



**JANAÍNA DE ANDRADE SILVA**

**MODELAGEM CFD DE EXPLOSÕES DE PÓS  
EM SILOS**

**LAVRAS - MG**

**2012**

**JANAÍNA DE ANDRADE SILVA**

**MODELAGEM CFD DE EXPLOSÕES DE PÓS EM SILOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas, área de concentração em modelagem de sistemas biológicos, para a obtenção do título de mestre.

Orientador

Dr. Francisco Carlos Gomes

Coorientador

Dr. Jefferson Luiz Gomes Correa

**LAVRAS - MG**

**2012**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Silva, Janaína de Andrade.

Modelagem CFD de explosões de pós em silos / Janaína de  
Andrade Silva. – Lavras : UFLA, 2012.

121 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Francisco Carlos Gomes.

Bibliografia.

1. Fluidodinâmica computacional. 2. Modelagem computacional.  
3. Explosões de pó. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 620.00113

**JANAÍNA DE ANDRADE SILVA**

**MODELAGEM CFD DE EXPLOSÕES DE PÓS EM SILOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas, área de concentração em modelagem de Sistemas Biológicos, para a obtenção do título de mestre.

APROVADA em 16 de julho de 2012.

Dr. Francisco Carlos Gomes UFLA

Dr. José Wallace B. do Nascimento UFCG

Dr. Tadayuki Yanagi Junior UFLA

  
Dr. Francisco Carlos Gomes  
Orientador

Dr. Jefferson Luiz Gomes Correa  
Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2012**

*Ao meu Deus todo poderoso, a minha mãe Vera e ao meu pai Valdemiro que auxiliaram e deram força em todo meu percurso de vida, nunca me deixando desisti;*

*A minha avó Odília que mesmo não estando mais perto de mim, deu-me forças e fé para seguir em frente;*

*Ao meu irmão Jackson que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos me dando a mão;*

*Ao meu orientador Francisco Carlos Gomes, o qual proporcionou-me suporte científico e pessoal para que seguisse com a minha pesquisa.*

*A todos meus amigos que conheci na UFLA, os quais guardarei muitas saudades e gratidão, não podendo deixar de citar Jaqueline, Patrícia, Ana Paula, Daiane e Marcela.*

## **DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A autora expressa seus mais sinceros agradecimentos:

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade de completar com sucesso esta pesquisa através da infraestrutura física e dos recursos disponíveis para tal fim, tais como humanos, financeiros, científicos e tecnológicos.

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais - Fapemig, pelo apoio e fomento a pesquisa executada;

Ao Professor Dr. Francisco Carlos Gomes do Departamento de Engenharia, pela paciência, ajuda e colaboração durante a orientação do trabalho de dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas;

À banca examinadora qualificação de Mestrado, composta pelos professores, Tadayuki Yanagi Junior, Jefferson Luis Gomes Côrrea, Giovanni Rabelo, pela participação, procedentes correções, sábias e oportunas sugestões;

À banca de defesa de mestrado, meu grande agradecimento, pela participação, por todas as correções e sábias sugestões;

Aos meus colegas de estudo, pela convivência. A eles o meu carinho e gratidão;

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas, em especial à Secretária Greice Oliveira, pela ajuda incondicional.

"A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo".

Albert Einstein

## RESUMO

Uma das causas de acidentes em silos se deve às explosões. Estas são geradas pelo acúmulo de pó em suspensão em uma atmosfera confinada, juntamente com fonte de ignição e concentração de oxigênio capaz de propagar uma chama. A explosão pode chegar a proporções inimagináveis, causando danos materiais e perdas de vidas humanas. Na condução de pesquisas sobre explosões de pós são igualmente perigosas, pois existe o risco de vida na maioria dos ensaios. Para minimizar custos e o alto perigo na condução experimental são propostos estudos de modelagem. Um dos métodos para estudo deste fenômeno é a Fluidodinâmica Computacional (CFD), que pode simular com precisão uma explosão de pó. Este trabalho teve por objetivo analisar a mitigação da explosão de pó usando CFD, a partir de condições de contorno utilizando um maior número de variáveis. Foram usados pós de produtos armazenados, tomando como referência a influência do metano liberado pela degradação dos grãos em silos. Após várias simulações, verificou-se que as fontes de ignição relacionadas à temperatura são potencializadas com o aumento da concentração de metano em um silo. Constatou-se também uma diminuição na temperatura mínima de ignição da nuvem de pó, bem como a diminuição da energia mínima de ignição e concentração mínima de pó. O metano, como gás inerte em um silo, afeta diretamente o aumento da probabilidade de explosão de pó, relacionada à liberação de calor gerado pelo metano e seu alto poder de ignição.

Palavras-chave: Explosão de pó. Fluidodinâmica Computacional. Silo.



## **ABSTRACT**

One of the causes of accidents in silos is due to explosions. These are generated by the accumulation of suspended dust in a confined atmosphere, along with an ignition source and oxygen concentration capable of propagating a flame. The explosion can reach unimaginable proportions, causing property damage and loss of life. In conducting research on dust explosions is equally dangerous, as most trials are live threatening. Modeling studies are proposed to minimize costs and the high danger in conducting experimental studies. One of this phenomenon's study methods is Computational Fluid Dynamics (CFD), which can accurately simulate a dust explosion. This study aimed at analyzing the mitigation of dust explosion using CFD, from boundary conditions using a larger number of variables. Dust of stored products were used taking as reference the influence of methane, released by degradation of grain silos. After several simulations it has been found that the ignition sources related to temperature are enhanced with the increase of methane concentration in a silo. A decrease in the minimum ignition temperature of the dust cloud, as well as a decrease of minimum ignition energy and minimum concentration of dust was also detected. Methane, as an inert gas in a silo, directly affects the increase in the probability of dust explosion, related to the release of the heat generated by the methane and its high ignition power.

Keyword: Powder explosion. Computational Fluid Dynamics. Silo.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

Figura 1	Nuvem de pó de 40 g/m <sup>3</sup> tendo uma fonte de calor uma lâmpada de 25 w.....	23
Figura 2	(a) Esquema de uma explosão primária gerando uma onda que espalha a pó. (b) Esquema de uma explosão secundária gerada a partir de uma primária .....	24
Figura 3	Explosão em Qianhuangdao Lihua Starch Co Ltd na China .....	26
Figura 4	Bomba padrão para ensaios de índices de explosão de pó .....	30
Figura 5	Visão 2 D de uma malha hexaédrica .....	41
Figura 6	Visão 2 D Malha não estruturada tetraédrica .....	42
Figura 7	Superfície de controle de volume .....	45
Figura 8	Representação de um elemento da malha.....	47
Figura 9	Elemento Tetraédrico .....	50

### SEGUNDA PARTE

#### ARTIGO 1

Figura 1	Geometria proposta para a simulação CFD : a) Esquema de dimensionamento do silo proposto, em cm. b) Malha tetraédrica não estruturada utilizada para as simulações .....	67
----------	--	----

#### ARTIGO 2

Figura 1	Geometria proposta para a simulação CFD: a) Esquema de dimensionamento do silo proposto em cm b) Malha adota tetraédrica não estruturada utilizada para as simulações .....	85
Figura 2	Esquema de simulação para descobrir temperatura mínima de ignição para uma explosão de pó.....	91
Figura 3.a	Demonstrativo da variação de temperatura em uma simulação utilizando 5% de concentração de metano e o produto grão de soja (inicial) .....	95
Figura 3.b	Demonstrativo da variação de temperatura em uma simulação utilizando 5% de concentração de metano e o produto grão de soja (fase intermediária) .....	95

Figura 3.c Demonstrativo da variação de temperatura em uma simulação utilizando 5% de concentração de metano e o produto grão de soja (fase final) ..... 96

## LISTA DE GRÁFICOS

### PRIMEIRA PARTE

- Gráfico 1 Influência do teor de metano no ar sobre a concentração mínima explosivas de pós de carvão de diferentes conteúdos voláteis. tamanho médio de partícula 40  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$  , 4,5 kj de energia de ignição .....21
- Gráfico 2 Influência do teor de metano no ar sobre a energia de ignição mínima faísca elétrica de um pó de carvão de 31% de conteúdo volátil. Tamanho médio de partícula é de 40  $\mu\text{m}$  .....21

### SEGUNDA PARTE

#### ARTIGO 1

- Gráfico 1 Aumento de temperatura com a variação da concentração de metano em um silo de açúcar com temperatura de explosão. (Porcentagem de metano no ar: 1,79 e-06%) .....73
- Gráfico 2 Relação do aumento de temperatura em um estado de não explosão e um estado de explosão (temperatura inicial 400 °C) .....74
- Gráfico 3 relação entre os resultados da temperatura máxima na atmosfera do silo entre os dados analisados durante a simulação (Tmax), equação linear gerada pelo *software* SisVar (predito eq. 7)..... 76
- Gráfico 4 Representação da equação gerada a partir da temperatura inicial da atmosfera do silo e concentração mínima de ignição com o intuito de determinar o aumento de temperatura na mesma ..... 77

#### ARTIGO 2

- Gráfico 1 Determinação da temperatura mínima de ignição para pós de grãos relacionada com a variação da concentração de metano na atmosfera do silo .....92
- Gráfico 2 Determinação da temperatura mínima de ignição para pós de produtos pulverulentos relacionada com a variação da concentração de metano na atmosfera do silo .....93
- Gráfico 3 Comportamento da regressão predita nas equações 6 com relação a variação da temperatura mínima de ignição para a soja tomada como exemplo .....97
- Gráfico 4 Comportamento predito por regressão visando análise sem intercepto.....98

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO 1

Tabela 1	Propriedades do aço empregado das paredes .....	69
Tabela 2	Valores de entrada para o modelo de simulação CFD .....	70
Tabela 3	Aumento de temperatura de acordo com a variação entre a temperatura inicial do ambiente e concentração de metano .....	71

### ARTIGO 2

Tabela 1	Propriedades do aço empregado das paredes .....	87
Tabela 2	Valores de entrada para o modelo de simulação CFD .....	88
Tabela 3	Propriedades termofísicas dos pós dos produtos .....	89
Tabela 4	Índices de explosividade dos pós analisados.....	89
Tabela 5	Média da variação do aumento de temperatura para os grupos de pós .....	94

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFD	Fluidodinâmica Computacional
NFPA	National Fire Protect Association
EN	English Standard

## LISTA DE SIMBOLOS

$k$	energia cinética turbulenta	$m^2/s^2$
$p$	pressão	Pa.s
Re	número de Reynolds	adimensional
$t$	tempo	s
T	temperatura	K
$u$	velocidade na direção do escoamento	m/s
$\mathbf{v}$	vetor velocidade	m/s
$v$	velocidade	m/s
$V_{med}$	velocidade média	m/s
$\mu$	viscosidade turbulenta	kg/m.s
$\nu$	viscosidade cinemática	$m^2/s$
$\rho$	densidade do fluido (massa)	$kg/m^3$
$\sigma_e$	número de Prandtl	constante
$\sigma_k$	número de Prandtl	constante
$\tau$	tensão cisalhante na parede	$Kg/m.s^2$
$T_t$	tensão de Reynolds	$Kg/m.s^2$
$\square_{eff}$	Coeficiente de difusão efetiva ( $\square_{eff} = \square + \square_r$ )	
$\phi$	escalar	

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b>	
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
2.1	<b>Explosões de pó em unidades de armazenamento</b> .....	18
2.1.1	<b>História</b> .....	25
2.1.2	<b>Propriedade dos produtos armazenados</b> .....	27
2.1.3	<b>Estudo experimental das explosões de pós</b> .....	29
2.1.4	<b>Concentração mínima de pó</b> .....	32
2.1.5	<b>Energia mínima para ignição</b> .....	34
2.1.6	<b>Concentração de oxigênio</b> .....	34
2.2	<b>Formas de prevenção de explosões de pó em silos</b> .....	35
2.3	<b>Fluidodinâmica computacional na determinação explosões de pó</b> .....	37
2.4	<b>Fluidodinâmica computacional</b> .....	39
2.4.1	<b>Pré-processamento</b> .....	43
2.4.2	<b>Processamento</b> .....	44
2.4.2.1	<b>Modelos de turbulência</b> .....	51
2.4.2.2	<b>Modelo de radiação térmica</b> .....	54
2.4.2.3	<b>Pós-processamento</b> .....	56
3	<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....	57
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	58
	<b>SEGUNDA PARTE - ARTIGOS</b> .....	62
	<b>ARTIGO 1 Modelagem de explosões de pó visando análise do aumento de temperatura ocasionada pelo metano em silos de açúcar</b> .....	62
	<b>ARTIGO 2 Análise computacional da variação da temperatura mínima de ignição em explosões de pós em silos</b> .....	81



## 1 INTRODUÇÃO

As unidades armazenadoras são importantes no processamento de grãos, fármacos e até mesmo na indústria têxtil. Cada tipo de silo se difere muito entre si, entretanto todas elas podem ser afetadas pelo risco de explosões de pó.

Estas explosões são consideradas um grande problema, pois além da perda dos produtos, em muitos casos ocorrem perdas de vidas. Estas explosões são geradas pela combinação de pó suspenso no ar, fonte de ignição e teor de oxigênio presente no ar. É importante ressaltar que o acúmulo de pó não é somente perigoso pelo risco de explosões, mas também por afetar a saúde dos trabalhadores que estão em contato com pó excessivo, fato este muito ocorrido na extração de minério.

Neste contexto, uma das inovações ocorridas é aplicação de modelos numéricos, teóricos e computacionais aplicados em simulações de explosões. Na indústria de extração de minérios e carvão mineral já se tem avanços nas pesquisas. A definição de um método para a modelagem de explosões de pó que seja confiável e eficaz se torna um questionamento pertinente à situação atual, pois as previsões concretas de explosões de pó exigem um aprofundamento teórico das condições de contorno envolvidas. Isto por que existem muitas diferenças nos experimentos executados em várias partes do mundo e diferenças entre produtos e unidades de armazenamento. No Brasil, estudos relacionados a explosões de pó ainda são escassos. Com isto, se torna extremamente importante desenvolver pesquisas relacionadas ao tema.

Para facilitar a determinação de fenômenos como explosões de pó, de forma eficaz e mais abrangente, pode-se utilizar técnicas relacionadas à modelagem computacional, a qual proporciona uma análise efetiva e sem a necessidade de se criar artefatos físicos e químicos iguais ao processo em questão. Uma técnica muito eficaz é a utilização de métodos relacionados à

fluidodinâmica computacional, que simula efeitos de vários fenômenos através das equações governantes da dinâmica dos fluídos.

A modelagem computacional de um fenômeno como explosões de pó requer experimentos complexos em uma modelagem convencional. A utilização da fluidodinâmica computacional para predição deste fenômeno se torna uma alternativa eficaz e abrange um maior número de formas e causas de explosões. Neste sentido, objetivou-se modelar computacionalmente explosões de pó através de um banco de dados de ensaios já executados, utilizando ferramentas de fluidodinâmica computacional. A partir desta modelagem viabilizou-se a projeção de um modelo que facilite o entendimento de explosões de pó, juntamente com a inserção do gás inerte metano.

O desenvolvimento de um modelo capaz de prever as explosões de pós de forma mais realística possibilitará com que as empresas minimizem o risco de explosões agregando o modelo gerado com as técnicas procedimentais cabíveis e diminuindo assim o risco de perdas de materiais, estruturas e acidentes com funcionários.

Observando-se a diversidade das explosões pretendeu-se, de forma específica, analisar explosões de pó em silos, analisar o efeito do gás metano em uma explosão de pó e definir um modelo relacional entre explosões de pó e o efeito do gás metano em produtos agrícolas e industriais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Explosões de pó em unidades de armazenamento

O trabalho em unidades de armazenamento pode se tornar muito perigoso, quando não se toma precauções relacionadas ao risco de incêndio ocasionado pelo acúmulo de pós nestas unidades. Este risco afeta tanto os silos farmacêuticos de tecelagem quanto grãos (silos).

De acordo com o Dicionário Aurélio, Explosão (1986) é determinada como:

sf (latexplosione) Is.f. Ação ou efeito de explodir, estourar violentamente: a explosão de uma bomba. / Física. Fenômeno através do qual se solta um gás sob pressão, ou um corpo sólido ou líquido passa ao estado gasoso.

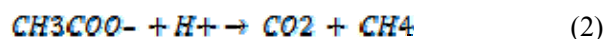
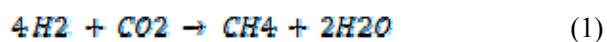
Já na definição acima se observa o efeito físico de uma explosão que a partir de um gás sob pressão ou um material sólido ou líquido tem o efeito de expansão de gases. Esta expansão geralmente gera um sistema que aumenta a pressão no ambiente onde ocorreu a explosão.

Especificamente para explosões de pó qualquer material sólido combustível suspenso no ar pode gerar uma faísca de fogo a partir de uma fonte de ignição, sendo que quanto menor este material for subdivido maior será a velocidade de combustão, pois ocorrerá um aumento na superfície total de contato entre o material e o ar. Explosões de pó são mais fáceis de ocorrer por causa do tamanho de suas partículas, tendo como base de regra que somente partículas menores que 0,1 mm podem entrar em ignição (COUTO, 2004). Entretanto, deve-se dar a devida importância ao tipo de material que forma a nuvem de pó, pois existem materiais que tem pontos de ignição diferentes ou não entram em ignição (ECKHOFF, 2003).

Quando um pó pega fogo, ele queima outras partículas ao seu redor e a chama pode se alastrar por uma nuvem de pó com uma força explosiva. Esta explosão pode ter proporções devastadoras, ocorrendo em cadeia fazendo com que assim ocorra a liberação de vários gases e chamas.

Como qualquer explosão, as explosões de pó ocorrem quando um material combustível é disperso na atmosfera contendo oxigênio suficiente para permitir a combustão e ignição. Este processo de explosão envolve alta taxa de combustão das partículas individuais e aglomeradas que são consumidas ou oxidadas. A combustão do carbono presente em materiais orgânicos produzirá produtos gasosos que ocupam mais espaço que o sólido de origem. Em adição, a expansão da chama resultará na ignição de gases, produzidos pela decomposição de pó.

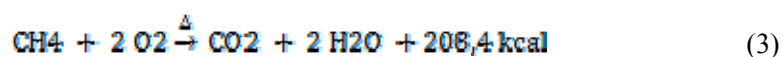
As explosões ocorrem quando, uma superfície de pó de grãos é aquecida até o ponto de liberação de gases de combustão que, com o auxílio de uma fonte de ignição, dá início ao incêndio (ECKHOFF, 2003). A decomposição de grãos pode gerar vapores inflamáveis, que se apresentam quando a umidade do grão é superior a 20%, podem liberar gases como metano e etano (COUTO, 2004). A liberação do gás metano pode acontecer também pela respiração anaeróbica de microrganismos também conhecida como fermentação (DANIELS et al., 1987; METJE; FRENZEL, 2007). As equações 1 e 2 demonstram como ocorre emissão do metano para o ambiente.



Sendo a primeira metanogênese hidrogenotróficas e a segunda metanogênese acetoclástica. Nesta última o metano é produzido pelas bactérias acetotróficas, a partir da redução de ácido acético, e no caso das hidrogenotróficas, a partir do consumo do hidrogênio.

Outra fonte de emissão de metano em uma explosão de pó ocorre em minas de carvão, sendo resultada pelo processo de extração de carvão tanto da superfície como no subsolo da mina. A emissão da superfície é bem menor que a emissão advinda do subsolo, entretanto o tipo de pó, a permeabilidade, parâmetros geológicos e a quantidade de carvão produzido vão interferir na quantidade de metano emitido (KARAKURT; AYDIN; AYDINER, 2012).

O gás metano é altamente explosivo sendo um dos gases de maior efeito para explosões de pó, juntamente com o Oxigênio, alcançando seu ponto de fulgor na temperatura de 188 °C (ANDERSEN et al., 2009; COLLECUTT; HUMPHREY; PROUD, 2009). A equação 3 demonstra a reação química entre o metano e o oxigênio adicionados a uma fonte de ignição.



A partir da equação 3, observa-se que a união do metano advindo das partículas de pó e oxigênio contido, proporciona uma reação de combustão que liberará gás carbônico e água. O gás metano influencia os vários índices relacionados a explosões de pó como pode ser visualizado nos Gráficos 1 e 2.

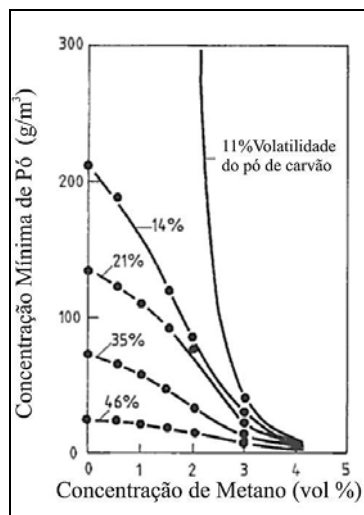


Gráfico 1 Influência do teor de metano no ar sobre a concentração mínima explosiva de pós de carvão de diferentes conteúdos voláteis. Tamanho médio de partícula 40  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$ , 4,5 kJ de energia de ignição  
 Fonte: Eckoff (2003, p. 51)

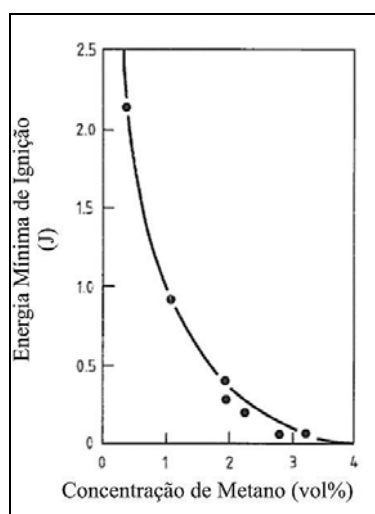


Gráfico 2 Influência do teor de metano no ar sobre a energia de ignição mínima fásica elétrica de um pó de carvão de 31% de conteúdo volátil. Tamanho médio de partícula é de 40  $\mu\text{m}$   
 Fonte: Eckoff (2003, p. 53)

Nos Gráficos 1 e 2 pode-se observar que fatores que causam uma explosão de pó são influenciados pelo aumento de metano na atmosfera, todos eles são decrescidos quando existe o gás metano inerte na atmosfera, com isto aumentando a probabilidade de ocorrência de uma explosão.

Em silos herméticos, por exemplo, os quais existem pouca troca de oxigênio com o exterior e as quantidades de oxigênio são baixas, é difícil ocorrer uma explosão. Entretanto definição do teor de oxigênio que poderá causar uma explosão em alguns casos vai variar de acordo com o tipo de pó e atmosfera estudada.

Em situações de não confinamento como unidades de armazenamento de tecidos, este tipo de explosões podem gerar chamas localizadas. Entretanto, em situações de confinamento que podem ser vistas em silos, por exemplo, a expansão dos efeitos é plausivelmente suficiente para ocorrer uma explosão (FIELD, 1982).

Em unidades de armazenamento de confinamento, o risco de explosão é maior, pois existe uma menor ventilação do local, sendo assim existindo uma maior quantidade de gases inertes e pó acumulado. Por esta razão existe um maior risco de explosões em silos do que em uma tecelagem.

As explosões de pó que são divididas em explosões primárias e secundárias. As explosões primárias ocorrem em um recinto quando a pó aerotransportado pela atmosfera contem oxigênio suficiente para a combustão, estando esta sujeita a uma explosão, as quais são iniciadas por uma fonte de ignição (FIELD, 1982). Este tipo de explosão geralmente ocorre em locais como; moinhos, misturadores, secadores, filtros, silos, dutos de aspiração e tubos para transporte pneumático de pó entre outros.

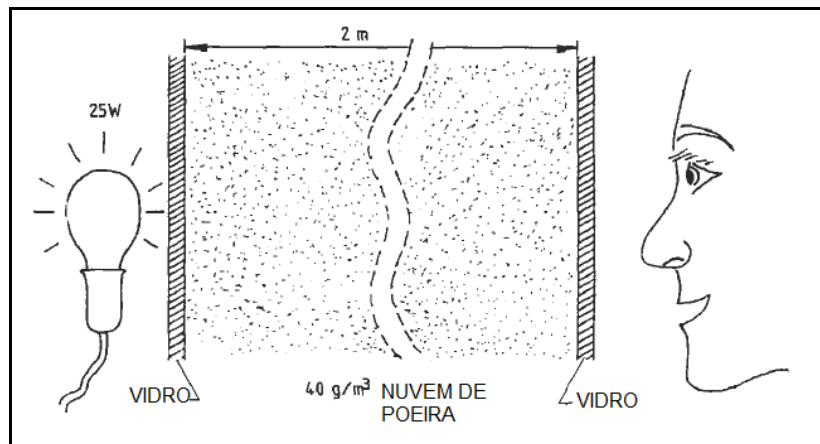


Figura 1 Nuvem de pó de  $40 \text{ g/m}^3$  tendo uma fonte de calor uma lâmpada de 25 w  
Fonte: Eckhoff (2003, p. 9)

A Figura 1 demonstra um esquema geração de uma explosão primária de pó, sendo este tipo de esquema encontrado em muitos equipamentos ou instalações.

As explosões secundárias têm um poder maior, fazendo com que as chamas geradas cheguem a longas distâncias, sendo elas geradas pelo arrastamento das camadas de pó da explosão primária. Geralmente quando se espalha a pó contido em um silo existe um grande risco de acontecer explosões secundárias. A Figura 2 apresenta como a explosão secundária pode ser formada.



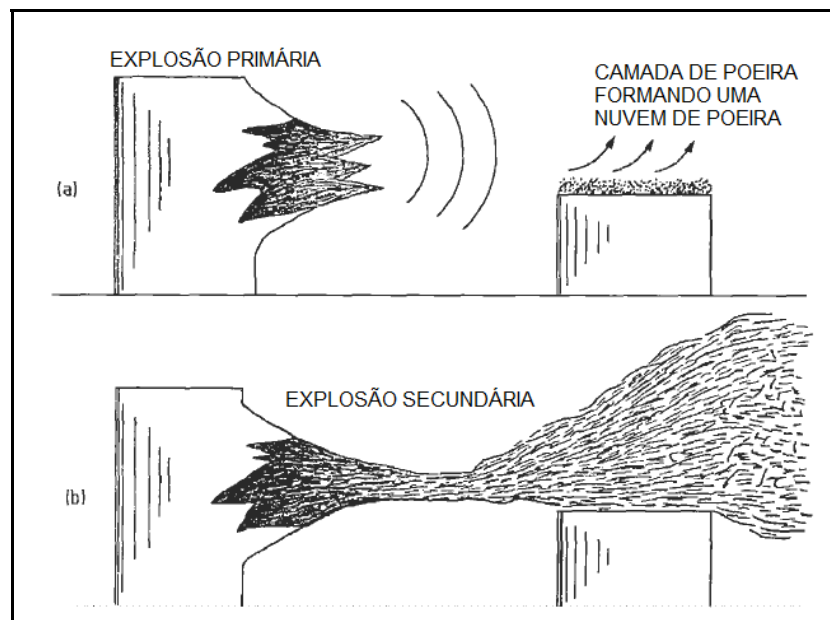


Figura 2 (a) Esquema de uma explosão primária gerando uma onda que espalha a pó. (b) Esquema de uma explosão secundária gerada a partir de uma primária

Fonte: Eckhoff (2003, p. 11)

Ao se prevenir a explosão primária ao mesmo tempo se previne as explosões secundárias, reduzindo o risco de qualquer tipo de explosão ao mínimo. Pois, as nuvens de pó podem ser inflamadas pelos efeitos da fricção mecânica, tais como rolamentos superaquecidos, pedras apanhadas na moagem produzindo faíscas, super aquecimento de lâmpadas revestidas de pó, eletricidade estática, faíscas e chamas, entre outros (FESA, 2008).

Na história ocorreram diversas explosões que causaram perda do material armazenado e vidas. Além do enorme estrago financeiro gerado pela explosão e reconstrução de toda a estrutura destruída.

### 2.1.1 História

Uma dos primeiros registros de uma explosão de pó foi relatada por CountMorozzo's em 1795 que analisa uma explosão em uma fábrica de farinha pertencente ao Senhor Giacomelli em Turin no ano de 1785, sendo esta possivelmente a primeira explosão de pó relatada na história. Os primeiro cientistas a pesquisarem este tipo de explosão foram Faraday e Lyell em 1845 que neste sentido fizeram um trabalho pioneiro na área (ECKHOFF,2003).

Entre 1900 e 1956 ocorreram nos Estados Unidos 1.200 explosões com um total de 640 mortos e 1.700 feridos. As perdas materiais ficaram em mais de 98 milhões de dólares, muitas outras explosões aconteceram a partir deste período tendo como maior fator de ocorrência a falta de informação. Para reduzir o risco de explosão de pó, a NFPA (National Fire Protection Association) estabelece em 1922 o Comitê de Risco de explosões de Pó, com o objetivo de desenvolver recomendações para prevenir explosões de pó (RAVENET, 1992). Mesmo com todas essas ações de prevenção as explosões de pó continuaram com certa intensidade.

Uma explosão muito significativa ocorreu no Continental Grain Complex, Westwego em Louisiana nos Estados Unidos no dia 22 de Dezembro de 1977. Foi a pior explosão deste tipo em termos de fatalidades e dano estrutural ao complexo. Sendo este constituído por 73 silos de concreto de 35 metros de altura e diâmetro de aproximadamente 8 a 10 metros, tendo também secadoras de grãos, laboratórios, sala de controle, administração, entre outros. A primeira explosão ocorreu de manhã e resultou no colapso do complexo de trabalho. Logo após ocorreram explosões subsequentes às quais destruíram a metade dos silos e os outros tiveram rupturas em sua estrutura. A fonte de ignição nesta explosão não foi determinada, mas nestes casos pode ser devido a descargas eletromagnéticas em uma nuvem de pó (FIELD, 1982).

Outra explosão parecida com esta ocorreu em Farmers Export Grain Elevator em Galveston no Texas no dia 27 de Dezembro de 1977, onde 18 pessoas morreram e 22 se feriram. Neste complexo havia 60 silos que foram devastados pela explosão.

No ano de 2001 no Brasil no porto de Paranaguá uma explosão de pó deixou 18 feridos, acontecendo em um dos maiores armazéns de cereais de Paranaguá. A tragédia não teve proporções maiores, pois a explosão ocorreu por volta do meio dia e muitos trabalhadores não estavam no local. Os silos do armazém foram destruídos e além do prejuízo com a perda do depósito, houve consideráveis danos causados relacionados ao porto onde é situado o armazém (EXPLOSÃO..., 2001).

No ano de 2010, ocorreu uma enorme explosão na China tendo 18 pessoas mortas, acontecendo na província de Hebei na empresa Qianhuangdao Lihua Starch Co Ltd, os danos causados por esta explosão podem ser visualizados na Figura 3. O risco de explosões de pó é eminente mesmo nos dias de hoje, apesar da existência de diversos equipamentos que melhorem a dispersão e retirada de pó.



Figura 3 Explosão em Qianhuangdao Lihua Starch Co Ltd na China  
Fonte: Jie (2010)

Na Figura 3 observa-se que as explosões de pó podem ser extremamente violentas e devassadoras, por isto é importante identificar todos os aspectos relacionados a uma explosão deste tipo, como as propriedades dos produtos armazenados.

### **2.1.2 Propriedade dos produtos armazenados**

Existe uma gama de produtos que são armazenados em silos com propriedades distintas que podem causar explosões. Em geral a taxa de combustão de pó depende do fornecimento de oxigênio, da remoção de produtos que geram combustão e reações químicas associadas.

Variações físicas e químicas em um sistema podem ter significantes efeitos para o processo de ignição e explosão. O risco de explosão pode ser influenciado pelo tamanho do reservatório onde a explosão ocorre entre outros fatores. Abaixo são demonstrados alguns fatores que influenciam nas explosões de pó (FIELD, 1982):

- a) o pó é capaz de ser combustível;
- b) o pó suspensa no ar;
- c) tamanho da partícula capaz de propagar uma chama;
- d) a concentração de pó suspensa;
- e) uma fonte de ignição capaz de gerar uma chama que se propague com o contato de pó presente no ar;
- f) quantidade de oxigênio presente no ambiente.

O aumento da taxa máxima de pressão é frequentemente utilizada para medir o risco de explosão, desde a representação da velocidade com que a explosão se desenvolve que é também é um parâmetro usado como método para proteção de explosões (FIELD, 1982).

De acordo com a norma reguladora definida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2007), a severidade da explosão ocorre pelos seguintes motivos:

- a) propriedades físico-químicas do ar;
- b) a concentração do pó na mistura pó/ar;
- c) a homogeneidade e turbulência;
- d) o tipo, energia e a localização da fonte de ignição;
- e) a geometria do recipiente;
- f) a temperatura, pressão, e umidade da mistura explosiva pó/ar.

Verificam-se nestas duas abordagens alguns fatores diferentes como a geometria do recipiente, quantidade de oxigênio e tamanho da partícula do ar. Quanto melhor for verificada, as especificidades do ambiente em que acontece a explosão melhor será a modelagem, entretanto para a obtenção de um modelo matemático ou computacional deve-se analisar amostras mais abrangentes, para que o modelo não se torne tendencioso. Para isto deve-se selecionar as variáveis com maior impacto no fenômeno.

A composição química da nuvem de pó tem grande importância para definir a explosão, pois quando a explosão de pó se propaga, ocorrem reações químicas entre as partículas e o oxigênio na atmosfera. A taxa de oxigênio consumido é diretamente relacionada à natureza química do pó.

O tamanho da partícula de pó é outro fator muito importante para determinar explosões de pó conforme o já exposto anteriormente. Quanto menor

o tamanho da partícula maior o risco de explosão. Isto por que partículas menores se dispersão com maior rapidez, ficam em suspensão por mais tempo e queimam mais rapidamente (ECKHOFF, 2003; FIELD, 1982; HARTMANN, 1948).

Uma baixa possibilidade de explosão pode ser obtida com uma menor concentração de pó suspensa no ar, pois as partículas separadas em uma relativa distância fazem com que a liberação de calor obtida pela oxidação não seja suficiente para ignição.

A umidade esta sempre presente no pó, a quantidade vai depender da natureza hidrofólica do pó, da umidade relativa da atmosfera e da presença da mistura de água. A presença de umidade geralmente é benéfica, pois tende no decaimento da explosividade. Pois as partículas ficam mais aglomeradas e difíceis de dispersar. Não é possível determinar o máximo suficiente para prevenção de explosão, este fator provavelmente varia com a natureza e tamanho da partícula de pó (ECKHOFF, 2003; EUROPEAN STANDARD- EN, 2002; FIELD, 1982).

A umidade presente no pó minimiza os efeitos de explosões e o poder de ignição. Existem muitos estudos para verificar qual o teor de umidade adequado para evitar explosões de pó, entretanto como relatado, isto é uma tarefa muito difícil.

Para possibilitar a previsão de explosões de pó foram criados alguns índices que auxiliam na previsão destas explosões. Estes índices são medidos de forma experimental analisando os vários tipos de pós existentes.

### **2.1.3 Estudo experimental das explosões de Pós**

De acordo com a ABNT ISO 6184:1 (ABNT, 2007), um dos aspectos importantes em se determinar as medidas requeridas para risco de explosões

envolvendo a mistura pó/ar é através dos índices de explosão. Neste sentido, entre vários aspectos relacionados é importante se definir o ambiente em estudo, ou seja, a geometria do ambiente. Sendo não somente necessária para se definir os aspectos relacionados à explosão, mas também para prováveis simulações.

No caso de ensaios experimentais para determinação de níveis de pó a ABNT NBR ISO 6184:1 (ABNT, 2007) recomenda que seja aconselhável se utilizar uma câmara cilíndrica com volume interno de  $1\text{m}^3$  e proporção nominal de 1:1 como pode ser observado na Figura 4.

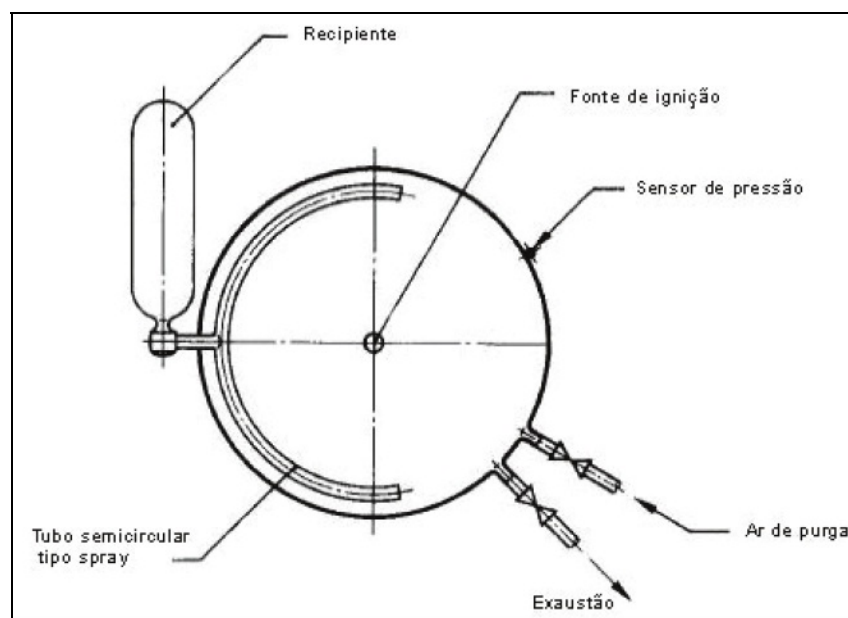


Figura 4 Bomba padrão para ensaios de índices de explosão de pó  
Fonte: ABNT (2007, p. 3)

Em unidades de armamento confinadas como os silos o risco de explosão é muito maior, pois o acúmulo de pó no ar é maior. Neste sentido a melhor forma de se modelar explosões de pó é adotar um ambiente fechado como estudo, como um silo de armazenamento de produtos agrícolas.

De acordo com NFPA 61 para diminuir ao extremo o risco de explosões é necessário que ocorra ventilação mecânica ou natural. Este efeito deve ser capaz de diminuir o nível de pó no ar, por isso os elementos de armazenagem como silos ou tanques devem ter meios para que ocorra o deslocamento do ar de forma eficiente. Entretanto, nem todas as unidades de armazenamento possuem dispositivos que consigam diminuir o teor de pó do ar. Caso ocorra uma explosão, os silos e tanques devem ter aberturas de descargas de explosão, para que as paredes não se rompam. Esta abertura deve resistir à pressão da explosão, entretanto, em silos, por causa da geometria e restrições de construção, isto em muitos casos não ocorre. A probabilidade de a parede ser romper também vai depender do tipo de material que em que o silo foi construído e a gravidade da explosão (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION - NFPA, 2008).

No sentido de projetar unidades de armazenamento melhores, um ponto muito estudado em explosões de pó é determinar a pressão máxima da explosão para que os equipamentos possam suportar a pressão da explosão ao máximo. A EN 14034:1 determina que a pressão máxima de explosão é o valor máximo da pressão dentro do ambiente durante a explosão em uma atmosfera explosiva com pó que pode entrar em ignição, simbolizado por  $p_{max}$ . Para determinar esta pressão é necessária a execução de um experimento que tenha como variáveis a concentração de pó, juntamente com uma fonte ignição suficiente para dar início a uma explosão e sensores que delimitam o valor da pressão na hora da explosão (EN, 2004). Com a diminuição da umidade também ocorre o aumento da pressão da explosão, mas como dito anteriormente a umidade pode ser prejudicial para alguns produtos agrícolas.

Apesar do estudo do  $p_{max}$  ser muito importante para que se projetem equipamentos que sejam menos suscetíveis a explosões, as empresas que fabricam unidades de armazenagem como silos tendem a não se preocuparem com esta questão, pois o melhoramento do tipo de material que a unidade é



construída irá refletir no preço da mesma. Neste sentido se torna extremamente necessário ter outras opções para a diminuição do risco de explosão que não seja relacionado a remodelagens destas unidades.

Outro índice importante para a determinação de explosões de pó é a concentração mínima de pó no ambiente que vai definir em  $\text{g/cm}^3$  a quantidade de pó necessária para que ocorra uma explosão.

#### **2.1.4 Concentração mínima de pó**

O limite mínimo de explosividade que vai determinar a concentração mínima de pó em um ambiente propício a explosão é variável de pó para pó. Muitos dos testes relacionados a determinação do LEL (*LowerExplosiveLimit*) são realizados de forma experimental, os quais consistem em relacionar determinado tipo de pó a um determinado ambiente e verificar o limite de explosividade.

A norma EN 14034-3 determina uma forma padrão de se encontrar o LEL de um tipo de pó, padronizando um vaso como  $1 \text{ m}^3$  e pressão de 20 bar e uma energia de 5 J para iniciar uma explosão. E ainda explica que o LEL diminui de acordo com a diminuição do tamanho da partícula e o mesmo efeito acontece quando se relaciona umidade e o LEL (EN, 2006). O tamanho da partícula pode reduzir o processo de dispersão. Em casos em que este efeito é importante, esta magnitude pode ser avaliada pela determinação do tamanho da distribuição da partícula após a dispersão. O LEL é a quantidade mínima de pó existente em um ambiente para que esta entre em ignição, por isso quanto menor for o tamanho da partícula menor a quantidade de pó no ambiente para que se inicie a ignição, levando em consideração o dito anteriormente que quanto menor o tamanho da partícula maior a probabilidade de explosão.

O tipo de energia de ignição pode afetar no valor do LEL, pois em alguns testes feitos para determinar o LEL de determinado pó, modificando-se a fonte de ignição verificou-se uma diferença nos valores obtidos, por isso aconselha-se comparar os resultados obtidos experimentalmente com o seguinte modelo (GOING; CHATRATHI; CASHDOLLAR, 2000; HARTMAMN, 1948).

$$pq = (T - t)c_2 + (T - t)sc_1 \quad (4)$$

$$p = \frac{(T - t)sc_1}{(T - t)c_2} \quad (5)$$

Em que,

$p$ = Limite mínimo de explosividade para concentração de pó (LEL)

$q$ = calor de combustão por unidade de pó<sup>1</sup>

$T$ =Temperatura de ignição de pó

$t$ =temperatura inicial da nuvem de pó

$s$ = densidade do ar de uma temperatura inicial e pressão

$c_1$ = calor específico do ar de um volume constante

$c_2$ =calor específico do pó

Esta operação é resguardada para condições ideais, pois desconsidera os efeitos do tamanho da partícula entre outros mecanismos em uma explosão de pó. Uma forma de prevenir ao máximo o risco de explosão relacionado ao LEL é determinar que valores 20% abaixo dele são seguros.

---

<sup>1</sup>O calor de combustão é a variação de entalpia (quantidade de calor liberada) pela queima de um mol de substância

### **2.1.5 Energia mínima para ignição**

O MIE, energia mínima para ignição, é considerada o parâmetro central para prever explosões de pós, pois ele indica o limite mínimo de energia capaz de fazer com que uma nuvem de pó entre em ignição (RANDEBERG; ECKHOFF, 2006).

Nuvens de pó de magnésio ou outros pós extremamente inflamáveis podem entrar em ignição apenas com o contato de uma descarga eletromagnética humana tendo este o valor de aproximadamente 10 mJ, levando-se em consideração que a energia de ignição para o magnésio, por exemplo, é de 0,24 mJ, observa-se até mesmo o acúmulo de carga elétrica nos trabalhadores que ficam próximos ao armazenamento deste tipo de material pode desencadear uma explosão (HARTMANN, 1948).

Os valores relacionados ao MIE podem se modificar também quando adicionamos diferentes tipos de gases no ambiente experimental, em sua grande maioria os experimentos são feitos de acordo com a quantidade normal de gases na atmosfera. Mas caso o silo estudado tenha um teor diferente na concentração de gases é necessário que se desenvolvam experimentos que determinem todos os índices neste ambiente.

### **2.1.6 Concentração de oxigênio**

A concentração limite de oxigênio (LOC) diminui de acordo com a diminuição do tamanho da partícula, acontecendo o mesmo na relação concentração limite de oxigênio e umidade. A concentração limite de oxigênio não vai depender somente do tipo de pó mais também do tipo de gás inerte. Quando a concentração de oxigênio diminui, os valores de concentração mínima de pó em um local ficam mais baixos (EN, 2004; MAN; GIBBINS, 2010).

O LOC vai mostrar dependência entre a nuvem de pó e o gás inerte em determinado ambiente. Por isso, os testes para a determinação do LOC devem conter o gás inerte do ambiente real (EBADAT, 2009).

Em ambientes onde a taxa de oxigênio é parecida com o taxa de oxigênio no ar atmosférico, a determinação do LOC não é de grande importância, pois não ocorrerá modificação na probabilidade de explosão (ECKHOFF, 2003; MAN; GIBBINS, 2010).

A verificação do valor de concentração mínima de oxigênio é extremamente difícil, pois, sua validação vai depender do tipo e valor da fonte de ignição e pó, sendo assim muitas pesquisas não utilizam este parâmetro para prever explosões de pó. Principalmente ao se analisar pós agrícolas e pós de minério.

Como o processo de experimentação de explosões é agregado a certo nível de risco, a análise de fenômenos através de modelos computacionais é uma pode ser uma solução para a análise de tais fenômenos. A adoção de uma modelagem computacional ao invés de uma abordagem experimental faz em muitos casos que o projeto se torne mais barato e mais rápido, entretanto na maioria dos casos é necessária a qualificação dos pesquisadores para que possa desenvolver modelos computacionais. Os pacotes computacionais relacionados à fluidodinâmica computacional vêm sendo utilizados em diversas áreas e vem como uma ferramenta de apoio em pesquisas relacionadas a explosões de pó.

## **2.2 Formas de prevenção de explosões de pó em silos**

Uma técnica importante para a minimização de explosões de pó é verificar primeiramente se existem gases inertes no ambiente capazes de proporcionar uma explosão. Por isso é necessário que se analise o teor de oxigênio no ambiente e de gases como o metano que são altamente explosivos.

Pode-se também adotar algumas regras básicas que facilitam no aumento de segurança no ambiente (COUTO, 2004):

- a) proceder à limpeza frequente do local;
- b) evitar fontes de ignição como soldas no local, faíscas, descargas elétricas etc.;
- c) manutenção periódica dos equipamentos para evitar algum tipo de descarga elétrica;
- d) peças girantes devem trabalhar sem pó;
- e) instalar bom sistema de aterramento por causa da eletricidade estática;
- f) nunca varrer o armazém sempre usar o aspirador de pó, para que não ocorra a suspensão de pó;
- g) equipar elevadores, balanças e coletores de alívios contra pressões;
- h) usar sistemas corta-fogo em dutos de transporte, e outros;
- i) manter umidade local alta de acordo com o produto armazenado, pois ambientes secos são mais propícios a explosões.

Outra ferramenta importante para conter explosões de pó são as áreas de ventilação, conhecidas também como diafragmas. Sendo estas responsáveis por minimizar a pressão gerada pelas explosões de pó. Tanto a norma NFPA 68 e EN 14491 se referem a regras para determinar o tamanho desta área de ventilação. As medidas relacionadas à norma NFPA 68 contem determinações de áreas de ventilação menores do que a EN 14491, sendo assim tendo um acréscimo menor ao valor total de um silo (TASCÓN; AGUADO; RAMIRÉZ, 2009).

Muitas das técnicas que minimizam explosões de pó em unidades de armazenamento crescem no valor total da unidade, por isso muitas das vezes estas ferramentas e técnicas não são incorporadas a unidade.

As medidas de ventilação exaustora local nos processos de geração de pó também são importantes aliadas no processo de prevenção de explosões de pó, pois evitam que o pó se disperse no ambiente, formando depósitos indesejáveis sobre estruturas, tubulações e muitos outros locais de difícil acesso, que podem ter um enorme potencial de incêndio e explosões (SÁ, 1997).

Existe a necessidade de que desenvolva técnicas eficazes e baratas para prevenção de explosões de pó em silos, pois assim proporcionara um maior nível de segurança a produtores que não podem pagar por este tipo de acréscimo.

### **2.3 Fluidodinâmica computacional na determinação explosões de pó**

Como a modelagem de explosões de pó é uma tarefa que traz certo nível de risco de acidentes atualmente vem se utilizando técnicas de modelagem computacional para que se possam pesquisar de forma segura todos os fatores relacionados à explosão de pó. Não somente o fator segurança que estimula pesquisadores a utilizarem técnicas como a fluidodinâmica computacional, mas também a variabilidade de informações obtidas através dos *softwares* que trabalham com fluidodinâmica computacional.

Existem algumas pesquisas que utilizam o CFD para determinar as possíveis causas e probabilidade de explosão em um ambiente. Como a verificada no estudo de Wingerden et al. (2011), o qual analisou explosões de pó em moinhos de rolo em seu processo de moagem de biomassa. Trazendo como principal ferramenta para modelagem de pó o *software* DESC do pacote FLACS, o qual foi desenvolvido especialmente para este tipo de explosão.

As modelagens computacionais de explosões de pó são divididas em duas partes, existindo que retratam uma explosão já ocorrida ou sua possibilidade em um determinado local, como as identificadas nos trabalhos de Collecutt, Humphrey e Proud (2009) e Wingerdenetal.(2011) e outras que reafirmam índices ou encontram novas variáveis relacionadas a explosões de pó (SKJOLD et al., 2008; TANIGUCHI et al., 2011).

A maioria dos trabalhos trata de explosões em minas de carvão, por esse ser um risco eminente na maioria das minas. Os trabalhos relacionados à modelar explosões de pó em unidades de armazenamento agrícola são mais difíceis de serem executados, pois diferenças nas propriedades dos produtos armazenados que dificultam esta modelagem.

Um ponto primordial ao se modelar um fenômeno é analisar os modelos numéricos disponíveis para determinado fenômeno. Com a existência de um modelo matemático mecanístico ou empíricos confiáveis, a modelagem se torna mais fácil e com um maior grau de confiabilidade. Entretanto em alguns casos como nas explosões de pó, modelar todas as propriedades relacionadas é extremamente difícil. Não existindo também uma série de modelos que expliquem de forma conclusiva este tipo de explosão, por isso a utilização de ferramentas com a fluidodinâmica computacional que proporcionam uma maior aproximação dos fatos relacionados ao fenômeno se torna extremamente pertinente (KOSINSKI, 2007).

Apesar de haver alguns códigos relacionados a explosões de pó, a obtenção de dados ainda é uma tarefa difícil. Além do mais, uma pesquisa relacionada deve conter aspectos físicos e químicos destas explosões (ECKHOFF, 2009).

Uma das razões para se utilizar CFD para simulações de explosões de pó é que as simulações são frequentemente mais baratas e mais rápidas e permitem que os parâmetros fornecidos sejam facilmente variados em uma larga faixa,

simplificando o projeto de equipamentos e evitando transtornos operacionais. Também podem fornecer informações mais detalhadas do fenômeno.

Em contrapartida os resultados podem não ser totalmente realistas, pois os dados de entrada normalmente são aproximados, as condições iniciais e de contorno representam a situação real muito cruamente, o escoamento pode envolver fenômenos que ainda não são perfeitamente representados pelas atuais teorias científicas e haver limitações dos métodos numéricos.

Para isso o projetista deve estar principalmente focado nas definições dos parâmetros que definem como o fenômeno ocorre.

A utilização da fluidodinâmica computacional para predição de explosões de pó pode proporcionar tanto na mitigação deste tipo de explosão como no desenvolvimento de novos equipamentos e modelos de unidades de armazenamento que possam conter este tipo de explosão.

Apesar de haver a necessidade de novos estudos que facilitem na prevenção de explosões de pó, existem atualmente algumas técnicas que diminuem a possibilidade de explosões em silos.

## **2.4 Fluidodinâmica computacional**

Fluidodinâmica computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics) é um conjunto de ferramentas numéricas e computacionais utilizadas para resolver, visualizar e interpretar soluções relacionadas ao escoamento dos fluidos. É muito utilizada nos campos da física, química, engenharia mecânica, engenharia biomédica, entre outras. Estas ferramentas são estruturadas através de algoritmos numéricos que são capazes de resolver problemas de fluxo de fluidos (SCHNEIDER; MALISKA, 2000).

Este processo de modelagem é dividido em três partes: a primeira é denominada pré-processamento, o qual ocorre à geração da malha numérica, que



é um conjunto de informações numéricas sobre a geometria do problema e também são definidas as condições de contorno.

A segunda etapa acontece à resolução do problema sendo chamada de processamento, no qual acontece a resolução de formulas matemáticas de acordo com o que foi definido no pré-processamento. Após este evento são geradas informações que serão visualizadas na etapa de pós-processamento.

Depois da definição da geometria, uma das tarefas mais complicadas é a construção da malha e o seu aprimoramento. Existem dois tipos diferentes de malhas: estruturadas e não estruturadas (MALISKA, 2004).

As malhas estruturadas são determinadas quando os volumes de controle são obtidos com uma discretização que segue um sistema de coordenadas globais. Os volumes da malha possuem uma lei de construção e de número de vizinhos, fazendo com que seja formada uma numeração ordenada, a fim de se obter matrizes diagonais. Esta técnica possibilita que os *Solvers*<sup>2</sup> sejam mais eficientes para solução do problema. Um exemplo desta indexação pode ser visualizado na Figura 5.

---

<sup>2</sup>*Solver*: Responsável pelo processamento

808	758	808	888	928	988	1
809	755	807	887	919	989	1
808	758	808	888	918	988	1
807	749	809	885	917	987	1
808	748	808	888	918	988	1
805	747	803	889	919	985	1

Figura 5 Visão 2 D de uma malha hexaédrica

O outro tipo de malha é definido como não estruturado, pois são aquelas malhas que não obedecem a nenhuma lei de construção, não seguindo uma ordenação na numeração dos vizinhos. Estas malhas apresentam uma maior adaptabilidade e discretização de geometrias irregulares e complexas. Entretanto, o seu processamento requer maior tempo computacional e algoritmos de resolução do sistema de equações mais elaborados (Figura 6).

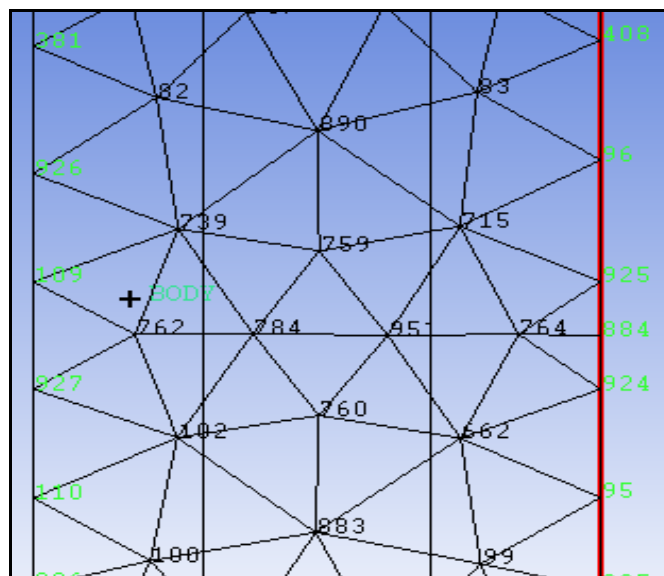


Figura 6 Visão 2 D Malha não estruturada tetraédrica

A partir das Figuras 5 e 6 observa-se a disposição dos índices nos dois tipos de malhas tanto estruturada como não estruturada. Na disposição de índices da malha estruturada a partir de cálculos simples, o *Solver* consegue encontrar o próximo volume. Já na malha estrutura a indexação não é feita através de cálculos, neste caso o *Solver* vai ter que utilizar a recursividade que requer um maior dispêndio computacional para encontrar o nó vizinho.

Atualmente, a utilização da malha não estruturada tetraédricas vem sendo mais utilizada, por existir uma maior facilidade na obtenção de malhas que representam estruturas mais complexas, valendo assim um maior dispêndio computacional.

A definição do problema e de seu ambiente é a primeira ação que deve ser feita ao se modelar um fenômeno utilizando fluidodinâmica computacional. Esta fase é de extrema importância, pois a partir dela todo o processo é definido.

### 2.4.1 Pré-processamento

Na fase de pré-processamento deve-se definir o ambiente do problema que é chamado de geometria, a qual deve conter todos os aspetos relevantes para o fenómeno estudado.

Além da criação da geometria deve-se criar a malha que é construída a partir da geometria escolhida e do poder computacional disponível. Quanto maior o número de nós presentes em uma malha melhor será a acurácia do modelo, pois o problema é discretizado e resolvido dentro de cada nó de cada célula da malha (SCHNEIDER; MALISKA, 2000). Entretanto, malhas muito complexa necessitam de um poder de processamento maior, por isso, a escolha da malha e sua qualidade vai depender do tipo de problema a ser abordado.

Por último, a escolha das condições de contorno deve ser feita respeitando as condições impostas pelo ambiente, como, definir as propriedades do fluido e as condições de entrada e saída e modelos matemáticos governantes. Outro ponto bastante importante é definir o tempo de processamento do problema, que será executado no *Solver*.

Em *softwares* como o ANSYS CFX o desenvolvedor deve definir no pré-processamento se o fenómeno vai ser resolvido como regime transiente (*Transient Flow*) ou estacionário (*Steady -State*).

Simulações de estado estacionário, por definição, são aqueles cujas características não mudam com o tempo e cujas condições são constantes, como por exemplo, a velocidade do fluido. Sendo assim não necessitam de informações em tempo real para descrevê-los.

Simulações transientes exigem informações em tempo real para determinar os intervalos de tempo em que o *Solver* calcula o campo do fluxo. Comportamento transiente pode ser causado por condições de contorno determinadas como turbulentas, as quais se modificam com o decorrer do tempo.

Para problemas estacionários, o ANSYS CFX *SOLVER* aplica um instante temporal falso para resolver o problema. Já em simulações transientes o comportamento dependente do tempo, o qual é especificado através da duração e iteração. Todas estas definições serão solucionadas na etapa de processamento, que geralmente acontece por um *software* dedicado para resoluções das equações governantes do problema definido.

#### **2.4.2 Processamento**

Conforme o citado previamente, o *Solver* é responsável por processar o problema e para a resolução das equações governantes. Primeiramente, o *Solver* aproxima variáveis de fluxo desconhecido por meio de funções simples. Logo depois discretiza por substituição as aproximações de equações de fluxos governantes e subsequentes, executa manipulações matemáticas e chega ao final à resolução destas equações (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1996).

As equações governantes são integradas sobre cada volume de controle, de modo que a quantidade relevante (massa, momentum, energia etc.) é conservada em sentidos distintos para cada volume de controle, o qual é apresentado na Figura 7.

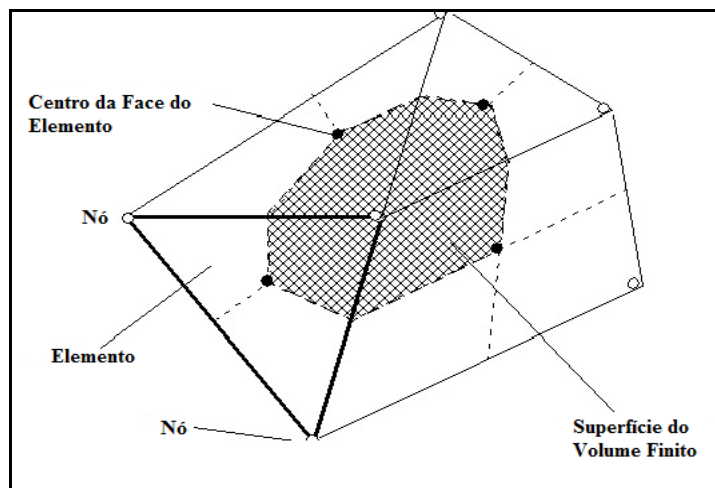


Figura 7 Superfície de controle de volume  
Adaptado: Ansys...(2008)

Deve-se observar na Figura 7 que cada nó está rodeado por um conjunto de superfícies que definem o volume de controle. Todas as variáveis da solução e propriedades do fluido são armazenadas nos nós do elemento. Neste sentido para que se entenda o funcionamento do *Solver* a partir da dinâmica proposta pelo ANSYS CFX 11.0, com o propósito de exemplificação consideram-se as equações de conservação de massa, momento e um escalar passivo<sup>3</sup> em um plano cartesiano (Observados nas equação 6, equação 7 e equação 8).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (7)$$

<sup>3</sup>Escalar passivo: Entende-se por escalar passivo aquele que é transportado pelo escoamento, sem produzir nenhuma alteração sobre o campo de velocidades.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{eff} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right) + S\phi \quad (8)$$

Como parte do processamento do ANSYS CFX 11.0 estas equações são integradas ao longo de um volume de controle e o Teorema de Gauss da Divergência é aplicado para converter algumas integrais de volume para integrais de superfície. Se os volumes de controle não se deformam com o tempo, então as derivadas temporais podem ser movidas para fora das integrais de volume.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho U_j dn_j = 0 \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j = - \int_S P dn_i + \int_S \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{u_i} dV \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho U_j \phi dn_j = \int_S \Gamma_{eff} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\phi dV \quad (11)$$

Em que  $V$  e  $S$ , presentes nas equações 9,10 e 11, denotam o volume e a superfície de regiões de integração, e  $dn_j$  são os componentes diferenciais cartesianos do vetor da superfície externa normal. As integrais do volume representam termos de fonte ou de acumulação, e as integrais de superfície representam a soma dos fluxos.

O primeiro passo para a solução numérica dessas equações diferenciais exatas é criar um sistema acoplado de equações algébricas linearizadas. Isto é feito através da conversão de cada termo em uma forma discreta. Considere, por exemplo, um elemento de malha isolada como visualizado na Figura 8.

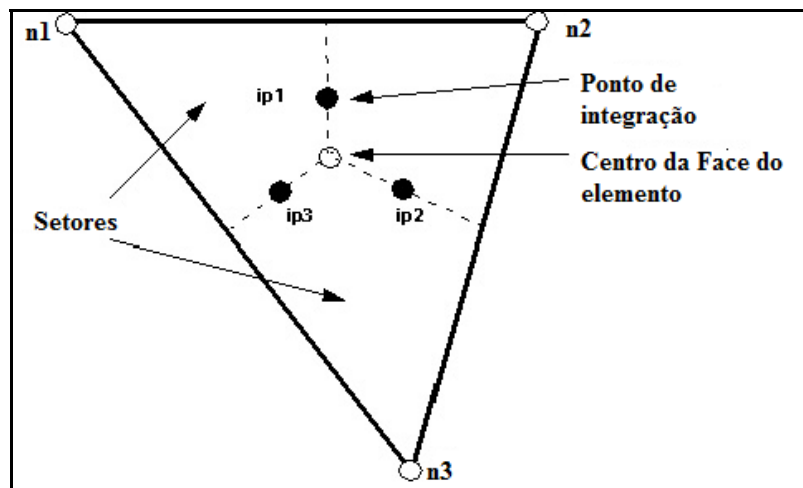


Figura 8 Representação de um elemento da malha  
Adaptado de Ansys... (2008)

Os termos são convertidos em sua forma discreta, aproximando os valores específicos em cada setor e, em seguida, integrando os valores de todos os setores que contribuem para um volume de controle. Termos de fluxo de superfície são convertidos em sua forma discreta pela primeira aproximação nos pontos de integração, observados na Figura 8 como  $ip_n$ . Estes pontos estão localizados no centro de cada segmento da superfície em um elemento 3D em torno do volume de controle.

Muitas aproximações discretas desenvolvidas para CFD são baseadas em aproximações de série de expansão de funções contínuas (como a série de Taylor). A ordem de precisão da aproximação é determinada pelo expoente no espaçamento de malha ou fator de iteração do maior termo na parte truncada da expansão da série.

O aumento da ordem da precisão geralmente implica na redução de erro e no refinamento da malha. Com isto a forma discreta das equações integrantes se apresenta da forma visualizada nas equações 12, 13 e 14.



$$V \left( \frac{\rho - \rho^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (12)$$

$$V \left( \frac{\rho U_i - \rho^o U_i^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (\rho \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left( U_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S}_{U_i} V \quad (13)$$

$$V \left( \frac{\rho \phi - \rho^o \phi^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip}^* \phi_{ip} = \sum_{ip} \left( \Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S}_{\phi} V \quad (14)$$

Em que  $V$  é o volume de controle,  $\Delta t$  representa a iteração,  $\Delta n_j$  é o vetor superfície discreta exterior, o  $ip$  subscrito denota a avaliação em um ponto de integração e os somatórios estão sobre todos os pontos de integração do controle de volume. Nota-se que o esquema de BackwardEuler de Primeira Ordem foi assumido nesta equação, apesar de um esquema de segunda ordem também estar disponível. A letra “o” escrita de forma sobrescrita e precedida de uma letra grega ou símbolo refere-se aos níveis precedentes. O fluxo de massa discreta através de uma superfície do volume de controle é denotado por  $m_{ip}^*$ :

$$m_{ip}^* = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} \quad (15)$$

Os campos de solução são armazenados nos nós da malha. No entanto, vários termos nas equações requerem soluções ou gradientes de solução para ser aproximada em pontos de integração. Funções em forma de elementos finitos são, conseqüentemente, utilizadas para avaliar a solução e sua variação dentro de elementos da malha. Uma variável  $\phi$  varia dentro de um elemento da seguinte forma:

$$\phi = \sum_{i=1}^{N_{nodes}} N_i \phi_i \quad (16)$$

Em que  $N_i$  é a função de forma para o nó  $i$  e  $\phi_i$  é o valor  $\phi$  no nó  $i$ . O somatório é sobre todos os nós de um elemento. Propriedades-chave das funções de forma incluem

$$\sum_{i=1}^{N_{nodes}} N_i = 1 \quad (17)$$

No nó  $j$ ,  $N_i = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$

As funções de forma usadas no ANSYS/CFX são lineares em termos de coordenadas paramétricas. Elas são usadas para calcular diferentes quantidades geométricas, bem como, incluir as coordenadas *em* vetores de superfície. Isto é possível porque a Equação 15 suporta um plano de coordenadas:

$$y = \sum_{i=1}^{N_{nodes}} N_i y_i \quad (18)$$

Neste sentido as funções de forma trilineares para cada elemento da malha suportado podem ser visualizadas na Figura 9 e equação 19.

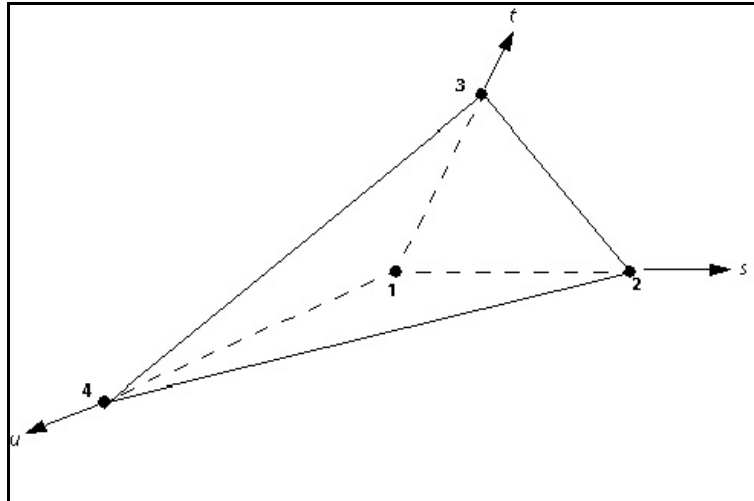


Figura 9 Elemento Tetraédrico  
Fonte: Ansys...(2008)

$$N_1(s, t, u) = 1 - s - t - u$$

$$N_2(s, t, u) = s$$

$$N_3(s, t, u) = t$$

$$N_4(s, t, u) = u$$

(19)

A linearização de equações pode ser aplicada no método dos volumes finitos e todos os elementos de um domínio são discretizados por equações de conservação. Os sistemas de equações podem ser descrito pela equação 20.

$$\sum_{nb} a_i^{nb} \phi_i^{nb} = b_i \quad (20)$$

Sendo que  $i$  identifica o número do volume de controle ou nó em questão e  $nb$  representa o vizinho. Cada nó pode ter um número do vizinho, sendo este método aplicado em malhas estruturadas e não estruturadas.

O processamento é uma etapa extremamente importante, pois é nesta fase que vão ser resolvidas as equações e os resultados gerados. Entretanto, esta fase não depende tanto do usuário como na fase de pré-processamento, pois todas as propriedades já foram definidas. Sendo requerido um grande poder computacional e geralmente o usuário não tem acesso ao código que é usado para resolver o problema, isto principalmente em *softwares* comerciais.

Além de conhecer como funciona o processo de discretização é importante conhecer os modelos disponibilizados por cada *software*, e que em muitas das vezes não são conhecidos por desenvolvedores que não são habituados à modelagem de fenômenos de escoamento dos fluidos, por isso deve-se primeiramente identificar os modelos e as características pertinentes de cada qual.

#### **2.4.2.1 Modelos de turbulência**

Os principais modelos que existem no ANSYS CFX são o modelo laminar, Transporte de tensão de cisalhamento, BSL Reynolds Stress, SSG, Reynolds Stress e o K- $\epsilon$ .

O fluxo laminar é o tipo de fluxo onde existe o mínimo de agitação das várias camadas do fluido, sendo utilizado geralmente para escoamentos como fluxos de água em uma tubulação, tendo como base de regra o número de Reynolds menor que 2100 ( INCROPERA et al., 2006).

Já os demais modelos são utilizados para escoamento turbulento sendo o BSL Reynolds Stress e o SSG Reynolds Stress utilizados geralmente para fluxos

com mudanças bruscas na taxa de deformação média, fluxos secundários entre outros.

O modelo transporte de tensão de cisalhamento (SST) é recomendado para simulações de alta precisão na camada limite. Resolvendo problemas como de turbulência e a previsão exata de separação de fluxo a partir de uma superfície lisa, vistos em modelagem de aerodinâmica em aviões (ANSYS...,2008).

O modelo K-épsilon é um dos modelos de turbulência mais comuns. Embora ele só não funcionasse bem em casos de grandes gradientes de pressão, este modelo introduz duas novas variáveis no sistema de equações. A equação de continuidade fica determinada como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (21)$$

Sendo a equação de momento referenciada como:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U})^t + \mathbf{B} \quad (22)$$

O qual  $\mathbf{B}$  é a soma de forças de corpo,  $\mu_{eff}$  é a contabilidade viscosidade efetiva para a turbulência, e  $p'$  é a pressão. Já o modelo de equação de zero<sup>4</sup>, é baseado no conceito de viscosidade turbulenta, de modo que:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (23)$$

---

<sup>4</sup>Equação Zero refere-se ao fato de que nenhuma das equações adicionais de transporte, além de equações de massa, energia e impulso são necessárias no problema, também conhecida como equação algébrica somente.

Em que  $\mu_t$  é a viscosidade de turbulência. O modelo  $k-\epsilon$  assume que a viscosidade de turbulência está ligada à energia cinética e dissipação de turbulência através da relação dissipação

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (24)$$

Sendo  $C_\mu$  constante:  $C_\mu = 0.09$

Os valores  $k$  e  $\epsilon$  vêm diretamente das equações diferenciais de transporte para a energia cinética turbulenta e taxa de turbulência

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (25)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \epsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\rho}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (26)$$

Sendo  $\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$  constantes

$$\sigma_k = 1$$

$$\sigma_\epsilon = 1.3$$

$$C_{\epsilon 1} = 1.44$$

$$C_{\epsilon 2} = 1.92$$

$P_k$  é a produção de turbulência devido às forças viscosas e flutuabilidade, o que é modelada usando:

$$P_k = \mu_t \nabla \mathbf{U} \cdot (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{U} (3\mu \nabla \cdot \mathbf{U} + \rho k) + P_{kb} \quad (27)$$

Para o fluxo incompressível,  $\nabla \cdot \mathbf{U}$  é pequeno, já para fluxos compressíveis  $\nabla \cdot \mathbf{U}$  é grande em regiões com divergência de alta velocidade.

Além de o desenvolvedor ter que escolher qual o tipo de modelo de turbulência que é aplicado ao seu problema ele em muitos casos deve escolher o modelo de radiação termal que seu problema se aplica.

#### 2.4.2.2 Modelo de radiação térmica

O ANSYS CFX 11.0 disponibiliza quatro tipos de modelos de radiação termal para serem aplicados na modelagem de um fenômeno. O primeiro apresentado é o modelo de aproximação de Rosseland, o qual assume que a mídia é opticamente espessa e que a energia radiante emitida por outros locais no domínio, sendo rapidamente absorvidos e não tendo nenhuma influência no transporte local. Isto implica que a aproximação não é válida para análises próximas as paredes. Sendo este modelo geralmente aplicado para espessuras ópticas<sup>5</sup> maiores que cinco (ANSYS...,2008).

Outro modelo muito aplicado é o de transferência discreta, o qual é baseado na detecção do domínio por vários raios partindo da superfície delimitadora. Este modelo depende da discretização da equação de transferência ao longo dos raios.

---

<sup>5</sup>A espessura óptica indica a quantidade de material absorvedor e espalhador opticamente ativos encontrados no caminho atravessado pelo feixe de radiação, sendo adimensional Ótica ou óptica são corretas, mas a grafia escolhida pela autora é típica do português de Portugal. Sugiro a reescrita para a forma brasileira (ótica)

O método de Monte Carlo é bem parecido com o modelo de transferência discreta. Ele simula os processos subjacentes que regem o sistema de interesse, ou seja, as interações físicas entre fótons e seu ambiente.

O modelo P1 é válido para uma espessura óptica maior que um, sendo utilizada para demonstrar a radiação em queimas de combustível por exemplo.

A forma completa da equação de energia radiante e a derivação do Modelo P1 para a radiação são dadas em Sazhinet al.(1996) o qual  $T_r$  é a temperatura radiante e é definida pela integração da densidade radiante  $i$  de todas as direções.

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} i d\Omega = \langle i \rangle = n^2 \sigma T_r^4 \quad (28)$$

Por analogia, o fluxo de calor radiante no limite de difusão advém do fluxo de energia radiante, sendo definido como:

$$q_r = \frac{4\sigma n^2}{3K_e} \nabla T_r^4 \quad (29)$$

O limite de difusão existe se a absorção efetiva,  $K_e$ , é grande. O termo  $K_e$  é utilizado na interação das partículas e fluidos com a radiação. A equação resultante da substituição dos termos acima na equação de transporte de radiação, integrada sobre todos os comprimentos de onda é.

$$-\nabla \cdot \left( \frac{1}{3K_e} \nabla T_r^4 \right) = K_a (T^4 - T_r^4) \quad (30)$$

O qual  $T$  é a temperatura do fluido em unidades absolutas. A taxa líquida de transferência de energia do líquido para a fase radiante é



$$q_r = 4\pi^2 \sigma K_a (T^4 - T_r^4) \quad (31)$$

Este termo é subtraído da equação de energia térmica para o fluido.

Depois de todas as características referentes ao problema serem selecionadas e estas serem processadas pelo *Solver* deve-se passar para terceira etapa que como mencionado é denominada pós-processamento, a qual todos os resultados poderão ser visualizados.

#### 2.4.2.3 Pós-processamento

Nesta etapa podem ser visualizados gráficos e valores de todas as variáveis envolvidas. Em alguns *softwares* são disponibilizados a criação de animações, gráficos e tabelas com os resultados obtidos.

A fluidodinâmica computacional é um método muito poderoso se bem utilizado, podendo principalmente ser utilizada para análise de fenômenos que envolvem explosões evitando com isto o risco de acidentes e a obtenção de aparatos físicos que simulem o problema.

Um exemplo de explosão difícil de ser estudado são as explosões de pó que acarretam grandes perdas na infraestrutura do silo ou na indústria. Estes tipos de explosões requerem um maior aprofundamento em pesquisas e ações melhores de prevenção, pois, a maioria dos incêndios causados pelo acúmulo de pó são classificados erroneamente como outro tipo de explosão.

Outro fator complicador é o número insuficiente de modelos matemáticos que explicam as explosões de pó, entretanto ao se modelar este tipo de explosão deve-se considerar tanto os aspectos físicos e químicos desta explosão (ECKHOFF,2009). Por isso, ao se iniciar o estudo de explosão de pó primeiramente é necessário entender como o sistema desta explosão ocorre.

### 3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Explosões de pó acontecem com muita facilidade, fazendo com que ocorra perda de material e pessoas, apesar de vários estudos relacionados a este tipo de explosão ela ainda se apresenta de forma complexa, contendo várias variáveis que interferem no processo. A criação de um modelo que consiga abranger este tipo de explosão de diferentes ângulos se torna uma questão pertinente ao presente ambiente tecnológico. Uma ferramenta que auxilia na tradução dos diversos comportamentos de uma explosão e que vem sendo utilizada é a fluidodinâmica computacional, sendo esta capaz de analisar diferentes aspectos relacionados às explosões principalmente em minas de carvão.

Com a utilização da fluidodinâmica pode-se, por exemplo, verificar a influência de determinados gases na atmosfera da unidade e trabalhar com produtos diversificados principalmente produtos agrícolas que apresentam índices elevados de periculosidade. A importância da modelagem se verifica pela diminuição de custos e riscos de ensaios em plantas industriais.

## REFERÊNCIAS

ANDERSEN, J. et al. Global combustion mechanisms for use in CFD modeling under oxy-fuel conditions. **Energy & Fuels**, Washington, v. 23, p. 1379-1389, Jan. 2009.

ANSYS CFX 11:manual Ansys *CFX*. Ontario, 2008. Software.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6184-1**: sistema de proteção contra explosão:parte 1,determinação dos índices de explosão dos pós combustíveis no ar.Rio de Janeiro, 2007.14 p.

COLLECUTT,G.; HUMPHREY, D.; PROUD, D.CFD simulation of underground coal dust explosionsand active explosion barriers.In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CFD IN THE MINERALS AND PROCESS INDUSTRIES, 17.,2009, Melbourne. **Proceedings...**Melbourne: CSIRO, 2009. Disponível em:  
<[http://www.cfd.com.au/cfd\\_conf09/PDFs/230COL.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_conf09/PDFs/230COL.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2012.

COUTO, J. L. V.**Risco no trabalho em silos e armazéns**. Seropédica: UFRRJ, 2004. Disponível em:<<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/silo.htm>>.Acessoem:1 out. 2011.

DANIELS,L. et al. Bacterial methanogenesis and growth from CO<sub>2</sub> with elemental iron as the sole source of electrons.**Science Magazine**, Washington, v. 237, n. 4814, p. 509-511, July 1987.

EBADAT, V. Testing to assess explosion characteristics of dust clouds.In: SYMPOSIUM ON DUST EXPLOSION HAZARD RECOGNITION AND CONTROL,10., 2009, Baltimore. **Proceedings...** Baltimore: NFPA, 2009.Disponível em:  
<[http://www.nfpa.org/assets/files//PDF/Foundation%20proceedings/testing\\_to\\_a\\_ssess\\_explosion\\_characteristics\\_of\\_dust\\_clouds\\_.pdf](http://www.nfpa.org/assets/files//PDF/Foundation%20proceedings/testing_to_a_ssess_explosion_characteristics_of_dust_clouds_.pdf)>. Acessoem: 11 out. 2011.

ECKHOFF, R. K. **Dust explosions in the process industries**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Elsevier Science, 2003. 754 p.

\_\_\_\_\_. Dust explosion prevention and mitigation, status and developments in basic knowledge and in practical application essential tool in assessing and controlling. **International Journal of Chemical Engineering**, Cairo, v. 2009, p.1-12, 2009. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/ijce/2009/569825/cta/>>. Acesso em: 23 mar. 2011.

EXPLOÇÃO de silo no porto de Paranaguá fere 18. **Jornal Estado de São Paulo**, São Paulo, 16 nov. 2001. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/arquivo/nacional/2001/not20011116p34191.htm>>. Acesso em: 27 fev. 2011.

EUROPEAN STANDARD. **BS EN 13821**:potentially explosive atmospheres: explosion prevention and protection:determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures. London: British Standards Institution, 2002. 20 p.

\_\_\_\_\_. **BS EN 14034-1**:determination of explosion characteristics of dust clouds:part 1,determination of the maximum explosion pressure  $p_{max}$  of dust clouds. London: British Standards Institution, 2004. 30 p.

\_\_\_\_\_. **BS EN 14034-3**:determination of explosion characteristics of dust clouds:part 3,determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds. London: British Standards Institution, 2006. 30 p.

EXPLOÇÃO. In: FERREIRA, A. B.H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. Disponível em: <<http://www.dicionarioaurelio.com/>>. Acesso em: 23 mar. 2011.

FIELD, P. **Dust explosions**. Amsterdam: Elsevier Science, 1982. 183 p.

FIRE & EMERGENCY SERVICES AUTHORITY OF WESTERN AUSTRALIA. **Dust explosions**. Melbourne, 2008. 2p.

GOING, J.E.; CHATRATHI, K.; CASHDOLLAR, K. L. Flammability limit measurements for dusts in 20-L and 1-m<sup>3</sup> vessels. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, New York, v.13, n.3/5, p. 209-219, May 2000.

HARTMANN, I. Recent research on explosibility of dust dispersions. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v.40, n.4, p.752-758, Apr. 1948.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: Wiley, 2006. 1023 p.

JIE, Y. **Dust blast at workshop kills 19**. Disponível em: <<http://www.cdeclips.com/en/nation/fullstory.html?id=40070>>. Acesso em: 13 nov. 2010.

KARAKURT, I.; AYDIN, G.; AYDINER, K. Sources and mitigation of methane emissions by sectors: a critical review. **Renewable Energy**, Oxford, v. 39, n. 1, p. 40-48, Mar. 2012.

KOSINSKI, P. Numerical investigation of explosion suppression by inert particles in long ducts. **AIP Conference Proceeding**, Melville, v. 936, p. 643-647, Sept. 2007.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 472p.

MAN, C.K.; GIBBINS, J.R. Factors affecting coal particle ignition under oxyfuel combustion atmospheres. **Fuel**, London, v.90, n.1, p. 294-304, Sept. 2010.

METJE, M.; FRENZEL, P. Methanogenesis and methanogenic pathways in a peat from subarctic permafrost. **Environmental Microbiology**, Wageningen, v. 9, n. 4, p. 954-964, Jan. 2007.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 61 standard for the prevention of fires and dust explosions in agricultural and food processing facilities**. Quincy, 2008. 38 p.

RANDEBERG, E.; ECKHOFF, R. K. Measurement of minimum ignition energies of dust clouds in the <1 mJ region. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 140, n.1/2, p.237-244, July 2006.

RAVENET, J. **Silos**. Barcelona: Láser Fotocomposición, 1992. 508p.

SÁ, A. Risco de explosão: produtos em forma de pó representam perigo nas atividades industriais. **Revista Proteção**, Novo Hamburgo, v.61, 1997.

Disponível em:

<<http://www.safetyguide.com.br/artigos/perigexpl.htm>>. Acesso em: 6 mar. 2011.

SAZHIN, S.S. et al. The P-1 model for thermal radiation transfer:

advantages and limitations. **Fuel**, London, v.75, n. 3, p.289-294, Sept. 1996.

SCHNEIDER, F. A.; MALISKA, C. R. Uma formulação em volumes finitos usando malhas não-estruturadas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 8., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ENCIT, 2000. Disponível em:

<[http://www.sinmec.ufsc.br/sinmec/site/iframe/publicacoes/artigos/novos\\_00s/2000\\_unstructured\\_and\\_hybrid\\_grids.pdf](http://www.sinmec.ufsc.br/sinmec/site/iframe/publicacoes/artigos/novos_00s/2000_unstructured_and_hybrid_grids.pdf)>. Acesso em: 15 dez. 2011.

SKJOLD, T. et al. Simulating dust explosions with the first version of

desc. **Process Safety and Environmental Protection**, Rugby, v. 83, n. 2, p. 151-160, Mar. 2008.

TANIGUCHI, M. et al. Application of lean flammability limit study and large eddy simulation to burner development for an oxy-fuel combustion

system. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, New York, v. 5, n. 1, p. 111-119, July 2011.

TASCÓN, A.; AGUADO, P. J.; RAMIRÉZ, A. Dust explosion venting in silos: a comparison of standards NFPA 68 and EN 14491. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, New York, v.22, p. 204-209, Mar.2009.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. London: Longman, 1996. 270 p.

WINGERDEN, K. V. et al. A full-scale experimental and modeling investigation of dust explosions in a roller mill. **Process Safety Progress**, New York, v. 30, n.1, p.87-96, Mar. 2011.

**SEGUNDA PARTE - ARTIGOS**

**ARTIGO 1**

**Modelagem de explosões de pó visando análise do aumento de temperatura ocasionada pelo metano em silos de açúcar**

## MODELAGEM DE EXPLOSÕES DE PÓ ATRAVÉS DA ANÁLISE DO AUMENTO DE TEMPERATURA OCACIONADA PELO METANO EM SILOS DE AÇÚCAR

J. A. SILVA<sup>a</sup>, F. C. GOMES<sup>a</sup>, J. L. G. CORRÊA<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Brasil

<sup>b</sup> Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Lavras, Brasil.

### Resumo

A análise de uma explosão de pó é bastante complexa, pois alterações na atmosfera ou na composição dos produtos estudados modificam completamente os índices de explosividade. O gás metano, por exemplo, na condição de gás inerte proporciona este tipo de modificação, por ser um gás altamente explosivo e provedor de liberação de calor, sendo um dos gases principais no efeito estufa. A análise da intervenção do metano em um silo não é somente importante na verificação da explosão de pó, mas também visualização do aumento de temperatura no silo, pois sua presença e aumento indicam a deterioração da massa armazenada. O objetivo com este trabalho foi verificar a influência do gás metano em silo de açúcar, analisando situações as quais ocorrem explosões de pó ou apenas o aumento de temperatura na unidade, utilizando para este propósito a modelagem computacional CFD. As condições testadas foram à variação da concentração de metano, na atmosfera de um silo, variando de 0,05 a 5% em volume e sua relação com o aumento de temperatura. Analisou-se a condição crítica propensa a explosão, tomando como referência temperatura mínima de ignição do açúcar, e a outra na condição padrão de armazenamento com variação de temperatura de 20 a 40 °C. Verificou-se que o metano proporcionou um aumento substancial de temperatura na atmosfera do silo, mostrando divergências nas duas condições testadas. A partir desta situação modelos de regressão linear foram testados, obteve-se o grau de determinação  $R^2$  com os valores de 0,99671. Considerando os aspectos físicos do fenômeno o melhor modelo foi adotado tomando como fatores a temperatura inicial e a concentração de metano.

Palavra-chave: Explosão de pó, Modelagem computacional, CFD, Silo.



## 1 INTRODUÇÃO

Explosões de pó são perigosas em ambientes de confinamento como em silos, sendo estas ocasionadas por uma determinada quantidade de pó suspensa no ar, fonte de ignição e teor de oxigênio presente no ambiente. Porém, os valores de cada uma dessas variáveis vão depender do tipo do produto estudado e do ambiente em questão (ECKHOFF, 2009).

O risco de explosão principalmente em unidades de armazenamento de produtos agrícolas acontece com maior periodicidade, pois estes produtos são explosivos e o processo de carregamento, descarregamento, moagem, entre outros pode gerar faíscas ou chamas que iniciam uma explosão de pó (RAMÍREZ; TORRENT; AGUADO, 2009). A severidade de explosões de pó de origem agrícola chega a criar incêndios e destruir por completo toda a estrutura armazenadora, um exemplo desta intensidade foi visto no incêndio na Imperial Sugar Refinery, EUA, ocorrido em 2008 (VORDERBRUEGGEN, 2011).

Os riscos no processo de armazenamento juntamente com a ação de bactérias, fungos podem aumentar a possibilidade da ocorrência de explosões, justamente pelo efeito do metano liberado pelas bactérias metanogênicas. O gás metano é um dos gases inertes mais expressivos nas explosões de pó, por ser explosivo (BAI et al., 2011).

A liberação de metano em uma atmosfera de armazenamento de açúcar acontece pela fermentação do mesmo, sendo liberado através da hidrólise e acidogênese, sendo a última de maior proporção. Também podendo ocorrer por biopolímeros que através de sua degradação produzem açúcares e aminoácidos que serão fermentados pela ação microbiana liberando com isto metano (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 1997).

Neste sentido, o estudo deste tipo de explosão se torna complexo, pois a adição de uma pequena porcentagem deste gás combustível na atmosfera do silo pode influenciar no valor da concentração mínima de pó capaz de entrar em ignição, da energia mínima de ignição e em outras variáveis (BAI et al., 2011; ECKHOFF, 2003).

A utilização de técnicas de simulação na análise deste fenômeno se torna cada vez mais compreensível, por seu menor custo e maior segurança, evitando eventuais riscos de acidentes. A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma das técnicas mais utilizadas para a predição de fenômenos de transferência de momentum, calor e massa (HONG et al.,2010; SKJOLD et al., 2008;VERSTEEG; MALALASEKERA,1996). Tem sido utilizada com sucesso em predições de simulação de explosões de pó no armazenamento de carvão mineral (ANDERSEN et al.,2009; COLLECUTT; HUMPHREY; PROUD, 2009; ECKHOFF, 2009; TANIGUCHI et al.,2011). O uso desta modelagem se deve a variedade de simulação disponível e o número de variáveis que podem ser analisadas. Entretanto, o uso da mesma para explosões de pó ainda não é totalmente consolidado e requer alguns avanços e outras formas de abordagem do que as vistas até o momento. Estas limitações se devem à falta de equações que definam todos os aspectos do fenômeno (ECKHOFF, 2009) e também por defasagem nos *softwares* que em muitos casos não permitem uma análise de todas as propriedades dos produtos envolvidos em uma explosão.

A tentativa de prever explosões de pó juntamente com a interferência da concentração de metano no ambiente já foi elaborada (COLLECUTT; HUMPHREY; PROUD, 2009), entretanto nesta oportunidade foi definido o carvão como produto estudado, devido à alta incidência de metano em minas de carvão.

O objetivo da autora com o presente trabalho foi à identificação da concentração de metano capaz de alterar a temperatura ambiente de silo de

açúcar e o aumento de temperatura gradual relacionado com diferentes concentrações de metano na atmosfera desta unidade.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O produto estudado foi o açúcar considerado um produto inflamável, com as seguintes propriedades: tamanho de partícula de aproximadamente 32  $\mu\text{m}$ , concentração mínima de ignição de aproximadamente 100  $\text{g}/\text{m}^3$  e calor específico 280  $\text{J.Kg}/\text{K}$ .

Para a simulação definiu-se um protótipo de silo cilíndrico de tremonha cônica de aço galvanizado. A escolha deste material se deve a sua importância na construção de silos no setor industrial. O volume considerado foi de 1,0  $\text{m}^3$  como o proposto na norma ABNT ISO 6184:1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2007). A Figura 1 ilustra o protótipo bem como a malha adotada, tetraédrica e não estruturada, construída com o auxílio do *software* ANSYS Workbench<sup>®</sup>.

A utilização de uma malha não estruturada se deve a facilidade de criação da mesma e do melhor ajustamento à geometria estudada. O número máximo de nós é de 7.983 e o número de elementos de 15.370.

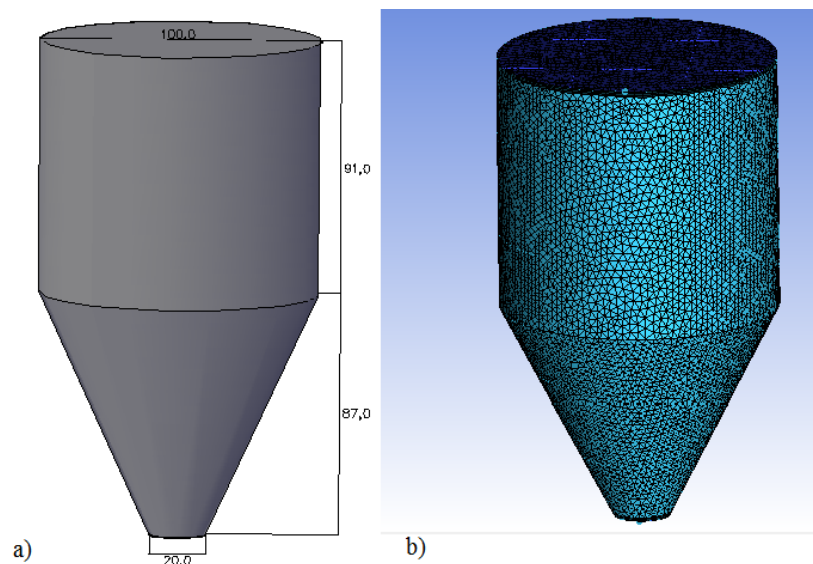


Figura 1 Geometria proposta para a simulação CFD : a) Esquema de dimensionamento do silo proposto, em cm. b) Malha tetraédrica não estruturada utilizada para as simulações

## 2.1 Condições de contorno

A determinação das condições de contorno ocorreu na ferramenta ANSYS CFX 11 Pre<sup>®</sup>, inseridas as propriedades necessárias para uma explosão. O modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  foi utilizado na escolha do tipo de regime por ser um modelo estável e robusto e já consolidado na utilização de simulações em diversos modelos computacionais de mesma natureza (ANDERSEN et al.,2009; COLLECUTT; HUMPHREY; PROUD,2009; TANIGUCHI et al.,2011; ZHANG; PANG; ZHANG,2011). Considerando um número de Reynolds de aproximadamente 12122, calculado a partir das propriedades do ar observadas na tabela 2. Um ambiente com número de Reynolds maior que 2100 é considerado como turbulento (INCROPERA et al., 2006).

O modelo  $k$ - $\varepsilon$  assume que a viscosidade de turbulência está ligada à energia cinética e dissipação de turbulência através da relação dissipação

$$\nu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

Sendo  $C_\mu$  constante:  $C_\mu = 0.09$

Os valores  $k$  e  $\varepsilon$  vêm diretamente das equações diferenciais de transporte para a energia cinética turbulenta e taxa de turbulência

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3)$$

As simulações foram realizadas em ambientes contendo partículas de pó e ar. O modelo de radiação termal do componente ar foi o P1 (aproximação diferencial) no qual a intensidade da radiação é assumida como isotrópica (ANDERSEN et al., 2009; COLLECUTT; HUMPHREY; PROUD, 2009). Sendo que neste modelo os dados são diagnosticados em cada etapa.

O modelo P1 é válido para uma espessura óptica maior que um, sendo utilizada para demonstrar a radiação em queimas de combustível por exemplo.

A forma completa da equação de energia radiante e a derivação do Modelo P1 para a radiação são dadas em Sazhin et al. (1996) o qual  $Tr$  é a temperatura radiante e é definida pela integração da densidade radiante  $i$  de todas as direções.

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} i d\Omega = \langle i \rangle = n^2 \sigma T_r^4 \quad (4)$$

Por analogia, o fluxo de calor radiante no limite de difusão advém do fluxo de energia radiante, sendo definido como:

$$q_r = \frac{4\sigma n^2}{3K_e} \nabla T_r^4 \quad (5)$$

O limite de difusão existe se a absorção efetiva,  $K_e$ , é grande. O termo  $K_e$  é utilizado na interação das partículas e fluidos com a radiação.

As propriedades referentes ao aço galvanizado usado na definição da parede do silo são listadas na Tabela 1.

Tabela 1 Propriedades do aço empregado das paredes

Transferência de Calor	Adiabática
Radiação termal	Opaca
Emissividade	0,28
Fração difusa	0,72

As condições de contorno gerais para as simulações foram definidos sem que ocorresse uma validação com o meio externo, pois o valor de números de Reynolds em simulações com geometria em escala diferentes não proporcionaria a mesma densidade dos fluidos em duas simulações. Portanto, mesmo que ocorresse o escalonamento do um experimento real para um protótipo, o número de Reynolds seria diferente ao menos que o fluido fosse modificado por outro com densidade proporcional a escala proposta. Visando que no estudo em questão o fluido Ar é de extrema importância para que ocorra a explosão, algumas propriedades foram deduzidas para comportar um fluxo turbulento,

como por exemplo, a velocidade. As propriedades de entrada podem ser visualizadas na tabela 2.

Tabela 2 Valores de entrada para o modelo de simulação CFD

Entrada	Valor	Unidade
Pressão referência	2000	kPa
Velocidade	0,1	m/s
Densidade do ar	1,185	Kg/m <sup>3</sup>
Massa molar do ar	28,96	Kg/mol
Calor específico do ar	1004,4	J.Kg/K
Densidade dinâmica	17,4 x10-6	Pas.s
Volume de CO <sub>2</sub>	0,0380	%
Volume de O <sub>2</sub>	21	%

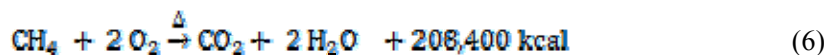
O fluido ar em questão na Tabela 2 tem as mesmas concentrações dos gases contidos no ar, com exceção do gás metano que foi alterado conforme concentrações propostas posteriormente.

## 2.2. Metodologia aplicada nas simulações

A primeira análise feita foi à relação entre a taxa de metano relacionada à respiração do açúcar e o aumento na temperatura causado por diferentes temperaturas iniciais. As definições das taxas de metano na atmosfera do silo foram quantificadas como 0,05%, 0,1%, 0,5%, 1% a 5%. Tendo como o valor máximo 5% por este ser o valor mínimo do limite de explosividade do metano (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION- NFPA, 2007).

A faixa de temperatura testada esteve entre 20 e 40 °C, observada nas condições de armazenamento em silos graneleiros e industriais.

O metano é altamente explosivo por isso para agregar o fator de reação entre o metano e o ar dentro de um silo utilizou-se a reação química de combustão visualizada na equação 6.



Podendo observar que a reação entre metano e oxigênio resulta em geração de calor mais gás carbônico e água.

Após a realização dos testes relacionados ao aumento de temperatura em ambiente que contém metano, foram realizados testes relacionado ao aumento de temperatura causado pela concentração de metano durante uma explosão.

O segundo teste foi realizado para prever o aumento de temperatura a partir da temperatura de mínima de ignição do açúcar variando a concentração de metano. Nestes testes foram analisadas explosões de pó iniciadas pela temperatura de ignição da partícula, para o produto açúcar. Os testes foram realizados nas concentrações de metano, com os índices de 0,05%, 0,1%, 0,5%, 1% a 5% em volume.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira fase de simulações verificou-se o efeito do aumento de temperatura a partir da variação dos valores de concentração de metano e temperatura inicial no silo. Estes resultados são visualizados na tabela 3.

Tabela 3 Aumento de temperatura de acordo com a variação entre a temperatura inicial do ambiente e concentração de metano

Metano/ Temp. Inicial (°C)	0,05%	0,10%	0,50%	1%	2%	3%	4%	5%
20	20,45	20,95	24,55	29,27	42,24	49,94	61,41	73,64
25	25,62	26,1	29,78	34,59	44,73	55,62	68,75	81,49
30	30,63	31,16	35,06	39,75	49,91	60,99	72,84	87,22
35	35,64	36,13	39,95	44,91	56,06	67,66	79,98	93,04
40	40,64	41,15	45,22	50,07	61,36	73,15	85,64	98,85



Na Tabela 3 observa-se que o aumento da temperatura do ambiente é gradual, como também a concentração de metano. Através de comparação entre os valores mínimos de temperatura de ignição de pó combustíveis e os valores máximos alcançados pela adição de metano, observa-se que apesar de a temperatura chegar a valores expressivos na concentração de 5%, esta temperatura não é capaz de fazer com que um pó combustível entre em ignição, não chegando à temperatura de 400 °C.

Entretanto a adição do metano no ambiente pode favorecer o aumento da probabilidade de explosões, pois além de aumentar a temperatura do ambiente diminui os índices relacionados a uma explosão como concentração mínima de ignição e energia mínima de ignição (CASHDOLLAR, 2000; ECKHOFF, 2003). Este aumento de temperatura irá interferir na degradação da massa armazenada ou até mesmo danificar equipamentos contidos na estrutura.

As concentrações de metano de 0,05% e 0,1% geram um aumento muito pequeno na temperatura interna de uma silo chegando ao um aumento de aproximadamente 0,5 °C e 1 °C, por isso estas concentrações não possuem um valor fortemente agregado a explosão de pó. Já as concentrações de 0,5% a 5% demonstram um aumento substancial no valor inicial da atmosfera interna do silo, sendo estes capazes de influenciar em uma explosão de pó juntamente com a fonte de ignição adequada para determinada nuvem de pó.

Observa-se que a temperatura aumenta aproximadamente 10 °C quando o aumento da taxa é de 1%, e assim chegando a um aumento de quase 60 °C quando a concentração é de 5% de metano, em uma situação a qual temperatura inicial é de 25 °C, representando assim um aumento significativo e um risco para silos. Sendo este risco condicionado a explosões e a perda de massa pelo aumento de temperatura.

O segundo bloco de simulações executadas teve o intuito de determinar a temperatura máxima de explosões em um silo. Neste sentido as simulações

relacionadas ao aumento de temperatura em uma explosão de pó variando-se a concentração de metano presente no ar, demonstraram novamente um aumento gradual da temperatura máxima alcançada na explosão, de acordo com o teor de metano presente no ar. Podendo ser observadas no gráfico 1.

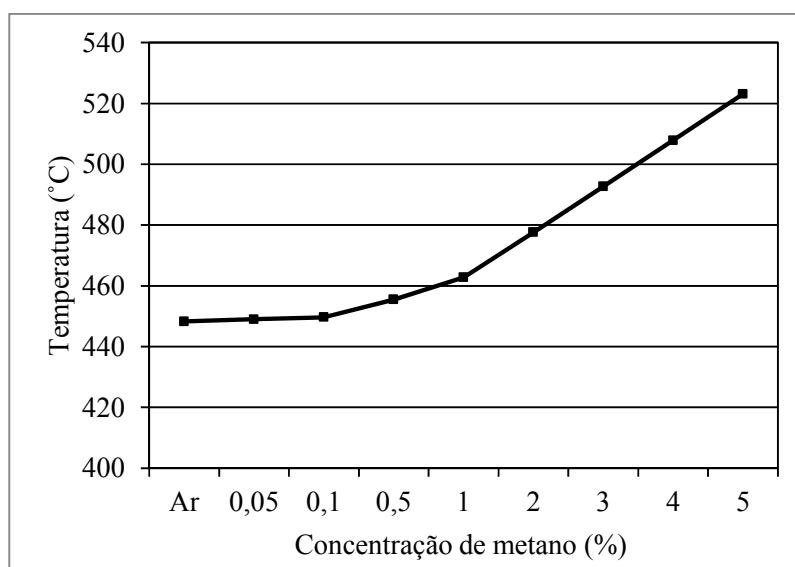


Gráfico 1 Aumento de temperatura com a variação da concentração de metano em um silo de açúcar com temperatura de explosão. (Porcentagem de metano no ar: 1,79 e-06%)

O comportamento das temperaturas alcançadas no primeiro bloco de simulações, referente ao aumento de temperatura relacionado à concentração de metano é condizente com o segundo teste que se refere à temperatura alcançada em uma situação de explosão, pois nos dois blocos existe um aumento gradual da temperatura de acordo com a concentração de metano proposta. Nas primeiras concentrações observa-se que o metano praticamente traz uma pequena interferência na temperatura alcançada em relação ao metano na concentração do ar atmosférico.

Entretanto, em condições de maiores concentrações de metano a temperatura aumentou bruscamente, sendo que os valores de concentração maiores que 1% de metano, forneceram relevante aumento de temperatura.

Observando o comportamento análogo ente o primeiro bloco e o segundo bloco de simulações, buscou-se identificar o quão análogo são os dois blocos de simulação. Esta quantificação é analisada no gráfico 2, apresentando a diferença entre a variação do aumento de temperatura quantificada pelo estado de não explosão (temperatura inicial de 20 °C à 40 °C) e do estado de explosão (temperatura inicial de 400 °C, que corresponde ao ponto de ignição da partícula estuda).

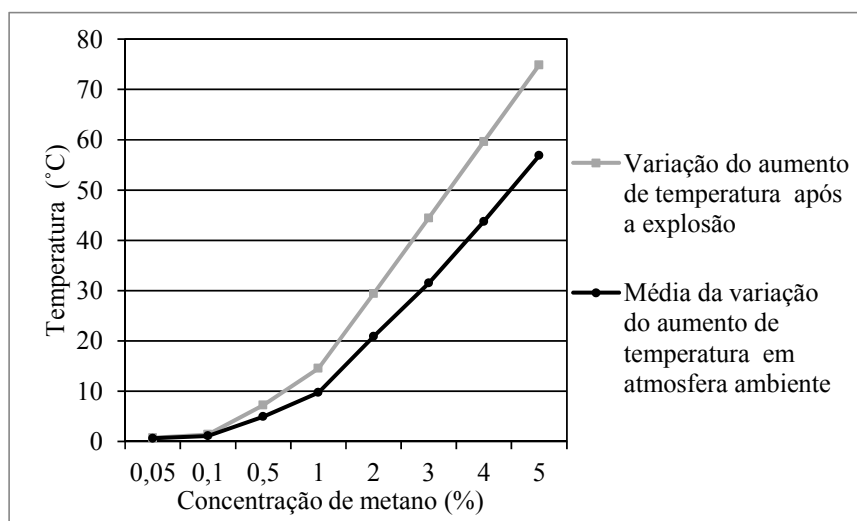


Gráfico 2 Relação do aumento de temperatura em um estado de não explosão e um estado de explosão (temperatura inicial 400 °C)

A diferença na variação da temperatura ambiente pode ter ocorrido tanto pela combustão do metano ou pelo efeito de combustão das partículas de pó, susceptíveis à temperatura de ignição.

Após a determinação da temperatura máxima, para uma atmosfera de armazenamento, determinou-se por método de regressão (*softwareSisvar*®), a relação matemática das variáveis que influenciaram o modelo. Foram utilizados como dados de composição do modelo a concentração de metano ( $C_m$ ) e a temperatura inicial ( $T_i$ ) do ambiente, tendo como resposta a temperatura máxima da atmosfera ( $T_{max}$ ).

Neste sentido testou-se o comportamento da temperatura máxima em relação às variáveis temperatura inicial e concentração de metano na atmosfera. Utilizou-se para tal análise estatística o *softwareSisVar*®, o qual através de regressão linear determinou a equação 2, com um coeficiente de determinação  $R^2 0.9967$ . Com isto afirma-se que o modelo de regressão proposto é válido por ser próximo a 100% confiança para um erro padrão baixo como pode ser observado no gráfico 2.

$$T_{max} = -2.79 + 11.14C_m + 1.07T_i \quad (7)$$

A regressão obtida apresenta um intercepto negativo representando que se as variáveis independentes chegassem a zero o valor de  $T_{max}$  seria negativo. Como o gás metano não tem a propriedade de diminuir a temperatura do ar onde ele está inerte, fisicamente pode-se afirmar que se a concentração chegasse a zero a temperatura inicial não se modificaria, sendo assim o intercepto não seria analisado.

Através do modelo observado pelas equações 2 e 3 observa-se que o parâmetro de maior importância no aumento de temperatura em um silo com gás metano inerte é a concentração do mesmo. O comportamento relacionados das equações foram plotados no Gráfico 4.

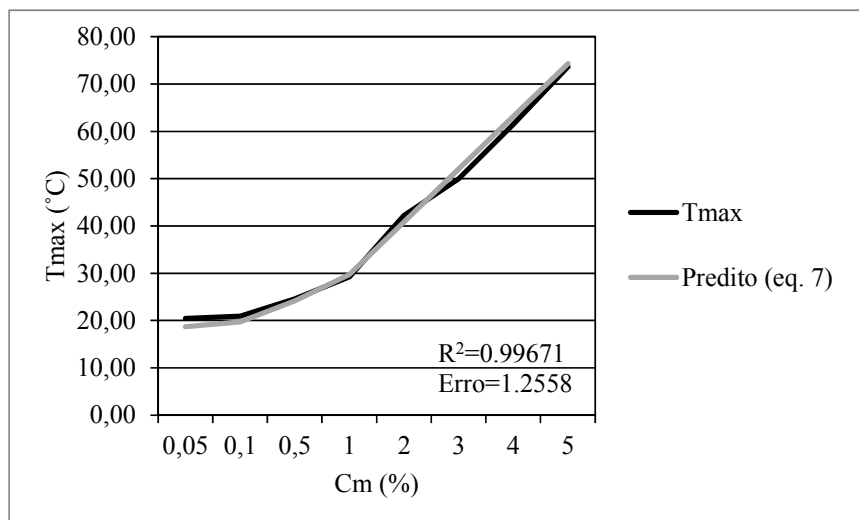


Gráfico 3 Relação entre os resultados da temperatura máxima na atmosfera do silo entre os dados analisados durante a simulação ( $T_{max}$ ), equação linear gerada pelo *software* SisVar (Predito eq. 7)

Observa-se no Gráfico 3 que não ocorreu diferença significativa entre o comportamento progressivo da temperatura máxima do silo estudado com o predito pela regressão. O gráfico demonstra como o já visualizado na tabela 3 que o aumento da temperatura é gradual em relação à temperatura inicial da atmosfera e o aumento da concentração de metano. Com o intuito de apresentar uma regressão que demonstrasse apenas os aspectos físicos sem que ocorresse a análise do intercepto foi predita a equação 8 representada pelo Gráfico 4.

$$T_{max} = 1,184t + 2,241c_m^2 \quad (8)$$

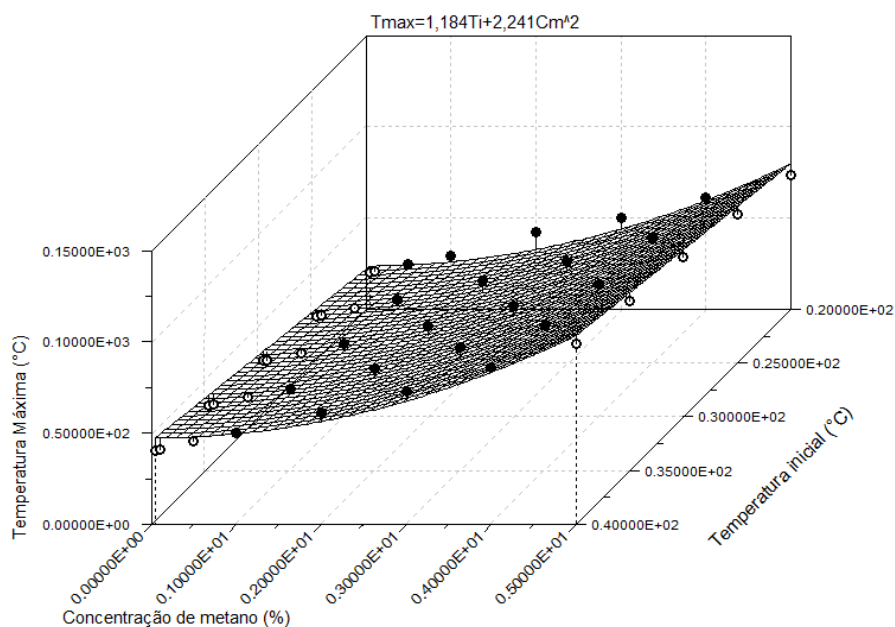


Gráfico 4 Representação da equação gerada a partir da temperatura inicial da atmosfera do silo e concentração mínima de ignição com o intuito de determinar o aumento de temperatura na mesma

A equação listada no gráfico acima apresenta a curva do aumento de temperatura na atmosfera do silo sendo esta vislumbrando os aspectos físicos do fenômeno demonstrando através dos coeficientes relacionados à concentração mínima de ignição. Demonstrando que quando maior a concentração de metano e temperatura inicial da atmosfera maior será a temperatura máxima na mesma.

De acordo com o visualizado nas regressões e normalizações observadas anteriormente, observa-se que a concentração de metano no ar atmosférico é a principal variável no aumento de temperatura qualquer que seja a temperatura inicial.

#### **4 CONCLUSÃO**

O comportamento observado através das simulações mostrou que o metano em condições normais de armazenamento para o produto açúcar teve um aumento de aproximadamente 10 °C a para a variação de 1% na concentração de metano.

Ao ser analisado a interferência do gás metano em condições de explosão, constata-se que o aumento de temperatura não foi igual ao aumento encontrado em condições de armazenamento para uma variação de 15 °C a cada 1% de metano acrescido no silo.

A utilização da fluidodinâmica computacional é de extrema relevância para prever fenômenos relacionados á explosão de pó, pois facilita além da análise o desenvolvimento de técnicas experimentas mais eficazes para a mitigação deste fenômeno.

#### **5 AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos à FAPEMIG, à UFLA e ao Departamento de Engenharia de Sistemas, pelo apoio e fomento ao projeto.

## REFERÊNCIAS

ANDERSEN, J. et al. Global combustion mechanisms for use in CFD modeling under oxy-fuel conditions. **Energy & Fuels**, Washington, v. 23, p. 1379-1389, Jan. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6184-1**: sistema de proteção contra explosão: parte 1, determinação dos índices de explosão dos pós combustíveis no ar. Rio de Janeiro, 2007. 14 p.

BAI, C. et al. The explosion overpressure field and flame propagation of methane / air and methane / coal dust / air mixtures. **Safety Science**, Amsterdam, v. 49, n. 10, p. 1349-1354, Dec. 2011. Disponível em: <<http://www.mendeley.com/research/explosion-overpressure-field-flame-propagation-methane-air-methane-coal-dust-air-mixtures/#page-1>>. Acesso em: 3 mar. 2012.

CASHDOLLAR, K. L. Overview of dust explosibility characteristics. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, New York, v. 3/5, n.13, p. 183-199, May 2000.

COLLECUTT, G.; HUMPHREY, D.; PROUD, D. CFD simulation of underground coal dust explosions and active explosion barriers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CFD IN THE MINERALS AND PROCESS INDUSTRIES, 17., 2009, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: CSIRO, 2009. Disponível em: <[http://www.cfd.com.au/cfd\\_conf09/PDFs/230COL.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_conf09/PDFs/230COL.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2012.

ECKHOFF, R. K. **Dust explosions in the process industries**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Elsevier Science, 2003. 754 p.

\_\_\_\_\_. Dust explosion prevention and mitigation, status and developments in basic knowledge and in practical application essential tool in assessing and controlling. **International Journal of Chemical Engineering**, Cairo, v. 2009, p. 1-12, 2009.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Renewable biological systems for alternative sustainable energy production**. Osaka, 1997. (FAO Agricultural Services Bulletin, 128). Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e00.htm#Contents>>. Acesso em: 10 fev. 2012.



HONG, S. et al. CFD modelling of livestock odour dispersion over complex terrain, part I: topographical modeling. **Biosystems Engineering**, London, v. 108, p. 253-264, Dec. 2010.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: Wiley, 2006. 1023 p.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 77 recommended practice on static electricity**. Quincy, 2007. Disponível em: <<http://www.nfpa.org/itemDetail.asp?categoryID=1011&itemID=24613&URL=About%20NFPA/International/Sobre%20a%20NFPA>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

RAMÍREZ, A.; TORRENT, J.G.; AGUADO, P.J. Determination of parameters used to prevent ignition of stored materials and to protect against explosions in food industries. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 168, p. 155-120, Feb. 2009.

SAZHIN, S. S. et al. The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations. **Fuel**, London, v. 75, n. 3, p. 289-294, Sept. 1996.

SKJOLD, T. et al. Simulating dust explosions with the first version of desc. **Process Safety and Environmental Protection**, Rugby, v. 83, n. 2, p. 151-160, Mar. 2008.

TANIGUCHI, M. et al. Application of lean flammability limit study and large eddy simulation to burner development for an oxy-fuel combustion system. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, New York, v. 5, n. 1, p. 111-119, July 2011.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. London: Longman, 1996. 270 p.

VORDERBRUEGGEN, J.B. Imperial sugar refinery combustible dust explosion investigation. **Process Safety Progress**, New York, v. 30, n. 1, p. 66-81, Mar. 2011.

ZHANG, Q.; PANG, L.; ZHANG, S.X. Effect of scale on flame speeds of methane-air. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, New York, v. 24, n. 5, p. 705-712, June 2011.

## **ARTIGO 2**

**Análise computacional da variação da temperatura mínima de ignição em explosões de pós em silos**

## ANÁLISE COMPUTACIONAL DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÍNIMA DE IGNIÇÃO EM EXPLOSÕES DE PÓS EM SILOS

J. A. SILVA<sup>a</sup>, F. C. GOMES<sup>a</sup>, J. L. G. CORRÊA<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas, Departamento de Engenharia,  
Universidade Federal de Lavras, Brasil

<sup>b</sup> Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Lavras,  
Brasil

**Resumo:** O metano é um dos gases causadores do efeito estufa e um dos principais gases inertes relacionados a explosões de pó em silos. Estas são causadas pelo acúmulo de pó suspenso em uma atmosfera confinada juntamente com uma fonte de ignição. A ação do metano em uma explosão de pó modifica os principais índices de explosividade como a concentração mínima de ignição e a energia mínima de ignição. Testes em laboratórios ou em unidades industriais, geralmente, são de alta periculosidade, pois envolve um gás explosivo e uma atmosfera explosiva. A utilização da modelagem computacional e, especificamente, a fluidodinâmica computacional aplicada na análise de aspectos relacionados a este tipo de explosão, se torna pertinente. Neste trabalho objetivou-se analisar a interferência do metano na temperatura mínima de ignição em explosões de pó. As condições testadas tomaram como referência a variação da concentração de metano na atmosfera do silo, com valores entre 0.05 a 5% em volume. Foi avaliada diminuição da temperatura mínima de ignição de diferentes tipos de pó, divididos em dois grupos de acordo com a granulometria: grãos e pulverulentos. Após a realização do estudo, observou-se que, com o aumento da concentração de metano ocorreu um decréscimo na temperatura mínima de ignição capaz de iniciar uma explosão, demonstrando com isso que o metano é um gás altamente perigoso quando inerte em uma atmosfera de armazenamento. Com testes realizados, via regressão, observou-se que em uma análise linear as variáveis, tamanho da partícula, temperatura mínima de ignição inicial e concentração de metano, influenciaram o modelo apresentando um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,95973. Tendo como o principal fator influenciador a concentração de metano no ambiente.

Palavras-chave: Silo, CFD, Modelagem Computacional.

## 1 INTRODUÇÃO

Os índices relacionados à explosividade são importantes no estudo de explosão de pó em ambientes confinados, sendo estes determinados como temperatura mínima de ignição, concentração mínima de pó e energia mínima de ignição (ECKHOFF, 2009). Apesar de os índices serem importantes na mitigação de explosão de pó, eles são instáveis e dependentes do tipo de produto analisado.

Tal constatação dificulta tanto o desenvolvimento de equações determinantes do fenômeno como também a generalização dos fatores que geram explosões de pó. Além de os índices serem modificados de acordo com o tipo de produto, eles são afetados também por aspectos relacionados à atmosfera ambiente. Fatores como a presença de gases inertes alteram os níveis de determinação de explosividade do ambiente confinado com pó suspenso (ECKHOFF, 2009; FIELD, 1982).

Um dos principais gases que afeta o ambiente propicio a uma explosão de pó é o gás metano, por ser altamente explosivo e capaz de liberar calor com facilidade. Este gás é liberado através da ação de bactérias metanogênicas, na deterioração dos grãos em silos e na ação da extração de carvão mineral (BAI et al., 2011; COUTO, 2004; ECKHOFF, 2009).

Existem estudos que relacionam o gás metano como fonte de diminuição dos índices de explosividade como concentração mínima de ignição e energia mínima de ignição, os quais aumentam a possibilidade de uma explosão. Entretanto, a ação da diminuição da temperatura mínima de ignição não é um fator totalmente claro, apesar de fortes indicações da ação do metano neste índice.

O desenvolvimento de um modelo que consiga delimitar a ação do gás metano na diminuição de índices como a temperatura mínima de ignição

facilitaria as ações de prevenção de explosões de pó causadas pelo aumento de temperatura ou fonte de calor próxima à nuvem de pó. Uma aplicação se faz necessária em pós-agrícolas que são altamente explosivos e requerem um nível maior de atenção, pela influência de fontes externas causadoras de explosão.

Para tal desenvolvimento pode-se aplicar a modelagem CFD (Fluidodinâmica Computacional) que vem sendo utilizada em diversos modelos computacionais que procuram analisar explosões de pó em minas de carvão (ANDERSEN et al., 2009; COLLECUTT; HUMPHREY; PROUD, 2009; ECKHOFF, 2009; TANIGUCHI et al., 2011).

A fluidodinâmica computacional ou CFD é uma técnica capaz de modelar fenômenos referentes à análise de fluídos em um ambiente como o ar e água entre outros (HONG et al.,2010; SKJOLD et al., 2008; VERSTEEG; MALALASEKERA,1996).

Através dessa análise, tornou-se preponderante, o desenvolvimento de um modelo computacional capaz de demonstrar a influência do gás metano na diminuição da temperatura mínima de ignição de produtos agrícolas e industriais.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

Para a simulação definiu-se um protótipo de silo cilíndrico de tremonha cônica de aço galvanizado. A escolha deste material se deve a sua importância na construção de silos no setor industrial. O volume considerado foi de 1,0 m<sup>3</sup> como o proposto na norma ABNT ISO 6184:1(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT, 2007), a qual propõe métodos para experimentação de explosões de pó. A Figura 1 apresenta a malha adotada, tetraédrica e não estruturada, construída com o auxílio do *software* ANSYS Workbench<sup>®</sup>.

A utilização de uma malha não estruturada se deve a facilidade de criação da mesma e do melhor ajustamento à geometria estuda. O número máximo de nós é de 7.983 e o número de elementos de 15.370.

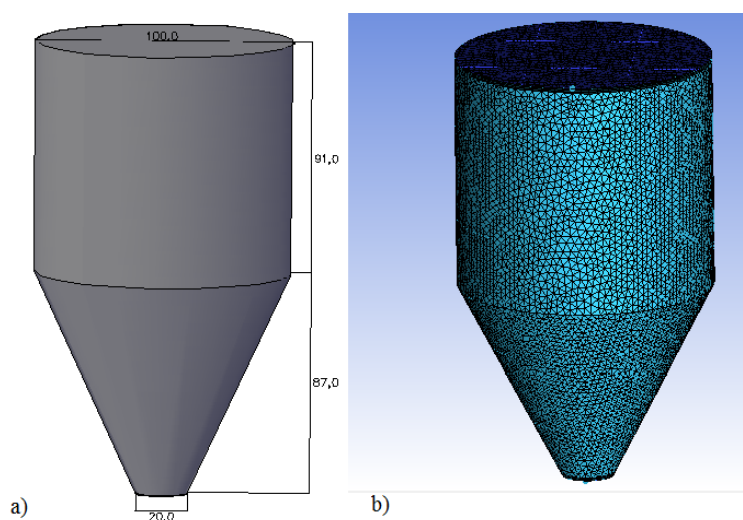


Figura 1 Geometria proposta para a simulação CFD: a) Esquema de dimensionamento do silo proposto em cm b) Malha adota tetraédrica não estruturada utilizada para as simulações

## 2.1 Condições de contorno

A determinação das condições de contorno ocorreu na ferramenta ANSYS CFX 11 Pre<sup>®</sup>, inseridas as propriedades necessárias para uma explosão. O modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  foi utilizado na escolha do tipo de regime por ser um modelo estável e robusto e já consolidado na utilização de simulações em diversos modelos computacionais de mesma natureza (ANDERSEN et al.,2009; COLLECUTT; HUMPHREY; PROUD,2009; TANIGUCHI et al., 2011; ZHANG; PANG; ZHANG,2011). Considerando um número de Reynolds de aproximadamente 12122, calculado a partir das propriedades do ar observadas

na tabela 2. Um ambiente com número de Reynolds maior que 2100 é considerado como turbulento (INCROPERA et al., 2006).

O modelo  $k$ - $\varepsilon$  assume que a viscosidade de turbulência está ligada à energia cinética e dissipação de turbulência através da relação dissipação

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

Sendo  $C_\mu$  constante:  $C_\mu = 0.09$

Os valores  $k$  e  $\varepsilon$  vêm diretamente das equações diferenciais de transporte para a energia cinética turbulenta e taxa de turbulência

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3)$$

As simulações foram realizadas em ambientes contendo partículas de pó e ar. O modelo de radiação termal do componente ar foi o P1 (aproximação diferencial) no qual a intensidade da radiação é assumida como isotrópica (ANDERSEN et al., 2009; COLLECUTT; HUMPHREY; PROUD, 2009). Sendo que neste modelo os dados são diagnosticados em cada etapa.

O modelo P1 é válido para uma espessura óptica maior que um, sendo utilizada para demonstrar a radiação em queimas de combustível por exemplo.

A forma completa da equação de energia radiante e a derivação do Modelo P1 para a radiação são dadas em Sazhinet al.(1996) o qual  $Tr$  é a

temperatura radiante e é definida pela integração da densidade radiante  $i$  de todas as direções.

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} i d\Omega = \langle i \rangle = n^2 \sigma T_r^4 \quad (4)$$

Por analogia, o fluxo de calor radiante no limite de difusão advém do fluxo de energia radiante, sendo definido como:

$$q_r = \frac{4\sigma n^2}{3K_e} \nabla T_r^4 \quad (5)$$

O limite de difusão existe se a absorção efetiva,  $K_e$ , é grande. O termo  $K_e$  é utilizado na interação das partículas e fluidos com a radiação.

As propriedades referentes ao aço galvanizado usado na definição da parede do silo são visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1 Propriedades do aço empregado das paredes

Transferência de Calor	Adiabática
Radiação termal	Opaca
Emissividade	0,28
Fração difusa	0,72

As condições de contorno gerais para as simulações foram definidas sem que ocorresse uma validação com o meio externo, pois o valor de números de Reynolds em simulações com geometria em escala diferentes não proporcionaria a mesma densidade dos fluídos das duas simulações. Portanto, mesmo que ocorresse o escalonamento de um experimento real para um protótipo, o número de Reynolds seria diferente ao menos que o fluído fosse modificado por outro com densidade proporcional a escala proposta. Visando que no estudo em



questão o fluido Ar é de extrema importância para que ocorra a explosão, algumas propriedades foram deduzidas para comportar um fluxo turbulento, como por exemplo, a velocidade. As propriedades de entrada podem ser visualizadas na tabela 2.

Tabela 2 Valores de entrada para o modelo de simulação CFD

Entrada	Valor	Unidade
Pressão referência	2000	kPa
Velocidade	0,1	m/s
Densidade do ar	1,185	Kg/m <sup>3</sup>
Massa molar do ar	28,96	Kg/mol
Densidade dinâmica	17,4 x10-6	Pas.s
Calor específico do ar	1004,4	J.Kg/K
Volume de CO <sub>2</sub>	0,0380	%
Volume de O <sub>2</sub>	21	%

O fluido ar em questão na tabela 2 tem as mesmas concentrações dos gases contidos no ar, com exceção do gás metano inerte contido na atmosfera de simulação. Os valores de concentração de metano no ambiente foram modificados variando suas concentrações nos intervalos de 0.05, 0.1, 0.5e 1% a 5%. Tendo como o valor máximo o valor de 5% por este valor ser o valor mínimo do limite de explosividade do metano (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION- NFPA, 2007).

## 2.2 Propriedades termofísicas e índices de explosividade dos produtos estudados

Os produtos escolhidos para a simulação foram divididos em 2 grupos de acordo granulometria, ou seja, grãos e pulverulentos. Os produtos foram escolhidos, devido sua importância comercial, sendo os de origem agrícola os que apresentam maior número de explosões de pó, não sendo até o momento, modelados via CFD. A maior parte das simulações de explosões de pó é

relacionada ao carvão, que além de ser um produto bastante explosivo é considerado como produto base no estudo de explosões de pó. São apresentadas nas tabelas 3 e 4 as propriedades termofísicas seguidas de índices de explosividade dos pós analisados.

Tabela 3 Propriedades termofísicas dos pós dos produtos

Produto	Calor específico (J/kg.k)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Pós Grãos</b>		
Cafê <sup>1</sup>	5784	445,447
Milho <sup>2</sup>	1369	850
Soja <sup>2</sup>	1926	750
<b>Pulverulentos</b>		
Amido de batata <sup>3</sup>	1225	240
Amido de milho <sup>4</sup>	2160	140
Farinha de trigo <sup>5</sup>	1940	171,3
Asfalto <sup>6</sup>	920	2115
Carvão mineral betuminoso	1380	673

Fonte: 1. Afonso Júnior et al. (2002); 2. Pabis, Jayas e Cenkowski(1998); 3.Stancl et al. (2008); 4.Mc Guinness et al. (2000); 5.Kinet al. (2003); 6. Engineering...(2012)

Tabela 4 Índices de explosividade dos pós analisados

Produto	Tamanho da partícula (µm)	Concentração mínima ignição (g/m <sup>3</sup> )	Temperatura mínima de ignição(°C)
<b>Pós de Grãos</b>			
Cafê	10	60	380
Milho	1250	60	400
Soja	95	250	290
<b>Pulverulentos</b>			
Amido de batata	48	60	390
Amido de milho	11	40	400
Farinha de trigo	65	60	400
Asfalto*	29	15	550
Carvão mineral betuminoso*	38	125	610

Fonte: Lpvent (2011); (\*) Eckhoff (2003)

As simulações foram executadas seguindo os valores de explosividade observados na tabela 4, tendo como temperatura inicial os valores mínimos de ignição e a concentração de pó na atmosfera do silo e a concentração mínima de ignição. A simulação se processou até que ocorresse um aumento da temperatura no silo, configurando uma explosão.

### **2.3 Etapas da simulação**

Para cada produto simulado, foram definidos suas propriedades termofísicas e índices de explosividade. A verificação da influência do metano na temperatura mínima de ignição foi simulada a partir das variações das concentrações de metano com os índices 0,05, 0,1, 0,5 e 1% a 5%.

Para cada combinação de simulação adotou-se como temperatura inicial a temperatura mínima de ignição das partículas, com o aumento da concentração verificava-se a variação da temperatura mínima de ignição.

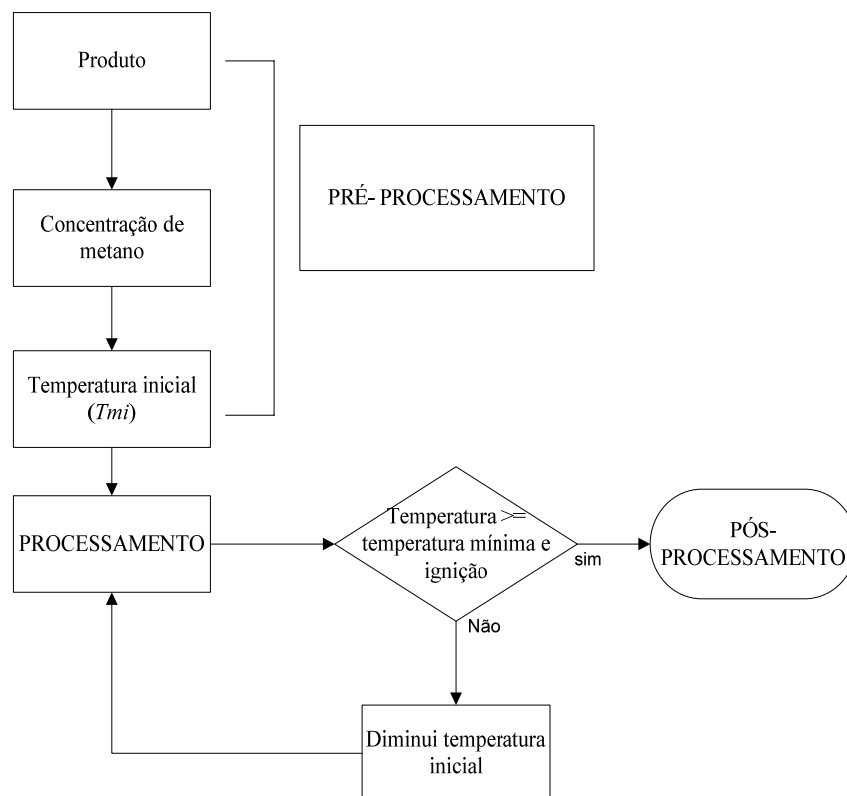


Figura 2 Esquema de simulação para descobrir temperatura mínima de ignição para uma explosão de pó

Após os vários testes de concentrações de metano para os diferentes tipos de pós, determinou-se através de teste de regressão linear a relação entre as variáveis do problema (tamanho da partícula, concentração de metano e temperatura mínima de ignição inicial) com a variação da temperatura mínima de ignição, sendo utilizado para tal os *software* de análise estatística SisVar®, a partir de uma relação funcional linear.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A diminuição da temperatura inicial de ignição funciona analogamente à diminuição da energia mínima de ignição e concentração mínima de ignição (ECKOFF, 2003). Conforme o gráfico 1 pode-se demonstrar a variação da temperatura mínima de ignição encontrada nas simulações no grupo grãos.

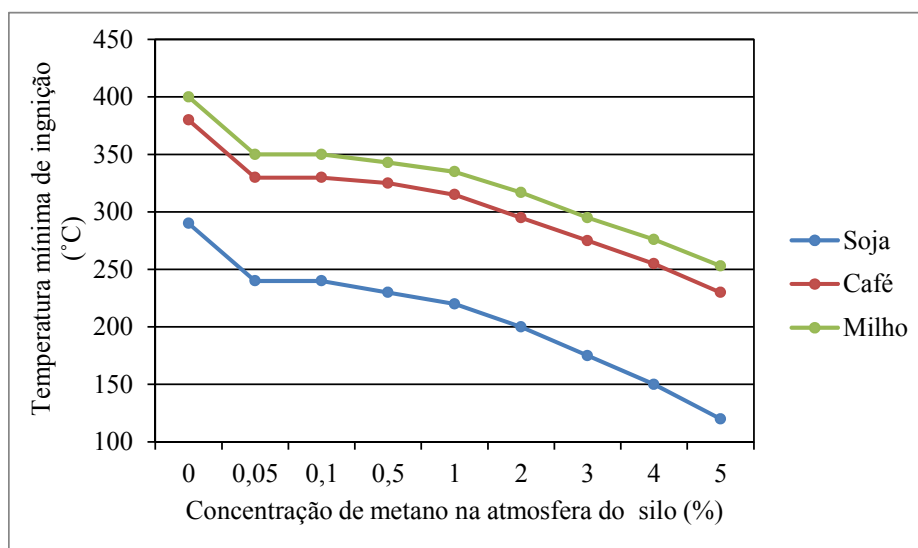


Gráfico 1 Determinação da temperatura mínima de ignição para pós de grãos relacionada com a variação da concentração de metano na atmosfera do silo

No gráfico 1 observa-se que a temperatura mínima de ignição diminui de acordo com o aumento da concentração de metano, para todos os produtos. Tendo um comportamento decrescente semelhante em todos os produtos deste grupo. Nas concentrações de 0,05 e 0,1 não ocorreu modificação no valor da temperatura mínima de ignição. Entre os três produtos deste grupo a soja apresentou uma variação maior que os demais tendo um declive maior após o nível de 2% de metano na atmosfera.

Após serem testados os pós referentes ao grupo grãos foram testados, os pós referentes ao grupo dos pulverulentos. O qual pode ser observado no gráfico 2 e 3.

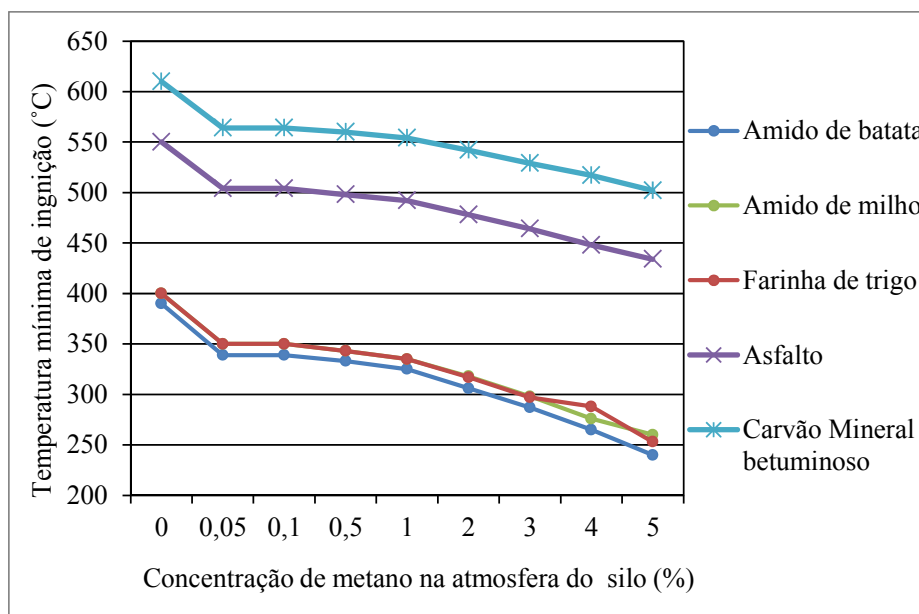


Gráfico 2 Determinação da temperatura mínima de ignição para pós de produtos pulverulentos relacionada com a variação da concentração de metano na atmosfera do silo

O comportamento da diminuição de temperatura mínima de ignição foi semelhante ao do primeiro grupo (grãos), entretanto como se pode observar pelo gráfico 2, as temperaturas mínimas de ignição iniciais dos produtos estudados no grupo dos pulverulentos são próximas, por isso a curva de comportamento praticamente se sobrepõem.

Na simulação referente ao produto farinha de trigo observa-se uma pequena modificação no comportamento verificado a partir da concentração de 4%, com uma taxa de variação menor.

O comportamento temperatura mínima de ignição foi semelhante aos das outras simulações, podendo assim verificar que a diminuição de temperatura de ignição segue uma tendência que se relaciona ao aumento de concentração de metano. Este comportamento pode ser observado no teste de médias na tabela 5.

Tabela 5 Média da variação do aumento de temperatura para os grupos de pós

Tipos de pós	Concentração de metano (% vol)							
	0,05	0,1	0,5	1	2	3	4	5
Média do aumento de temperatura (°C)								
Grãos	50,00	50,00	57,33	66,67	86,00	108,33	129,67	155,67
Pulverulentos	50,33	50,33	57,00	65,00	83,00	102,67	120,33	145,67
Industriais	47,33	47,33	51,33	57,33	70,67	84,33	98,33	112,67
Total	49,22	49,22	55,22	63,00	79,89	98,44	116,11	138,00

Os dados apresentados na Tabela 5 indicam que o decréscimo da temperatura o que aumentaria o risco de ocorrência de uma explosão de pó. O resultado da simulação gerou os dados de temperatura conforme a Figura 3 com pontos de oscilação, demonstrando assim um comportamento próximo ao real.

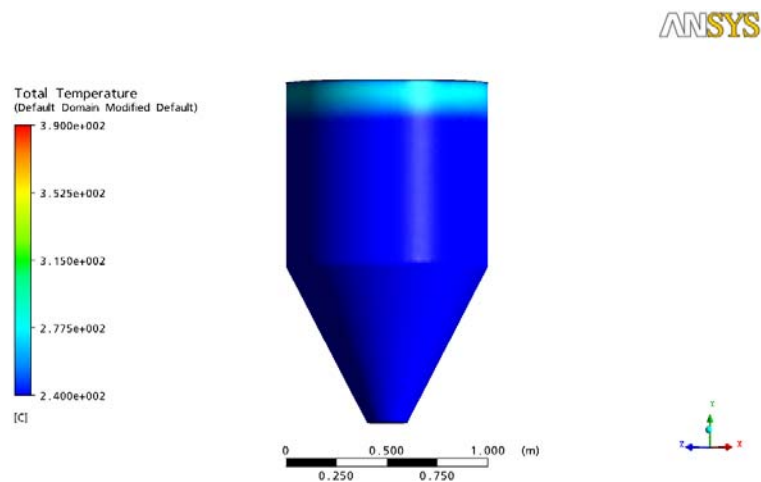


Figura 3.a Demonstrativo da variação de temperatura em uma simulação utilizando 5% de concentração de metano e o produto grão de soja (inicial)

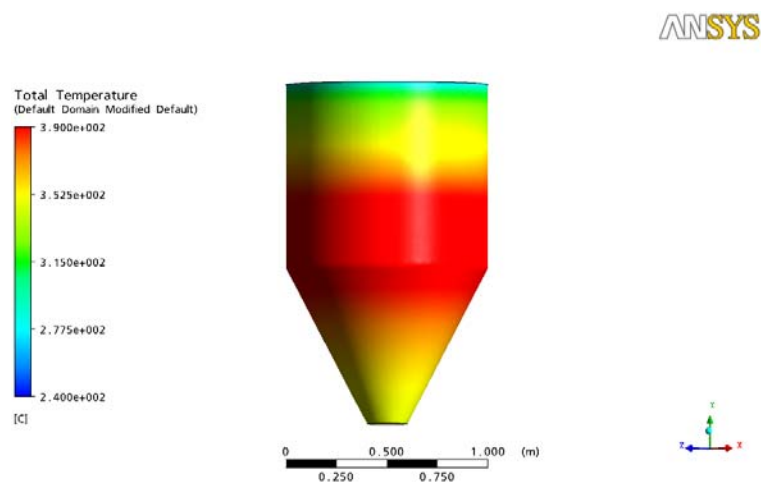


Figura 3.b Demonstrativo da variação de temperatura em uma simulação utilizando 5% de concentração de metano e o produto grão de soja (fase intermediária)



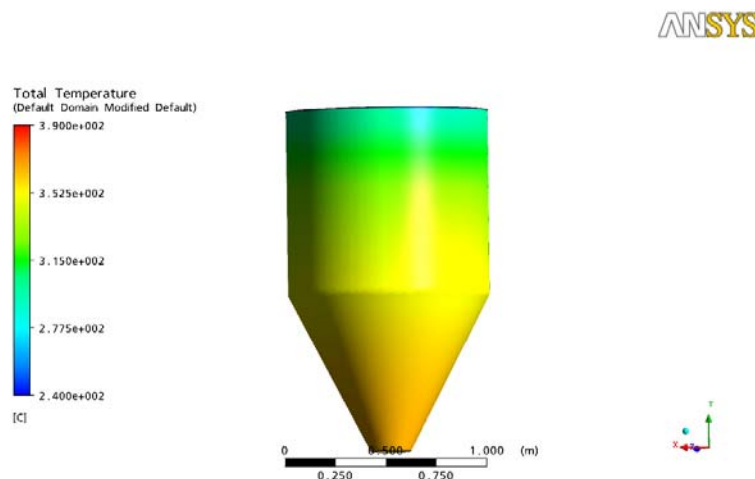


Figura 3.c Demonstrativo da variação de temperatura em uma simulação utilizando 5% de concentração de metano e o produto grão de soja (fase final)

Nas simulações como um todo, num primeiro estágio a temperatura é uniforme em todo ambiente dentro do silo, já com início da injeção de metano e pó a temperatura começa a aumentar, chegando à ignição.

Para verificar o comportamento das variáveis utilizadas no modelo executou-se um teste via regressão para comprovar o comportamento das mesmas no modelo, sendo analisadas como variáveis independentes a temperatura mínima de ignição ( $T_{mi}$ ), concentração de metano ( $C_m$ ), tamanho da partícula ( $p$ ), tendo como parâmetro resposta a variação da temperatura mínima de ignição ( $\Delta T_{mi}$ ). Após os testes chegou-se à equação 6 que obteve um  $R^2$  de 0.9597.

$$\Delta T_{mi} = 79.84 + 17.76C_m + 0.001p - 0.08T_{mi} \quad (6)$$

Na equação 2 todas as variáveis obtiveram um valor p menor que 0,05, com exceção da variável tamanho da partícula ( $p$ ) que obteve um valor p de

aproximadamente 0,73 que representa este valores desta variável podem não ser confiáveis. Fato este podendo ser explicado pela diferença de magnitude entre os valores de tamanho de partícula. O comportamento da equação 6 foram demonstrados no Gráfico 3.

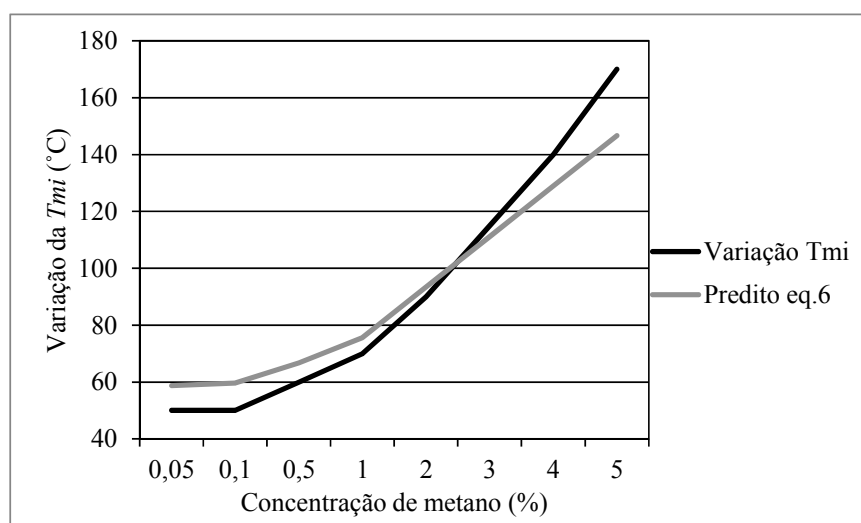


Gráfico 3 Comportamento da regressão predita nas equações 6 com relação a variação da temperatura mínima de ignição para a soja tomada como exemplo

A partir do gráfico 3 observa-se que em alguns momentos regressão não consegue ter o mesmo comportamento da diminuição da temperatura mínima de ignição encontrada, entretanto o comportamento é bem próximo, sendo que equação normalizada consegue ainda uma melhor aproximação.

Com isto observa-se que ao se propor um modelo matemático para a diminuição da temperatura mínima de ignição as possíveis variáveis constituintes do modelo seria concentração de metano e temperatura mínima de ignição.

$$\Delta t_{mi} = 55,22 m^{0,0826m} \quad (7)$$

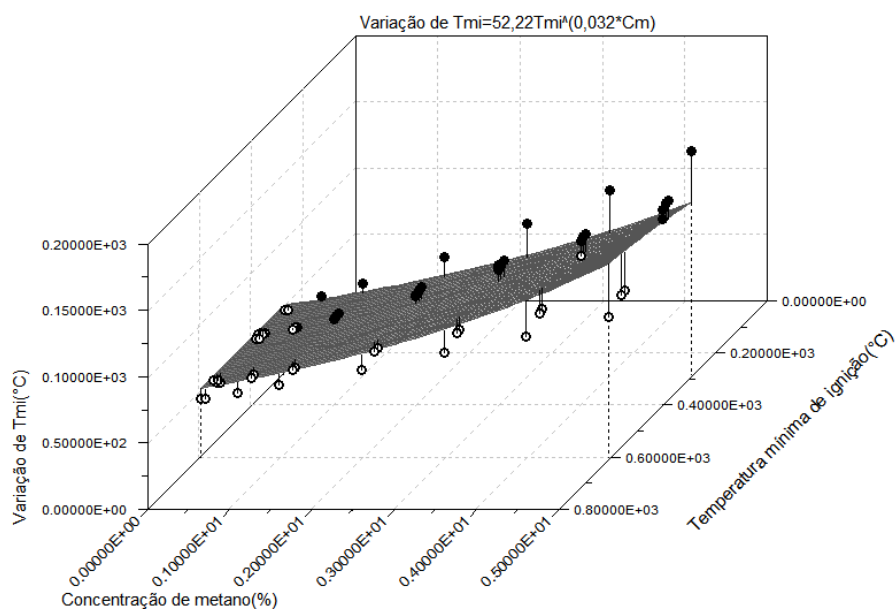


Gráfico 4 Comportamento predito por regressão visando análise sem intercepto

A equação 7, a qual é apresentada no gráfico 4 é próxima as condições físicas de análise do fenômeno, apesar da equação 7 obter um coeficiente de determinação de 0,8554. A partir da análise proposta à diminuição da temperatura mínima de ignição vai depender diretamente da concentração de pó e temperatura mínima de ignição inicial. Ocorrendo uma variação de acordo com a porcentagem de metano na atmosfera, deve-se ressaltar que a equação proposta configura situações de decréscimo da temperatura mínima de ignição, pois a inserção de metano qualifica somente a diluição da temperatura mínima de ignição.

#### **4 CONCLUSÕES**

A modelagem via CFD construída demonstrou que o metano influencia de forma gradual na diminuição da temperatura mínima de ignição, em todos os níveis analisados, principalmente a partir de 1% de metano na atmosfera do silo.

As variáveis temperatura mínima de ignição, tamanho da partícula, a densidade e calor específico interferem no processo da combustão do pó, entretanto, de acordo com as análises via regressão a concentração de metano é a variável que mais influencia na diminuição da temperatura mínima de ignição.

Através da análise via regressão pode inferir que a melhor predição através da função polinomial que representa o fenômeno de forma física, demonstrando a importância das variáveis estudadas.

#### **5 AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos à FAPEMIG, à UFLA e ao Departamento de Engenharia de Sistemas pelo apoio e fomento ao projeto.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P.C. et al. Propriedades termofísicas dos frutos e sementes de café: determinação e modelagem. **Revista Brasileira de Armazenamento: Especial Café**, Viçosa, MG, n. 4, p.9-15, 2002.
- ANDERSEN, J. et al. Global combustion mechanisms for use in CFD modeling under oxy-fuel conditions. **Energy & Fuels**, Washington, v. 23, p. 1379-1389, Jan. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6184-1**: sistema de proteção contra explosão: parte 1, determinação dos índices de explosão dos pós combustíveis no ar. Rio de Janeiro, 2007. 14 p.
- BAI, C. et al. The explosion overpressure field and flame propagation of methane / air and methane / coal dust / air mixtures. **Safety Science**, Amsterdam, v. 49, n. 10, p. 1349-1354, Dec. 2011.
- COLLECUTT, G.; HUMPHREY, D.; PROUD, D. CFD simulation of underground coal dust explosions and active explosion barriers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CFD IN THE MINERALS AND PROCESS INDUSTRIES, 17., 2009, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: CSIRO, 2009. Disponível em: <[http://www.cfd.com.au/cfd\\_conf09/PDFs/230COL.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_conf09/PDFs/230COL.pdf)>. Acesso em: 1 fev. 2012.
- COUTO, J. L. V. **Risco no trabalho em silos e armazéns**. Seropédica: UFRRJ, 2004. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/silo.htm>>. Acesso em: 10 out. 2011.
- ECKHOFF, R. K. **Dust explosions in the process industries**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Elsevier Science, 2003. 754 p.
- \_\_\_\_\_. Dust explosion prevention and mitigation, status and developments in basic knowledge and in practical application essential tool in assessing and controlling. **International Journal of Chemical Engineering**, Cairo, v. 2009, p. 1-12, 2009. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/ijce/2009/569825/cta/>>. Acesso em: 23 mar. 2011.

- ENGINEERING tol box. Disponível em:  
<[http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html)>.  
Acesso em: 18 jan. 2012.
- FIELD, P. **Dust explosions**. Amsterdam: Elsevier Science, 1982. 183 p.
- HONG, S. et al. CFD modelling of livestock odour dispersion over complex terrain, part I: topographical modeling. **Biosystems Engineering**, London, v. 108, p.253-264, Dec. 2010.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: Wiley, 2006. 1023 p.
- KIM, Y.S. et al. Physical, chemical, and thermal characterization of wheat flour milling coproducts. **Journal of Food Process Engineering**, Westport, v. 26, n. 5, p. 469-488, Nov. 2003.
- LPGVENT. **Banco de dados do software LPGvent**. Disponível em:<<http://www.lpgvent.com/>>. Acesso em: 1 out. 2011.
- MCGUINNESS, M. J. et al. Modelling the wetting and cooking of a single cereal grain. **IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry**, Oxford, v.11,n. 1, p. 49-70, June 2000.
- PABIS, S.; JAYAS, D.S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: J. Wiley, 1998. 303p.
- SAZHIN, S. S. et al. The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations. **Fuel**, London, v. 75, n. 3, p. 289-294, Sept. 1996.
- SKJOLD, T. et al. Simulating dust explosions with the first version of desc. **Process Safety and Environmental Protection**, Rugby, v. 83, n. 2, p. 151-160, Mar. 2008.
- STANCL, J. et al. Properties of starch based foams made by thermal pressure forming. **Acta Polytechnica**, Stockholm, v.48, n.6, p.45-54, 2008.
- TANIGUCHI, M. et al. Application of lean flammability limit study and large eddy simulation to burner development for an oxy-fuel combustion system. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, New York, v. 5, n. 1, p. 111-119, July 2011.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method.** London: Longman, 1996. 270 p.

ZHANG, Q.; PANG, L.; ZHANG, S.X. Effect of scale on flame speeds of methane-air. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, New York, v. 24, n. 5, p. 705-712, June 2011.

**ANEXOS**

Exemplo de código gerado solucionado pelo ANSYS CFX 11

**LIBRARY:**

MATERIAL: Air Ideal Gas

Material Description = Air Ideal Gas (constant Cp)

Material Group = Air Data, Calorical.y Perfect Ideal Gases

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Gas

**PROPERTIES:**

Option = General Material

**ABSORPTION COEFFICIENT:**

Absorption Coefficient = 0.01 [m<sup>-1</sup>]

Option = Value

END

**DYNAMIC VISCOSITY:**

Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>]

Option = Value

END

**EQUATION OF STATE:**

Molar Mass = 28.96 [kg kmol<sup>-1</sup>]

Option = Ideal Gas

END

**REFERENCE STATE:**

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

**REFRACTIVE INDEX:**

Option = Value

Refractive Index = 1.0 [m m<sup>-1</sup>]

END

**SCATTERING COEFFICIENT:**

Option = Value

Scattering Coefficient = 0.0 [m<sup>-1</sup>]

END

**SPECIFIC HEAT CAPACITY:**

Option = Value



```
Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]
Specific Heat Type = Constant Pressure
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 2.61E-2 [W m^-1 K^-1]
END
END
MATERIAL: Ar
Material Description = Argon Ar
Material Group = Gas Phase Combustion
Option = Reacting Mixture
Reactions List = Methane Air WD1
Thermodynamic State = Gas
END
MATERIAL: CH4
Material Description = Methane CH4
Material Group = Gas Phase Combustion
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Gas
PROPERTIES:
Option = General Material
ABSORPTION COEFFICIENT:
Absorption Coefficient = 1.0 [m^-1]
Option = Value
END
DYNAMIC VISCOSITY:
Dynamic Viscosity = 11.1E-06 [kg m^-1 s^-1]
Option = Value
END
EQUATION OF STATE:
Molar Mass = 16.04 [kg kmol^-1]
Option = Ideal Gas
END
REFERENCE STATE:
Option = NASA Format
Reference Pressure = 1 [atm]
Reference Temperature = 25 [C]
END
UPPER INTERVAL COEFFICIENTS:
NASA a1 = 0.01683479E+02 []
```

```
NASA a2 = 0.01023724E+00 [K^-1]
NASA a3 = -0.03875129E-04 [K^-2]
NASA a4 = 0.06785585E-08 [K^-3]
NASA a5 = -0.04503423E-12 [K^-4]
NASA a6 = -0.01008079E+06 [K]
NASA a7 = 0.09623395E+02 []
END
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 343E-04 [W m^-1 K^-1]
END
END
MATERIAL: CO2
Material Description = Carbon Dioxide CO2
Material Group = Gas Phase Combustion
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Gas
PROPERTIES:
Option = General Material
ABSORPTION COEFFICIENT:
Absorption Coefficient = 1.0 [m^-1]
Option = Value
END
DYNAMIC VISCOSITY:
Dynamic Viscosity = 14.9E-06 [kg m^-1 s^-1]
Option = Value
END
EQUATION OF STATE:
Molar Mass = 44.01 [kg kmol^-1]
Option = Ideal Gas
END
REFERENCE STATE:
Option = NASA Format
Reference Pressure = 1 [atm]
Reference Temperature = 25 [C]
END
Option = Ideal Gas
END
REFERENCE STATE:
Option = NASA Format
```

```
Reference Pressure = 1 [atm]
Reference Temperature = 25 [C]
END
REFRACTIVE INDEX:
Option = Value
Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
SCATTERING COEFFICIENT:
Option = Value
Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = NASA Format
LOWER INTERVAL COEFFICIENTS:
NASA a1 = 0.03386842E+02 []
NASA a2 = 0.03474982E-01 [K^-1]
NASA a3 = -0.06354696E-04 [K^-2]
NASA a4 = 0.06968581E-07 [K^-3]
NASA a5 = -0.02506588E-10 [K^-4]
NASA a6 = -0.03020811E+06 [K]
NASA a7 = 0.02590233E+02 []
END
TEMPERATURE LIMITS:
Lower Temperature = 300 [K]
Midpoint Temperature = 1000 [K]
Upper Temperature = 5000 [K]
END
UPPER INTERVAL COEFFICIENTS:
NASA a1 = 0.02672146E+02 []
NASA a2 = 0.03056293E-01 [K^-1]
NASA a3 = -0.08730260E-05 [K^-2]
NASA a4 = 0.01200996E-08 [K^-3]
NASA a5 = -0.06391618E-13 [K^-4]
NASA a6 = -0.02989921E+06 [K]
NASA a7 = 0.06862817E+02 []
END
END
Option = Value
END
DYNAMIC VISCOSITY:
Dynamic Viscosity = 17.7E-06 [kg m^-1 s^-1]
Option = Value
```

```
END
EQUATION OF STATE:
  Molar Mass = 28.01 [kg kmol^-1]
  Option = Ideal Gas
END
REFERENCE STATE:
  Option = NASA Format
  Reference Pressure = 1 [atm]
  Reference Temperature = 25 [C]
END
REFRACTIVE INDEX:
  Option = Value
  Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
SCATTERING COEFFICIENT:
  Option = Value
  Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
  Option = NASA Format
LOWER INTERVAL COEFFICIENTS:
  NASA a1 = 0.03298677E+02 []
  NASA a2 = 0.01408240E-01 [K^-1]
  NASA a3 = -0.03963222E-04 [K^-2]
  NASA a4 = 0.05641515E-07 [K^-3]
  NASA a5 = -0.02444855E-10 [K^-4]
  NASA a6 = -0.01020900E+05 [K]
NASA a7 = 0.03950372E+02 []
END
TEMPERATURE LIMITS:
  Lower Temperature = 300 [K]
  Midpoint Temperature = 1000 [K]
  Upper Temperature = 5000 [K]
END
REFRACTIVE INDEX:
  Option = Value
  Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
SCATTERING COEFFICIENT:
  Option = Value
  Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
```

```
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
  Option = NASA Format
LOWER INTERVAL COEFFICIENTS:
  NASA a1 = 0.03212936E+02 []
  NASA a2 = 0.01127486E-01 [K^-1]
  NASA a3 = -0.05756150E-05 [K^-2]
  NASA a4 = 0.01313877E-07 [K^-3]
  NASA a5 = -0.08768554E-11 [K^-4]
  NASA a6 = -0.01005249E+05 [K]
NASA a7 = 0.06034738E+02 []
END
TEMPERATURE LIMITS:
  Lower Temperature = 300 [K]
  Midpoint Temperature = 1000 [K]
  Upper Temperature = 5000 [K]
END
UPPER INTERVAL COEFFICIENTS:
  NASA a1 = 0.03697578E+02 []
  NASA a2 = 0.06135197E-02 [K^-1]
  NASA a3 = -0.01258842E-05 [K^-2]
  NASA a4 = 0.01775281E-09 [K^-3]
  NASA a5 = -0.01136435E-13 [K^-4]
  NASA a6 = -0.01233930E+05 [K]
NASA a7 = 0.03189166E+02 []
END
END
END
END
REACTION: Methane Air WD1
  Additional Materials List = CH4, O2, CO2, H2O, N2
  Option = Multi Step
  Reaction Description = Methane Air Single Step
  Reactions List = Methane Oxygen WD1
END
REACTION: Methane Oxygen WD1
  Option = Single Step
PRODUCTS:
  Materials List = CO2,H2O
  Option = Child Materials
CHILD MATERIAL: CO2
  Option = Stoichiometric
```

```
    Stoichiometric Coefficient = 1.0
  END
  CHILD MATERIAL: H2O
    Option = Stoichiometric
    Reaction Order = 1.0
    Stoichiometric Coefficient = 2.0
  END
END
REACTANTS:
  Materials List = CH4,O2
  Option = Child Materials
  CHILD MATERIAL: CH4
    Option = Stoichiometric
    Stoichiometric Coefficient = 1.0
  END
  CHILD MATERIAL: O2
    Option = Stoichiometric
    Reaction Order = 1.3
    Stoichiometric Coefficient = 2.0
  END
END
END
END
FLOW:
  END
  END
END
BOUNDARY: ENTRADAS
  Boundary Type = INLET
  Location = ENTRADA
BOUNDARY CONDITIONS:
  COMPONENT: Air Ideal Gas
    Mass Fraction = 0
    Option = Mass Fraction
  END
  COMPONENT: CH4
    Mass Fraction = 0.05
    Option = Mass Fraction
  END
  COMPONENT: CO2
    Mass Fraction = 0.00038
    Option = Mass Fraction
```

```
END
COMPONENT: H2O
  Mass Fraction = 0.01
  Option = Mass Fraction
END
COMPONENT: O2
  Mass Fraction = 0.21
  Option = Mass Fraction
END
FLOW DIRECTION:
  Option = Normal to Boundary Condition
END
FLOW REGIME:
  Option = Subsonic
END
HEAT TRANSFER:
  Option = Static Temperature
  Static Temperature = 253 [C]
END
MASS AND MOMENTUM:
  Mass Flow Rate = 2 [g s^-1]
  Option = Mass Flow Rate
END
END
PARTICLE MASS FLOW RATE:
  Mass Flow Rate = 60 [g s^-1]
END
PARTICLE POSITION:
  Option = Uniform Injection
NUMBER OF POSITIONS:
  Number = 10
  Option = Direct Specification
END
END
END
END
END
DOMAIN MODELS:
BUOYANCY MODEL:
  Option = Non Buoyant
END
DOMAIN MOTION:
```

```
    Option = Stationary
END
MESH DEFORMATION:
    Option = None
END
REFERENCE PRESSURE:
    Reference Pressure = 20 [bar]
END
END
FLUID MODELS:
COMBUSTION MODEL:
    Option = Fluid Dependent
END
HEAT TRANSFER MODEL:
    Option = Fluid Dependent
END
THERMAL RADIATION MODEL:
    Option = Fluid Dependent
END
TURBULENCE MODEL:
    Option = k epsilon
END
END
COMPONENT: Air Ideal Gas
    Option = Automatic
END
COMPONENT: CH4
    Option = Automatic
END
COMPONENT: CO2
    Option = Automatic
END
COMPONENT: H2O
    Option = Automatic
END
COMPONENT: N2
    Option = Constraint
END
COMPONENT: O2
    Option = Automatic
END
HEAT TRANSFER MODEL:
```



```
    Include Viscous Work Term = Off
    Option = Total Energy
END
MORPHOLOGY:
    Option = Continuous Fluid
END
THERMAL RADIATION MODEL:
    Option = P 1
SCATTERING MODEL:
    Option = Isotropic
END
SPECTRAL MODEL:
    Option = Gray
END
END
END
PARTICLE INJECTION REGION: Particle Injection Region 1
FLUID: Po de acucar
INJECTION CONDITIONS:
    INJECTION METHOD:
        Injection Centre = 0.1 [m], 0.1 [m], 0.1 [m]
        Injection Velocity Magnitude = 1 [cm s^-1]
        Option = Sphere
    NUMBER OF POSITIONS:
        Number = 10
        Option = Direct Specification
    END
END
PARTICLE DIAMETER DISTRIBUTION:
    Diameter = 530 [micron]
    Option = Specified Diameter
END
PARTICLE MASS FLOW RATE:
    Mass Flow Rate = 60 [g s^-1]
END
END
END
END
INITIALISATION:
    Option = Automatic
```

```
INITIAL CONDITIONS:
  Velocity Type = Cartesian
  CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:
    Option = Automatic
  END
  COMPONENT: Air Ideal Gas
    Option = Automatic
  END
  COMPONENT: CH4
    Option = Automatic
  END
  COMPONENT: CO2
    Option = Automatic
  END
  COMPONENT: H2O
    Option = Automatic
  Residual Type = RMS
  END
  DYNAMIC MODEL CONTROL:
    Global Dynamic Model Control = Yes
  END
  PARTICLE CONTROL:
    PARTICLE IGNITION:
      Ignition Temperature = 400 [C]
    END
    PARTICLE INTEGRATION:
      Option = Forward Euler
    END
  END
  END
  EXPERT PARAMETERS:
    transient initialisation override = t
  END
  END
  COMMAND FILE:
    Version = 11.0
    Results Version = 11.0
  END
  EXECUTION CONTROL:
    INTERPOLATOR STEP CONTROL:
      Runtime Priority = Standard
    EXECUTABLE SELECTION:
```

```
    Double Precision = Off
END
MEMORY CONTROL:
    Memory Allocation Factor = 1.0
END
END
PARALLEL HOST LIBRARY:
HOST DEFINITION: userpc
    Remote Host Name = USER-PC
    Host Architecture String = winnt
    Installation Root = C:\Program Files\ANSYS Inc\v%\v\CFX
END
    Use Large Problem Partitioner = Off
END
MEMORY CONTROL:
    Memory Allocation Factor = 1.0
END
PARTITIONING TYPE:
    MeTiS Type = k-way
    Option = MeTiS
    Partition Size Rule = Automatic
END
END
RUN DEFINITION:
Definition File = D:/Mestrado-Engenharia de \
Sistemas/silos_disertação/dados/Dados Artigo 2/Explosão \
conico/Condições de Contorno/Milho/Metano 5/Temperatura \
inicial/253/silo1m3.def
    Interpolate Initial Values = Off
    Run Mode = Full
END
SOLVER STEP CONTROL:
    Runtime Priority = Standard
EXECUTABLE SELECTION:
    Double Precision = Off
END
MEMORY CONTROL:
    Memory Allocation Factor = 1.0
END
PARALLEL ENVIRONMENT:
    Number of Processes = 1
    Start Method = Serial
```

END  
END  
END

Dados relacionados à regressão do artigo denominado: Modelagem de explosões de pó visando análise do aumento de temperatura ocasionada pelo metano em silos de açúcar

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	17867.63	8933.817	5524.27	1.53E-46
Resíduo	37	59.83618	1.617194		
Total	39	17927.47			

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.99833
R-Quadrado	0.996662
R-quadrado ajustado	0.996482
Erro padrão	1.271689
Observações	40

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	-3.3433	0.904647	-3.69569	0.000706
Cm	11.21983	0.114555	97.94313	2.69E-46
Ti	1.084925	0.028436	38.15344	2.59E-31

Panorama de análise estatística do artigo 2 :Análise computacional da variação da temperatura mínima de ignição em explosões de pós em silos

Equação 1

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	79.84003603	3.884188979	20.55514	6.9E-31
Concentração de metano	17.75968917	0.454058361	39.11323	2.39E-48
Tamanho da partícula	0.000735593	0.002124081	0.346311	0.730178
Mínima ignição inicial	-0.075913677	0.008165474	-9.29691	9.85E-14

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.979658942
R-Quadrado	0.959731642
R-quadrado ajustado	0.957955097
Erro padrão	6.762645414
Observações	72

## ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	74118.74175	24706.2	540.223	2.42E-47
Resíduo	68	3109.869363	45.7333	6	
Total	71	77228.61111	7		

## Segunda Regressão: Equação 1 sem tamanho da partícula

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	80.19774	3.720382	21.55632	2.29E-32
Concentração de metano	17.75969	0.451153	39.36508	5.19E-49
Temperatura Mínima ignição inicial	-0.07643	0.007974	-9.5853	2.6E-14

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.979623
R-Quadrado	0.959661
R-quadrado ajustado	0.958491
Erro padrão	6.71938
Observações	72

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	74113.26	37056.63	820.7437	7.9E-49
Resíduo	69	3115.354	45.15006		
Total	71	77228.61			

Terceira Regressão: Equação 1 sem Temperatura mínima de ignição inicial

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	45.63995	1.865235	24.46874	9.9E-36
Concentração de metano	17.75969	0.679292	26.14441	1.59E-37
Tamanho da partícula	0.004376	0.003123	1.40107	0.165675

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.953178
R-Quadrado	0.908548
R-quadrado ajustado	0.905897
Erro padrão	10.11723
Observações	72

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	70165.89	35082.95	342.7466	1.45E-36
Resíduo	69	7062.721	102.3583		
Total	71	77228.61			



Quarta Regressão: Equação 1 sem Temperatura mínima de ignição inicial e concentração da partícula

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	46.39649695	1.797603	25.8102	1.71E-37
Concentração de metano	17.75968917	0.683949	25.96641	1.17E-37

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.951812025
R-Quadrado	0.905946131
R-quadrado ajustado	0.904602505
Erro padrão	10.18658056
Observações	72

## ANOVA

	Gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	69964.96	69964.96	674.2543	1.17E-37
Resíduo	70	7263.65	103.7664		
Total	71	77228.61			

## Equação 3: Regressão polinomial(regressão 4)

Parâmetros	Coefficientes	SE	H0: par=0	Pr>t
b0	48.027024	0.921712	52.106	0
b1	14.507005	1.088923	13.322	0
b2	0.685099	0.221196	3.097	0.0026
R <sup>2</sup> =99.98				

## Regressão 5: Análise de todos os componentes envolvidos no processo

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	80.30175	5.088633	15.78061	4.36E-24
Concentração de metano	17.75969	0.460814	38.53986	5.64E-47
Tamanho da partícula	0.000659	0.002243	0.293959	0.769712
Calor Específico	-8.5E-05	0.000666	-0.12774	0.898743
Peso específico	4.3E-05	0.001216	0.035388	0.971877
Temperatura Mínima				
ignição inicial	-0.07665	0.010282	-7.45519	2.5E-10

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.979665
R-Quadrado	0.959744
R-quadrado ajustado	0.956695
Erro padrão	6.863255
Observações	72

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	5	74119.73	14823.95	314.7049	1.29E-44
Resíduo	66	3108.882	47.10427		
Total	71	77228.61			