

 $\label{eq:onderson} \text{Onde } \rho \text{ \'e a densidade de massa (massa por unidade de volume), e v \'e a velocidade do fluido.}$ 

#### b) Conservação do momento

A conservação do momento é expressa de maneira similar à equação de continuidade, com o componente vetor do momento substituindo o de densidade, e com um termo fonte para representar as forças que atuam no fluido.

Será substituído  $\rho$  na equação de continuidade com o momento rede por unidade de volume ao longo de uma direção em particular,  $\rho v_i$ , onde  $v_i$  é o *i* <sup>th</sup> componente da velocidade, isto é, a velocidade ao longo das direções *x*, *y*, ou *z*.

$$rac{\partial}{\partial t}\left(
ho v_{i}
ight)+
abla\cdot\left(
ho v_{i}\mathbf{v}
ight)=
ho f_{i}.$$

Onde  $\rho f_i$  é a  $i^{th}$  componente da força atuando no fluido (sempre força por unidade de volume. As forças comumente encontradas incluem a gravidade e gradientes de pressão. Isto também pode ser expresso como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho \mathbf{v} \right) + \nabla (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \rho \mathbf{f}$$

Note que  $\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}$ é um tensor, o  $\otimes$  representa o produto tensor. Simplificando, usando a equação de continuidade, e obtendo:

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho f_i$$

A qual é frequentemente escrita como:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{f}$$

Na qual é reconhecido o usual F=ma.

#### 2.2 O CFD e o Processo de Fabricação de Cimento

O processo industrial de fabricação de cimento a seco, envolve as seguintes operações: britagem; dosagem, moagem e homogeneização da mistura crua (farinha); clinquerização (queima da Farinha); resfriamento; dosagem, moagem e ensacamento do cimento.

O processo tem origem com as atividades de mineração do calcário e argila. O calcário britado é transportado até um pátio onde são construídas pilhas de homogeneização. Logo após ele segue para a instalação de moagem de cru, onde é misturado com argila em um moinho de bolas, formando assim a farinha (calcário + argila de fina granulometria).

O moinho de farinha é constituído por dois compartimentos, sendo a matéria prima admitida no primeiro compartimento, conhecido como câmara de secagem. O material previamente seco segue para um segundo compartimento, para realização da moagem. Após a moagem na câmara a farinha é transferida, por dois elevadores de canecas, para dois separadores dinâmicos. A fração fina da farinha é transportada por fluidores e bombas para o silo onde é garantida a sua completa homogeneização através de um processo de aeração. A fração grosseira do separador retorna para o moinho para ser moída novamente até atingir a granulometria desejada.

Os gases do processo de moagem de farinha são filtrados através de 04 ciclones para recuperação dos sólidos. Em seguida os gases são levados para os eletrofiltros para a retirada do restante de material sólido. Há, ainda, uma torre de refrigeração, onde são resfriados em conjunto com os gases do forno e por último um eletrofiltro, liberando os mesmos para atmosfera através de uma chaminé. Todo material particulado recuperado retorna para o processo.

Já na etapa de clinquerização, a farinha homogeneizada é conduzida ao um trocador de calor, uma torre de ciclones, onde é aquecida, com os gases provenientes do forno em fluxo co-corrente.

Dessa etapa a mistura segue para o forno rotativo, onde a clinquerização será concluída a temperaturas de aproximadamente 1400 °C. O forno é um cilindro rotativo de 80-100 m de comprimento e 4-5m de diâmetro e na saída há um resfriador onde o clínquer é resfriado até a temperatura de 200°C a 250°C, utilizando-se de fluxo de ar frio. Este ar é utilizado no forno como ar secundário para auxiliar na combustão.

As temperaturas necessárias para formação de clínquer são obtidas pela combustão de óleo, carvão, coque e combustíveis alternativos.

Os combustíveis sólidos são moídos em moinho vertical e injetados pneumaticamente no forno pelo queimador principal utilizando sopradores. O óleo combustível aquecido é usado durante o processo de aquecimento do forno. Os combustíveis alternativos são preparados em unidades próprias e são injetados, dependendo de suas propriedades físicas e químicas, nos pontos onde existam as condições adequadas ao seu co-processamento.

O cimento é obtido da moagem do clínquer com adições, como gesso, cuja proporção varia em função do tipo de cimento desejado. O sistema de moagem de cimento é semelhante ao da moagem de farinha sendo composto por moinho de bolas e separadores dinâmicos. Os diversos tipos cimento são transportados para os silos de armazenamento, sendo posteriormente embalados em sacos de papel e estes transportados por caminhões para comercialização. O cimento também é comercializado a granel, por caminhões ou através de vagões em transporte ferroviário. A figura 01 ilustra o processo acima descrito.



Figura 01 – Processo de Fabricação de Cimento. (HAMIL, N, 1996, p.122).

Observando a descrição do processo de fabricação de cimento, é fácil perceber que nas suas diversas etapas há transferência de calor, reações químicas entre outros fenômenos fortemente influenciados pelo escoamento de fluidos. A mecânica dos fluidos computacional, popularmente conhecido como CFD, refere-se à modelagem matemática e solução de equações que governam o comportamento dos fluidos. Estas equações, conhecidas como equações de Navier-Stokes, são tão complexas que nem mesmo os maiores matemáticos do mundo obtiveram sua solução analítica.

Apenas com o advento do computador digital moderno, nos anos 70, foram desenvolvidas técnicas de solução numérica para estas equações. As primeiras aplicações ocorreram na indústria aeroespacial, mas com o passar do tempo sua utilização se espalhou progressivamente por todo o espectro industrial. Os carros modernos utilizados hoje tiveram a aerodinâmica de seu formato e a combustão de seu motor simulados e projetados com uso de CFD. O resultado disto é que os automóveis de hoje são muito mais eficientes em termos de consumo de combustível do que os carros de 20 ou mais anos atrás (um avanço considerável se lembrarmos do aumento nos preços dos combustíveis).

Antes do CFD, a indústria cimenteira, como muitas outras, tinha que contar com a modelagem física para avaliar e melhorar a performance de equipamentos como ciclones, calcinadores, fornos rotativos, queimadores, etc. A modelagem física proporciona bons resultados, mas possui limitações como simulação de única fase ou de problemas isotérmicos.

Atualmente, a industria cimenteira está claramente preocupada com outros fatores como o arraste de partículas, as variações de temperatura, e o efeito do escoamento na combustão. Como CFD permite a resolução das equações que descrevem o comportamento dos fluidos a partir dos fundamentos básicos de física e química, estas considerações não apresentam nenhuma dificuldade. Esta técnica pode ser aplicada a qualquer processo fornecendo resultados muito diferentes daqueles da modelagem física. [AKHTAR, 2006]

De uma forma bastante resumida, pode-se dizer que utilizar a técnica CFD consiste em dividir a área do escoamento em um grande número de células ou volumes de controle chamados de malha ou grade, reescrever as equações de Navier-Stokes e demais equações parciais que descrevem o escoamento em cada uma destas células e então resolvê-las numericamente. A solução rende uma figura do escoamento correspondente ao nível de resolução da malha, cuja interpretação exige que se tenha conhecimento não apenas do processo simulado, mas principalmente dos fundamentos da mecânica dos fluidos. [HAMIL,1996]

O CFD é considerado hoje como uma ferramenta indispensável para a análise de problemas relacionados a escoamento de fluidos e transferência de calor. Em praticamente

todos os ramos da engenharia o CFD é usado para desenvolvimento de produtos, projetos e otimização de processos e equipamentos. CFD fornece simulações que podem ser usadas para avaliação, exame crítico e otimização, sendo particularmente apropriado para simular processos novos e existentes em experiências de custos muito mais baixos e menor tempo do que outras práticas como métodos de tentativa e erro, laboratório ou experimentos em planta piloto. Embora o uso de CFD esteja se tornando cada vez mais popular, cuidado extremo deve ser tomado para avaliar com precisão os resultados das predições.

#### 2.2.1 Aplicações do CFD e Correlação com Processo de Fabricação de Cimento

Existem diversos trabalhos na área da mecânica dos fluidos computacional que, tendo sido desenvolvidos com o intuito de atender as necessidades da indústria cimenteira, fornecem resultados de importante contribuição na otimização do processo produtivo do cimento. A seguir será destacado um destes trabalhos relativo ao processo de clinquerização, área de enfoque deste estudo

#### 2.2.1.1 Processo de Clinquerização

A indústria de cimento é um dos maiores consumidores de energia, com um consumo específico de aproximadamente 3,2 MJ/kg de clínquer produzido [HAMIL,1996]. Desde a primeira etapa, a clinquerização envolve reações muito endotérmicas como descarbonatação. A tendência atual em economizar energia nos fornos de cimento está focada em aumentar a eficiência de recuperação de energia dos gases de exaustão do forno e na utilização de combustíveis alternativos que possuem menor poder calorífico, porém menor custo. Geralmente um forno rotativo possui um tempo de residência na chama de 2 a 5 s e temperaturas acima de 2200K, o que o torna uma alternativa competitiva a incineradores comerciais para resíduos orgânicos e solventes. Para assegurar que a clinquerização não será afetada por alterações na chama, em função da utilização destes novos combustíveis, e que não serão gerados poluentes é necessário conhecer detalhadamente a estrutura da chama e os mecanismos da transferência de calor entre esta e o material sólido.

O CFD tem sido aplicado à teoria de modelagem do campo de escoamento e da combustão em fornos de cimento. Os primeiros resultados obtidos demonstram que os modelos utilizados são aplicáveis não apenas ao forno de cimento, mas a uma variedade de

fornos industriais com precisão aceitável, pois reproduzem resultados coerentes com medidas experimentais no que diz respeito a comprimento de chama, consumo de oxigênio, etc. [MASTORAKOS, 1999].

Estudos como o de *Mastorakos et al* apresentam a modelagem do processo de clinquerização e da combustão de carvão sob condições reais de operação quantificando o fluxo de calor entre a chama e o clínquer e a perda térmica pelo casco do forno. Para tal foi utilizado o FLOW-3D (um código de CFD comercial), que inclui o método de Monte Carlo para radiação, método de volumes finitos para transferência de calor nas paredes, e um código novo envolvendo as espécies químicas e as reações de clinquerização. A figura 02 apresenta um desenho esquemático das partes modeladas e indica os fluxos de calor estudados.



Figura 02 – Indicação esquemática das partes contempladas no modelo forno rotativo incluindo fluxos de energia. (MASTORAKOS E., 1999, p.59).

A predição do perfil de temperatura nas proximidades da chama demonstrou que a combustão do carvão ocorre a 1 m do ponto de injeção e que o ponto máximo de temperatura da chama é obtido 40 m após a injeção. O tempo máximo para a combustão completa do carvão é de 1,4 s, correspondendo neste caso a uma distância de 45 m do queimador. [MASTORAKOS, 1999].

A explicação para o fato, muitas vezes observado na prática, de que os combustíveis líquidos ou sólidos mais finos produzem chamas de menor comprimento está no tempo para combustão de voláteis ser da ordem de 0,1 ms.

A figura 03 mostra que há uma zona de recirculação que prejudica a estabilidade da chama, isto porque nos primeiros metros após o queimador há uma região de turbulência.

Off the water

### Figura 03 – Vetores de velocidade na região próxima ao queimador. A magnitude dos vetores mostra o componente swirl da velocidade. (MASTORAKOS E., 1999, p.61).

A transferência de calor no sistema gás-forno-clínquer ocorre predominantemente pelo mecanismo de radiação, sendo que 10% do calor gerado é perdido dos refratários para o ambiente e 40% é absorvido pelo material sólido e nas reações de clinquerização (Figura 04).



Figura 04 – Distribuição axial dos fluxos de calor radiativo e convectivo do gás para o sistema forno-clínquer calculado por FLOW3D-RAD3D. (YOUSIF S., 2006, p.25).

As predições de temperatura externa do forno são coerentes com medidas reais de fornos de cimento, como demonstrado na figura 05.



Figura 05 – Comparação das predições com medidas da temperatura externa do forno de cimento de várias fábricas. (YOUSIF S., 2006, p.25).

*Yousif et al* também utilizou o CFD para estudar a influência do tipo de combustível no comportamento de chama e na qualidade do clinquer em fornos de cimento. A composição do material dentro do forno foi aproximada para CaCO<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S, C<sub>3</sub>A, e C<sub>4</sub>AF, sendo as quatro últimas espécies uma nomenclatura especial adotada por químicos de cimento para os sais complexos formados durante a clinquerização. Foram simulados quatro casos, conforme tabela 01 a seguir.

As variações das frações em massa das espécies originais e de C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF formados são mostradas na Figura 06 para as chamas obtidas nos casos 1 e 4.

	Contribuição Térmica
Caso 1	100 % Carvão (coal)
Caso 2	70% Carvão $70%$ DSS <sup>2</sup>
Caso 3	50% Carvão 50% DSS
Caso 4	100% DSS

Tabela 01 – Tipos de combustíveis simulados *Yousif et al* (YOUSIF S., 2006, p.29).

A Figura 07 mostra a variação da temperatura do material para os mesmos casos acima mencionados.



Figura 06 – Variação da composição do clinquer com o comprimento do forno (a) chama de carvão e (b) chama de DSS. (YOUSIF S., 2006, p.26).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Terra contaminada com esgoto seca e moída





O material é alimentado ao forno a uma temperatura de aproximadamente 800°C e atinge temperaturas acima de 1000 °C a uma distância de cerca de 30 m da entrada do forno para a chama de carvão onde a radiação é mais intensa e a uma distância de aproximadamente 40 m para a chama de DSS.



Figura 08 – Variação da temperatura do clinquer com o comprimento do forno (YOUSIF S., 2006, p.27).

A figura 08 mostra a transferência de calor para o material ao longo do comprimento do forno. Fica evidente que a chama de DSS transfere uma quantia maior de calor para o material próximo a entrada do forno dentro de uma distância pequena, enquanto

a chama de carvão transfere calor de forma contínua. A razão para isso vem do fato de que os compostos voláteis que geram mais calor são queimados próximo ao queimador quando DSS é introduzido. O ponto de máxima transferência de calor da chama de carvão é mais distante da entrada do forno do que o da chama de DSS. O DSS mostrou ser um combustível alternativo viável para ser usado em produção de cimento. [YOUSIF et al, 2006].

O trabalho desenvolvido na PSL – *Process Simulation Ltd*, que utiliza o CFD na otimização operacional de forno de cal também ilustra a influencia da mudança de combustível no perfil térmico do forno (Figura 09), complementando o trabalho de *Yousif et al*.



**(a)** 



### Figura 09 – Variação da temperatura interna dos gases do forno (a) chama de coque de petróleo e (b) chama de óleo combustível (VANCOUVER, B.C., 2004, p.10).

Estudos como o de *Yousif et al* demonstram o potencial da utilização do CFD no estudo de viabilidade de utilização de combustíveis alternativos, permitindo que se conheça os impactos destes na chama e na qualidade do clinquer. É indiscutível a importância deste conhecimento no processo de fabricação de cimento, uma vez que vai de encontro aos objetivos de se atingir custos térmicos cada vez menores e produtos de qualidade garantida.

Outro aspecto de grande impacto nos custos da clinquerização é a vida útil dos refratários utilizados nos fornos. A aplicação do CFD no estudo do impacto do formato da chama no desgaste dos refratários em fornos de cal é demonstrada no trabalho de *Georgallis et al.* O código de CFD usado desenvolvido por *Nowak*, do Departamento de Engenharia Mecânica na Universidade de Columbia é baseado no método de volumes finitos.O modelo

inclui efeitos de força ascensional, turbulência (usando o modelo padrão k-ε), evolução e combustão de espécie gasosa (Modelo de *Magnussen*), e radiação pela técnica de traçado de raio (Método de Ordenada Discreta).

A figura 10a mostra o fluxo de calor no plano vertical central do forno. Os dados de comprimento de chama podem ser extraídos da figura 10a. Se, por exemplo, há alteração de 1% ou 2% no valor de fração mássica do combustível é usada como condição de contorno, a chama chega a penetrar aproximadamente 1 m no forno. Este resultado é bastante coerente com as expectativas dos fabricantes do queimador. O contato da chama com os refratários da parede superior também é claramente visível nestes dados.



### Figura 10 – (a) Fração mássica de gás natural e (b) Campo de velocidade axial (m/s) (YOUSIF S., 2006, p.29).

O componente de velocidade axial mostrado na Figura 10b identifica vários detalhes capturados, inclusive o fenômeno de recirculação da chama conhecido como *Craya-Curtet*. A inversão de fluxo no queimador indica possibilidade de problemas de grande quantidade de pó na região do queimador.

A simulação mostrou dois pontos de temperatura alta na parede interna do forno. O primeiro é o lugar quente devido ao contato da chama com a parede. A zona de chama seria uma segunda parte quente visível. Isto ocorreu devido à presença de refratários com condutividade mais baixa [GEORGALLIS et al]. O trabalho da PSL – *Process Simulation Ltd,* complementa os resultados de *Georgallis et al* mostrando o impacto do ângulo do queimador (Figura 11) e das forças de sustentação no perfil térmico interno do forno.



Figura 11 – Efeito do ângulo do queimador e das forças de sustentação no perfil térmico interno do forno de cal. (VANCOUVER, B.C., 2004, p.11).

Embora estes resultados sejam de estudos do forno de cal, eles são perfeitamente transferíveis para o forno de cimento, uma vez que se trata de processos muito semelhantes.

#### **3 METODOLOGIA**

Neste capitulo os detalhes do desenvolvimento de simulações dentro do software Ansys CFX 10.0 serão inicialmente mostrados, em seguida o plano de desenvolvimento da simulação, ou seja, tudo o que foi feito até o processo de cálculo computacional será apresentado. Como que a geometria foi elaborada, dados de campo, refinamento da malha, condições de contorno e por último os passos que irão ser seguidos.

#### 3.1 Ansys CFX 10.0

A seguir será mostrado, de forma básica, como trabalhar no software escolhido para a simulação neste estudo.

O Ansys CFX 10.0 é um software, licenciado pertencente a Ansys inc., específico que trabalha com códigos propondo a solução numérica (pelo método dos volumes finitos) de equações governantes que descrevem o movimento dos fluidos, como o conjunto de equações de Navier-Stokes. E possui suas principais etapas descritas na figura 12.



Figura 12 – Mains Steps in CFX Analysis. (ANSYS INC., 2006, s.02).

#### 3.1.1 Geometria

Etapa inicial de qualquer simulação. Neste nível o usuário pode criar, importar ou exportar uma geometria 3D, além de modificá-la e até excluí-la se necessário. Tudo através de uma interface bem amigável. Além de gerar resultados em um ou mais corpos no mesmo arquivo.

Possui uma *ToolBar* específica para modelagens em 3D, como mostra a figura 13 e um sistema de trabalho voltado aos planos XY, ZX e YZ, com qualquer variação podendo ser aplicada nos moldes dos mesmos.



### Figura 13 – *ToolBar in CFX Analysis*. (ANSYS INC., 2006, s.04).

A figura 14 ilustra a interface completa do *DesignModeler*<sup>3</sup>, com uma geometria utilizando dois planos extras e algumas funcionalidades como *Extrude*<sup>4</sup> e *Sweep*<sup>5</sup>. E a figura 15 traz no canto esquerdo, uma guia de formas geométricas que são utilizadas na construção de geometrias 3D, de acordo com a necessidade.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Componente do CFX, responsável pela geração de geometria.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Ferramenta de desenho responsável alongar uma forma geométrica.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Une duas formas geométricas não alinhadas.



Figura 14 – Geometria no DesignModeler. (ANSYS INC., 2006, s.07).



Figura 15 – Guia Sketching. (ANSYS INC., 2006, s.08).

Uma vez criada, a geometria deve ser utilizada na etapa seguinte. A de geração de malha computacional.

#### 3.1.2 Malha

É a segunda etapa no processo, podendo gerar volumes ou elementos finitos. O CFX é compatível com malhas cujos elementos podem ser *hexahedrals*, *tetrahedrals*, prismáticos (cunhas), pirâmides ou qualquer combinação destas.

A malha ou grade (área de fluxo dividida em um grande número de células, ou volumes de controle), pode ser considerada a chave para o sucesso de toda simulação. Quanto mais refinada, melhores são os resultados e maior é o "trabalho" computacional. A figura 16 exibe uma malha refinada da maneira correta.



### Figura 16 – Exemplo de malha refinada corretamente, ou seja, na região de maior interesse. (ANSYS INC., 2006, s.17).

A malha final é composta de uma malha superficial e uma malha volumétrica, e pode - também - ser importada de qualquer outro software gerador de malha.



Abaixo, na figura 17, será mostrado uma visão geral do CFX-Mesh<sup>6</sup>.

Figura 17 – *CFX-Mesh*. (ANSYS INC., 2006, s.18).

Com a malha final gerada a simulação, propriamente dita, já pode ter início.

#### 3.1.3 Condições de Contorno - CFX PRE

Os dados de processo, de campo são inseridos nesta etapa. O auxílio de um especialista no assunto a ser simulado, é fundamental para que as condições de contorno possam ser inseridas de forma coerente. Podendo trazer, assim, um resultado bem próximo do real.

A simulação é definida através da criação de domínios, subdomínios, pontos iniciais, condições de contorno, interfaces entre domínios diferentes, condições iniciais globais, entre outros.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Componente gerador de malhas do CFX.



### Figura 18 – *CFX-PRE*. (ANSYS INC., 2006, s.20).

A figura 18 mostra a criação de um domínio fluido, e a partir dele (e outros domínios que por ventura aparecerem) as demais condições de contorno podem ser inseridas, modificas e deletadas. Bastando apenas seguir os pré-requisitos operacionais da simulação.

Tudo definido, agora surge o cálculo computacional.

#### 3.1.4 Solver

O CFX-Solver representa o nível que exige mais dos recursos computacionais. Nessa etapa os cálculos são efetuados e os resultados numéricos são apresentados.





A figura 19 representa uma simulação sendo calculada. Do lado esquerdo a parte gráfica e do lado direito às iterações sendo calculadas uma a uma, até convergir (caso positivo) ou divergir não alcançando a resposta esperada.

#### 3.1.5 Pós Processamento

Etapa de visualização e quantificação dos resultados. Suporta criação de vídeos, esquemas gráficos, objetos como pontos, linhas, vetores e planos paralelos podem ser inseridos como forma de auxilio no entendimento do que foi gerado - dentre outras funcionalidades que um estudo avançado do software pode mostrar - tudo isso associado às condições de contorno e unidades de engenharia.



Figura 20 – Visão geral do *CFX-Post*. (ANSYS INC., 2006, s.23).

O próximo passo é utilizar os resultados de acordo com a aplicação requerida.

#### 3.2 Plano de Desenvolvimento da Simulação

A maioria das simulações não atingem o ideal na primeira vez em que são compiladas, desta maneira o presente trabalho seguirá com a metodologia empregada até a etapa de processamento do computador.

#### 3.2.1 Criação da Geometria

A geometria foi inicialmente elaborada com bases nos desenhos 2D fornecidos pela Holcim, porém foi necessário checar no campo industrial se os dados estavam realmente corretos. E os resultados não foram satisfatórios.

Contudo, depois de rever todas as medidas e inseri-las, provisoriamente, no software da *Microsoft* o *MS Paint*, foi obtido um novo desenho 2D da tubulação de ar primário. E a partir deste, foi construída uma geometria tridimensional em escala real.

#### 3.2.2 Refinamento da Malha

A malha criada, com base na geometria 3D, passou por 7 modificações. Inicialmente ela possuía 1 milhão e 700 mil nós (células), era *Tetrahedral* e igual em toda a geometria. O computador utilizado para rodar a simulação, um Pentium 4 HT com 3GB de RAM, não suportou.

O número de nós foi reduzido para 1 milhão e 200 mil e o computador ainda sim não fez com que a simulação convergisse.

Caiu para 1 milhão de células, e o resultado ainda divergiu.

Com 1 milhão de nós porém com o modelo *Hexahedral*, negativo. Novecentos mil nós e nada.

Logo, foi feito um refinamento na região onde a tubulação subdivide-se em 3 menores (será detalhado no próximo capitulo), e na sétima tentativa o número de células foi reduzido para 700 mil, terminando assim a malha ideal.

#### 3.2.3 Condições de Contorno

As condições aplicadas inicialmente seguiram apenas valores de pressão, coletados no campo industrial. E como será simulado apenas um soprador (SP1), o que seria entrada de ar do soprador 2 (SP2), tornou-se parede. Porém foi concluído que pressão para entrada (SP1) não gerou uma resposta adequada, com isso foi inserido velocidade para entrada e pressões para as 3 saídas.

Quatro domínios foram criados, um domínio fluido para a grande maioria da geometria, e 3 domínios porosos na ponta de cada uma tubulação menor.

#### 3.2.4 Próxima Etapa

O próximo passo será seguir os dados finais dos testes descritos nos itens 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3 e iniciar a simulação.

## 4 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO DO AR PRIMÁRIO ATÉ O QUEIMADOR EM FORNO ROTATIVO

Um dos equipamentos mais importantes na produção de clinquer é o forno rotativo, sendo este um dos maiores consumidores de energia no processo, o que se evidencia pelas elevadas temperaturas envolvidas na obtenção do produto final. O conhecimento dos complexos mecanismos de transferência de calor em tais equipamentos torna-se vital para que tenhamos maior controle do processo, dando os primeiros passos na direção de sua otimização.

#### 4.1 Iniciação

Em relação aos estudos nesta área particular da combustão, podem-se distinguir nas últimas duas décadas algumas direções distintas de pesquisa na tentativa de desenvolver modelos que conseguissem descrever os fenômenos de transferência de calor envolvidos. Uma vertente, que inclui trabalhos como os de *Fudihara et al.* (1996), realizou análises sobre a estrutura da chama. Já os trabalhos de *Barr et al.* (1989), deram ênfase ao estudo dos fenômenos de trocas térmicas entre os gases de combustão, o material sólido e a parede.

O presente trabalho, porém, procura entrar no campo de pesquisadores como *Kolyfetis & Markatos* (1996a e 1996b) e *Mastorakos et al.* (1999) e Greco (2000), que abordam o efeito da geometria da tubulação de ar primário dos queimadores no perfil da chama gerada no processo de combustão.

Faz-se necessário o uso de uma ferramenta robusta para tratá-lo. Optou-se, assim, pelo emprego da fluidodinâmica computacional, devido ao seu grande sucesso em tratar situações como a abordada neste estudo. O sucesso desta técnica se dá, em grande parte, devido à possibilidade da criação de modelos mais realísticos, utilizando-se geometrias tridimensionais, malhas computacionais mais adequadas ao fenômeno em análise, tempos de convergência da solução aceitáveis, dentre outras flexibilidades que tais códigos computacionais disponibilizam aos seus usuários.

Um dos objetivos deste trabalho é o desenvolvimento e validação de uma malha computacional tridimensional da tubulação de ar primário, desde os sopradores BO451SP1<sup>7</sup> e SP2 até o início da tubulação flexível de conexão com o queimador. Na plataforma do

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Sistema de nomenclatura (TAGs) da Holcim - Unidade Barroso.

forno rotativo, utilizado na produção de cimento. Para tanto faremos uso de *softwares* da área de CFD.

#### 4.2 Método Numérico

Os seguintes softwares foram utilizados neste estudo:

- *DesignModeler*: ferramenta CAD 3D que permite a criação de geometrias, utilizando uma escala real;

- *ICEM CFD*: pacote que contém um módulo gerador de malhas - *hexahedral* - computacionais (a partir de geometrias CAD). Nele também é feito o refinamento da malha;

- *CFX-Mesh*: software semelhante ao ICEM CFD, porém é recomendado para malhas *Tetrahedrals*;

- *WorkBench*: bancada de trabalho específica para os softwares das *Ansys*. Permite visualização integrada e criação de projetos para um melhor controle dos arquivos;

- *CFX 10.0*: programa que utiliza parâmetros iniciais definidos pelo próprio usuário (condições de contorno, propriedades do escoamento, etc.), retornando gráficos e planilhas que permitem um estudo detalhado e avançado do problema.

Assim, foi construída, primeiramente, a geometria da Tubulação de ar primário. Esta é tridimensional e em escala real, e foi feita a partir de um projeto cedido pela Holcim. A figura 21 mostra a tubulação construída no presente estudo.



### Figura 21 – Geometria da Tubulação de Ar Primário. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.01).

A Tubulação é composta por um trecho de 9250 mm saindo do soprador 1 e 11865 mm saindo do soprador 2, ambas com o diâmetro de 12''. Depois essa tubulação

subdividi-se em 3 de diâmetros menores. Uma de 6<sup>''</sup>, 8<sup>''</sup> e outra de 10<sup>''</sup>, (ar Axial, Radial e Central). A tubulação de 6<sup>''</sup> possui 21729 mm, a de 8<sup>''</sup> 22193 mm e a de 10<sup>''</sup> 24958 mm.

Na saída dos sopradores existem uma válvula de alívio e uma de retenção, utilizadas para a proteção do sistema. Em seguida - fora da caixa do soprador - fica localizada uma válvula de manutenção, servindo (atualmente) para isolamento da rede. No final de cada tubulação menor (6<sup>''</sup>, 8<sup>''</sup> e 10<sup>''</sup>) existe uma válvula de controle do ar.

O ar conduzido pela tubulação em questão, juntamente com combustíveis, é responsável pela chama do queimador.

Em seguida o arquivo **.agdb**<sup>8</sup> foi adaptado para, a partir deste, gerar a malha computacional utilizando técnicas variadas associadas ao programa. A malha passou então por um refinamento(definição do nº de elementos por aresta e sua distribuição) até atingir um nível adequado para a simulação (figura 22).



Figura 22 – Malha Refinada da Tubulação de Ar Primário. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.02).

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Extensão de arquivo gerada pelo software *CFX DesignModeler*.

Devido à complexidade e a falta do desenho de base (2D), as geometrias das válvulas não foram desenvolvidas, porém métodos de substituição foram aplicados, não perdendo - assim - a confiabilidade dos dados.

As válvulas de alívio, retenção e manutenção foram substituídas por **mm** de tubulação de acordo com normas fornecidas pelos fabricantes (refletindo a mesma perda de carga). E as válvulas de controle foram trocadas por tubulações independentes (no tamanho real das válvulas), e de domínio diferentes (meio Poroso) gerando o mesmo efeito.

O processo de validação da malha se fez a partir da simulação, via CFX 10.0.

As configurações específicas da simulação foram:

- Escoamento transiente de ar como air at 25 C, sem combustão;

- Pressão referencial 1 atm;

- Tubos em aço carbono ASTM A-53 Gr.B (propriedades contidas na biblioteca do *software*);

- Esquema convectivo de alta resolução, tendo como critério de convergência resíduo de massa de 1E-05;

- Modelo de turbulência SST (Shear Stress Transport) com paredes lisas e fixas;

- Modelo de Perda Isotropic Loss (para os meios porosos A, R e C);

- O tempo computacional para este tipo de simulação é de aproximadamente dois dias.

Foram definidas ainda condições de contorno (dados fornecidos pela Holcim) como nas figuras de 23 a 35.

Alters washing to					301
a full factors trade of	Acres Accis Hall	ride and a los			
a Texture in Local			110	eenapplised is	
untered total and	tates   teleformer			A P. CONTER B ATTENDANT TO Y. DWALS P. P.	-
Bear Delivery					
(continue)	Description, Mar.	. 25	1		
Innin ten	Postimar.				
Plan lot	IN WHIT		-11		
Continue	Passe		-		
C runs ruing	0.000	-			
Domain foodale					
Tesset			- 16		
Palacos Nacion	FI MA	-			
Acore .	10 million and 10		8		
Owney .	Para Service	· •			
Create Makes	Dataset		71		
	11-2				
				the second se	
					V.
				8 D.301 8 463 8.003 FM	0.000
		-	_	the Manual Ma Manual Manual Ma	
18 Aut	• The				

Figura 23 – Criação do Domínio Fluido. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.03).



Figura 24 – Criação do Domínio Fluido. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.04).



Figura 25 – Criação do Domínio PorosoC. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.05).



Figura 26 – Domínio PorosoC com o volume de porosidade igual 0.17. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.06).

O volume de porosidade foi aplicado de acordo com o percentual de abertura da válvula de controle da tabulação de Ar Central.

Os outros dois domínios porosos A e R seguem o mesmo padrão do C, porém com os volumes de porosidade 0.90 para o PorosoA e 0.22 para PorosoR.

A HEALTH AND A	X				
alter dening 10	t ni Senicie I tarda		1	n;	
Ana Deines - Marile Hardington Value	Salaanii	्। ज	-	A SARABANANA SI JAMA SA AMA SA AMA	
Non-Jack Hamman Option Delatest Pressure	State Pressee R296(Sec)	Ð		0.000	C241.
PDo DelClini Option	(Dev il admit	÷	0		
Talahana Yakan	(Jee Sales	-	•		
					-
w	ir   coa	l		<u>1 100 1000 10</u>	÷.,
1	take Alexistera	)			

### Figura 27 – Condição de Contorno de entrada no InSP1. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.07).

Velocidade média de 28.2 m s-1 (na saída do SP1, ou seja, entrando no InSP1).



### Figura 28 – Condição de Contorno de parede no que seria o InSP2. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.08).

Condição aplicada dessa forma isola o soprador 2, colocando parede onde entraria o ar. Logo apenas o soprador 1 estaria funcionando, caso que não é rotineiro na HOLCIM. A simulação mostrará o resultado sem acontecer na prática, e a cimenteira tirará suas conclusões.



Figura 29 – Condição de Contorno de parede no que seria o InSP2. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.09).



Figura 30 – Condição de Contorno de parede no Domínio Fluido. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.10).



Figura 31 – Condição de Contorno de parede no Domínio PorosoA. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.11).

A condição acima se repete para os meios porosos R e C.



Figura 32 – Condição de Contorno de saída no OutA. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.12).



### Figura 33 – OutA com pressão relativa de saída 0.265 bar. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.13).

As outras duas saídas OutR e OutC, seguem o mesmo padrão da OutA. Porém com pressões relativas diferenciadas: 0.66 bar para a saída R e 0.50 bar para a C.



### Figura 34 – Interface entre o domínio fluido e domínio porosoA. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.14).

Interface, acima, denominada InterA na simulação. As outras duas interfaces, InterR e InterC seguem o mesmo esquema da A.



### Figura 35 – Solver Control. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.15).

Guia de controle para iniciar o processo de solver.

Número - máximo - de iterações utilizadas iguais a 10000, ou seja, se em dez mil iterações o caso não convergir ele será encerrado.

#### 4.3 Resultados e Discussões

Os resultados obtidos a partir das simulações realizadas para os campos de velocidades e pressão, serão mostrados a seguir.

A figuras 36 e 37 apresentam os resultados obtidos para o campo de velocidades, através de um plano paralelo YZ na coordenada x = 2.7 m (exatamente na tubulação de ar AXIAL), sendo esta última uma ilustração do campo de velocidades na região situada na saída A (OutA). É importante salientar que os vetores nestas figuras foram normalizados para uma melhor visualização do campo de velocidades.



Figura 36 – Velocidade na tubulação de ar AXIAL. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.16).



Figura 37 – Velocidade no OutA. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.17).

A figura 38 ilustra o campo de pressões em parte da tubulação, por se tratar de uma geometria relativamente grande. Nesta figura observa-se que as maiores pressões estão distribuídas nas regiões de menor área da tubulação (como esperado), além da inexistência de grandes variações no perfil de velocidade ao longo da tubulação, que só se altera significativamente próximo às regiões de estreitamento da tubulação. Isto é absolutamente coerente com o tipo de escoamento.



Figura 38 – Pressão próxima à área de estrangulamento. (ANSYS CFX 10.0, 2006, s.18).

### **5 CONCLUSÃO**

Considerando apenas uma comparação qualitativa dos resultados obtidos com outros disponíveis no mesmo campo de estudos, pôde-se concluir que os presentes resultados seguem a tendência do comportamento esperado. Tais resultados tornam possível a realização de diversas análises acerca do processo, como, por exemplo, a certeza de que apenas um soprador pode perfeitamente exercer o papel de dois, inclusive com a válvula de manutenção (do SP2) aberta. Além dos resultados no perfil da chama e momento terem correspondido.

Com isto, é factível alcançar um melhor controle operacional destes equipamentos, assim como o aumento da qualidade do produto final, objetivo maior de qualquer processo na indústria. Além disso, devido à limitada quantidade de resultados disponíveis, e passíveis de comparação, na presente área, torna-se muito importante à contribuição de resultados neste campo de pesquisas.

#### **5.1 Trabalhos Futuros**

A individualização do Ar Axial na maximização da vazão geral do Ar Primário. Desta forma o soprador 1 ficaria responsável apenas pela tubulação do Ar Axial, e o soprador 2 com os Ares Radial e Central.

Campo de simulação aberto para o problema proposto, sem gastos/ riscos com métodos de "tentativa e erro".

#### **BIBLIOGRAFIA**

AKHTAR, S. S., LOCKWOOD F.C. CFD in the cement industry. *Global Fuels Magazine*, pp 12. Abril, 2006.

ANSYS INC. CFX Introduction. may 2006.

AWOSOPE, O., LOCKWOOD, F.C. Prediction of Combustion and NOx emission characteristics of flameless oxidadtion combustion. *IFRF Combustion Journal*. ISSN 1562-479X, n. 200501. JUNHO, 2005.

BARR, P. V., BRIMACOMBE, J. K., WATKINSON, A. P. (1989) **"A heattransfer model for the rotary kiln: PartI. Pilot kiln Trials"**. *In Metallurgical Transactions* B. v. 20B, p. 391-402.

FUDIHARA, T. J., MORI, M., LAURITO, J., SPITZNER Jr, R. (1996) "Perfis axiais de temperatura e análises da sensitividade paramétrica em um incinerador tipo forno rotativo". *In Revista de Ciência e Tecnologia*. v.12, p. 29-46.

FUELS. Paper presented at the 12th International Cement Conference and Exhibition (AUCBM). Morocco 24-27 October, 2002.

GAMITO, M. O. C. N. Animação de Turbulência em Fluidos Bidimensionais. 1996.

GEORGALLIS, M., NOWAK, P., SALCUDEAN, M., GARTSHORE, I. S. Mathematical Modelling of Lime Kilns. Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canadá.

GRECO, A. Artigo Técnico CFD. Hot News. n.1, maio, 2006.

GRECO, C. (2000) "A burning Advantage". In World Cement. v. 31, n. 12, p 67-70.

HAMIL, N. AEA Tecnology plc. Chemical Engeneering, 1996.

HAN, Xiaohai et al. Detailed modeling of hybrid reburn/SNCR processes for NOx reduction in coal-fired furnaces. *Combustion and Flame*. n. 132, pp 374-386, 2003.

HANSEN, J.P., MACDONALD I.R. "Theory of Simple Liquids". Academic Press Ltd, London, 1976.

HINKEL, M. CFD - a powerful tool. Holcim News. n.2, pp18, 2005.

INGE, L. Rhyming Dynamique des fluides. 1991 PPUR.

JINYU JIAO A, YING ZHENG A, GUOGANG SUNB, JUN WANG. Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone. Separation and Purification Technology 49 (2006) 157–166.

KOLYFETIS, V. E., MARKATOS, N. C. (1996a) "Aerodynamics and coal – Flame modelling in the burning zone of cement rotary kiln, Part 1". ZKG International, n. 1.

KOLYFETIS, V. E., MARKATOS, N. C. (1996b) "Aerodynamics and coal – Flame modelling in the burning zone of cement rotary kiln, Part 2". ZKG International, n. 6.

MASTORAKOS, E., MASSIAS, A., TSAKIROGLOU, C. D., GOUSSIS, D. A., BURGANOS, V. N., PAYATAKES, A. C. (1999) "CFD predictions for cement kilns including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry". Applied Mathematical Modelling. v. 23, p. 55-76.

MILLER, G., PEARCE, A. "Globular Dynamics: A Connected Particle System for Animating Viscous Fluids". *Computers and Graphics*, Vol. 13, No. 3, pp. 305-309, 1989.

POLYANIN, A.D., KUTEPOV, A.M., VYAZMIN, A.V., KAZENIN, D.A. **Hydrodynamics, Mass and Heat Transfer in Chemical Engineering**. Taylor & Francis, London, 2002.

TONNESEN, D. "Modeling Liquids and Solids Using Thermal Particles". *Proceedings Graphics Interface* '91, pp. 255-262, 1991.

VANCOUVER, B.C. **Process Simulations Ltd**. Using Process Modeling to Improve Lime Kiln Operations 2386 East Mall, Suite 206 V6T 1Z3, Canadá.

YOUSIF, S., ABBAS, T., LOCKWOOD, F.C. Mathematical Modelling of Combustion and Cement/Lime Formation Processes in Rotary Kilns Fired with Conventional and Alternative Process Simulations Ltd. Using Process Modeling to Improve Lime Kiln Operations 2386 East Mall, Suite 206Vancouver, B.C., V6T 1Z3, Canadá.