UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

VINÍCIUS AZEREDO ROCHA

EXPLOSÃO DE PÓ EM INDÚSTRIAS – ESTUDOS DE CASOS

UFRJ

Setembro de 2016

Vinícius Azeredo Rocha

Explosão de pó em indústrias – Estudos de Casos

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadores:

Andrea Medeiros Salgado, D.Sc.

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Rocha, Vinícius Azeredo

EXPLOSÃO DE PÓ EM INDÚSTRIAS – ESTUDOS DE CASOS. Vinícius Azeredo Rocha. – Rio de Janeiro, 2016

88 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2016.

Orientadores: Andrea Medeiros Salgado e Carlos André Vaz Junior.

1. Explosão de Pó em Indústrias – Estudos de Casos. 2. Acidentes envolvendo indústrias que manuseiam pó. 3. Norma Brasileira de prevenção e proteção contra explosões de pó. I. Medeiros Salgado, Andrea. (Orient.). II. Vaz Junior, Carlos André. (Orient.). III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química. IV. Título.

EXPLOSÃO DE PÓ EM INDÚSTRIAS – ESTUDOS DE CASOS

Vinícius Azeredo Rocha

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Aprovada por:

Profª. Andrea Medeiros Salgado, D.Sc. - Orientadora

Profº. Carlos André Vaz Junior, D.Sc. - Orientador

Profº. Antônio Carlos de Oliveira Ribeiro, D.Sc.

Profª. Eveline Lopes Almeida, D.Sc.

Profª. Suely Pereira Freitas, D.Sc.

Rio de Janeiro

Setembro de 2016

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus, autor da minha vida
e que sempre esteve ao meu lado.
Aos meus pais, Luís e Márcia, pelo amor, dedicação e
incansável esforço de sempre para me proporcionar o melhor.
A minha amada esposa Sara e ao meu querido filho Daniel
que, apesar das grandes batalhas que passamos, sempre
encheram meu coração de alegria e me fizeram acreditar que
tudo iria dar certo.

Porque a loucura de Deus é mais sábia do que os homens;
e a fraqueza de Deus é mais forte do que os homens;
Porque, vede, irmãos, a vossa vocação, que não são
muitos os sábios segundo a carne, nem muitos os
poderosos, nem muitos os nobres que são chamados.
Mas Deus escolheu as coisas loucas deste mundo para
confundir as sábias; e Deus escolheu as coisas fracas deste
mundo para confundir as fortes;
E Deus escolheu as coisas vis deste mundo, e as
desprezíveis, e as que não são, para aniquilar as que são;
Para que nenhuma carne se glorie perante ele.
1 Coríntios 1:25-29

Agradecimentos

Aos meus orientadores Carlos André Vaz Junior e Andrea Medeiros Salgado, os quais possuo profunda admiração e respeito.

RESUMO

ROCHA, Vinícius Azeredo**. Explosões de pó – Estudos de Casos**. Rio de Janeiro, 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

As explosões podem ceifar vidas e causar grandes prejuízos materiais. A explosão do foguete Falcon 9, ocorrida em Cabo Canaveral, na Flórida em 01 de Setembro de 2016 mostra o potencial destrutivo desse evento. Outro caso de grande repercussão mundial foi o acidente ocorrido em um parque aquático nos arredores de Taipei, em Taiwan, no dia 27 de outubro de 2015. Mais de 500 pessoas ficaram feridas quando um pó colorido, que estava sendo lançado na multidão, se inflamou.

Explosões de pó em indústrias acontecem com materiais que aparentam ser não explosivos. Em vista disso, esta dissertação apresenta estudos de explosões de pó ocorridos em duas indústrias que utilizam matérias-primas suspostamente não explosivas como o açúcar e sucatas de zircônio e titânio, e como estes acidentes poderiam ter sido evitados caso as empresas tivessem seguido as orientações da NBR 16385. A metodologia proposta neste trabalho contemplou o estudo dos incidentes ocorridos nas indústrias *Imperial Sugar* e *AL Solutions*, e como estes eventos poderiam ser mitigados caso estes empreendimentos operassem no Brasil e adotassem a NBR 16385.

Por falta de dados temporais de explosões causadas por pós combustíveis, as indústrias nacionais não foram inclusas neste estudo.

Foi possível concluir que medidas simples, como a realização adequada de limpeza prontamente ao derramamento do pó nas unidades industriais, podem prevenir perdas, tanto de vidas quanto materiais.

ABSTRACT

ROCHA, Vinícius Azeredo. **Industrial Dust Explosion – A case study**. Rio de Janeiro, 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

Explosions can cause life´s losses and great material damage. The rocket Falcon 9 explosion in Cape Canaveral, on September 2, 2016, shows the destructive potential of this event. Another high-profile case occurred in a water park on the outskirts of Taipei, Taiwan, on October 7, 2015. More than 500 people were injured when colored dust, which was being launched in the crowd, was set on fire.

Dust explosions can occur in industrial plants with materials that appear to be non-explosive. Thus, this dissertation presents a study of dust explosions occurred in two industries that uses supposed non-explosive materials such sugar and zirconium and titanium scrap, and how these accidents could have been avoided if the companies had followed the NBR 16385 guidelines. The methodology proposed in this work included the study of incidents occurred at the Imperial Sugar and AL Solutions industries, and how this events could be mitigated if these enterprise operates in Brazil and adopt the NBR 16385.

For lack of temporal data of explosions caused by dust combustibles, domestic industries were not included in this study.

It was conclude that simple measures like proper conduct cleaning promptly to the shedding of dust in industrial units, can prevent losses of lives and materials.

Lista de Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI – *American National Standards Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

CSB – *United States Chemical Safety Board*

DESC – *Dust Explosion Simulation Code*

EN – *European Standards*

ES – Severidade da Explosão

EUA – Estados Unidos da América

FLACS – *Flame Acceleration Simulator*

HMIS – *Hazard Materials Identification System*

IE – Índice de Explosividade

IEC – *International Eletrotechnical Commission*

IS – Sensibilidade da Ignição

ISO – *International Organization for Standardization*

LEL – *Lower Explosion Limit*

LFL – *Lower Flammability Limit*

LIT – *Layer Ignition Temperature*

LOC – *Limiting Oxygen Concentration*

MEC – *Minimum Explosive Concentration*

MEP – *Maximum Explosion Pressure*

MIE – *Minimum Ignition Energy*

MIT– *Minimum Ignition Temperature*

MOC – *Minimum Oxygen Concentration*

MRPR – *Maximum Rate of Pressure Rise*

MSOC – *Maximum Safe Oxygen Concentration*

NAFTA – *North American Free Trade Agreement*

NASDAQ – *National Association of Securities Dealers Quotations System*

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NFPA – *National Fire Protection Association*

OSHA – *Occupation Safety and Health Administration*

TF – *Flash Point*

TI – Temperatura de autoignição

TNO – Método Multienergia

TNT – Trinitrotolueno

UFL – *Upper Flammability Limit*

UEL – *Upper Explosion Limit*

VDI – *Verein Deutscher Ingenieure*

Lista de Figuras

Figura 1 - Incidentes causados por incêndio ou explosão de pós-combustíveis no período de 1980 a 2005 nos Estados Unidos..... 2

Figura 2 – Contribuição de diferentes setores no número total de incêndios ou explosões causadas por pós combustíveis nos Estados Unidos. 3

Figura 3 - Triângulo do fogo. 6

Figura 4 - Pentágono do Fogo. 7

Figura 5 - Relações entre as várias propriedades de inflamabilidade. 8

Figura 6 - Comparação entre detonação e deflagração..... 11

Figura 7 - Explosão de gás em uma área parcialmente confinada. 12

Figura 8 - Ilustração do princípio do teste de sensibilidade da queda do martelo..... 13

Figura 9 - Conversão da distância em sobrepressão relativa 14

Figura 10 - Ilustração de como a taxa de combustão de uma dada massa de combustível sólido aumenta com o aumento da subdivisão do material. 17

Figura 11 - Ilustração do aumento da área específica de um sólido com aumento da subdivisão. 18

Figura 12 - Esquema mostrando o caminho da explosão de pó. 19

Figura 13 - Variação de concentrações de nuvens de pó no ar à temperatura ambiente e pressão atmosférica de um típico pó orgânico natural (amido de milho)..... 26

Figura 14 - Uma camada de 1 mm de pó com densidade de 500 kg/m^3 (a) gera uma nuvem de concentração de 100 g/m^3 se dispersa em uma sala de 5 m de altura (b). Dispersão parcial de 1 m gera 500 g/m^3 (c)..... 26

Figura 15 - Influência da concentração de oxigênio na pressão máxima de explosão e na taxa máxima de aumento de pressão para diferentes concentrações de pó de carvão. 28

Figura 16 - Gráfico típico do ensaio de explosões de pó para a determinação de P e dP/dt. 32

Figura 17 - Explosão Secundária de pó resultante de uma explosão primária..... 37

Figura 18 - Primeiro andar dos edifícios de empacotamento da Imperial Sugar. 47

Figura 19 - Túnel abaixo dos silos. 48

Figura 20 - Silos de abastecimento de açúcar da Imperial Sugar. 48

Figura 21 - Esteiras transportadoras de açúcar localizadas abaixo dos silos da fábrica Imperial Sugar. Substancial acúmulo de açúcar na esteira e no piso..... 49

Figura 22 - Explosão na Imperial Sugar (Imagens retiradas do vídeo de segurança da Georgia Ports Authority)..... 51

Figura 23 - Parede de tijolos arremessadas para dentro do prédio de empacotamento da Imperial Sugar. 53
Figura 24 - Lajes de concreto de 3 polegadas de espessura retiradas dos seus suportes de aço pela pressão causada pelas ondas de pressão. 54
Figura 25 - Planilha presente no software DESC. 55
Figura 26 - Câmara SIWEK. 56
Figura 27 - Componentes da câmara de SIWEK. 56
Figura 28 - Construção do modelo da refinaria da Imperial Sugar. 57
Figura 29 - Imagem CASD (visão frontal 3D) da refinaria da Imperial Sugar com os painéis de alívio de pressão (PPs). Fonte: Adaptado de ABUSWER (2012) 57
Figura 30 - Imagem CASD (visão traseira 3D) da refinaria da Imperial Sugar com os painéis de alivio de pressão (PPs). Fonte: Adaptado de ABUSWER (2012) 58
Figura 31 - Vista lateral da distribuição dos módulos na geometria da refinaria da Imperial Sugar. 58
Figura 32 - Representação no DESC dos 3700 m3 dos silos interconectados e os pontos de monitoramento (M1 - M80) na refinaria da Imperial Sugar. 59
Figura 33 - Simulação de pressão no DESC a partir da vista superior do primeiro andar, Módulo (2,1) da explosão da refinaria da Imperial Sugar. 60
Figura 34 - Simulação de pressão no DESC a partir da vista superior do segundo andar, Módulo (2,2) da explosão da refinaria da Imperial Sugar. 61
Figura 35 - Simulação de pressão no DESC a partir da vista superior do terceiro andar, Módulo (2,3) da explosão da refinaria da Imperial Sugar. 61
Figura 36 - Simulação de pressão no DESC a partir da vista superior do quarto andar, Módulo (2,4) da explosão da refinaria da Imperial Sugar. 62
Figura 37 - Simulação pressão/tempo dos pontos de monitoramento no primeiro andar, Modulo (2,1), da explosão da refinaria da Imperial Sugar. 63
Figura 38- Simulação pressão/tempo dos pontos de monitoramento no segundo andar, Modulo (2,2), da explosão da refinaria da Imperial Sugar. 63
Figura 39 - Simulação pressão/tempo dos pontos de monitoramento no terceiro andar, Modulo (2,3), da explosão da refinaria da Imperial Sugar. 64
Figura 40 - Simulação pressão/tempo dos pontos de monitoramento no quarto andar, Modulo (2,4), da explosão da refinaria da Imperial Sugar. 64
Figura 41 - Vista aérea da planta da AL Solutions (New Cumberland), 2010. 70
Figura 42 - Amostra de sucata de titânio usada na AL Solutions. 71
Figura 43 - Diagrama simplificado do processo de prensagem da planta de New Cumberland. 72

Figura 44 - Amostras dos discos compactados de zircônio. 73
Figura 45 - Galpão de produção momentos após a explosão da AL Solutions. 74
Figura 46 - Layout do galpão de produção, provável ponto de início do incidente e locais onde se encontravam os trabalhadores feridos e falecidos no momento da explosão da AL Solutions. 75
Figura 47 - Teto da sala de mistura e prensagem da AL Solutions. 76
Figura 48 - Sequência de eventos que resultaram na explosão de pó na planta da AL Solutions. 1) Utilização de um misturador para processamento do zircônio. 2) As lâminas do misturador atingem a parede de lateral, o que pode ter gerado faíscas. 3) As faíscas causam a ignição do pó de zircônio. 4) A explosão inicial dispersou no ar outros pós presentes na planta causando explosão secundária. 76
Figura 49 - Escoreamento, destacado em amarelo, e estufamento da parede lateral do misturador da AL Solutions. Fonte: CSB (2010). 77
Figura 50 - Misturador, parede adjacente e teto do AL Solutions após a explosão. 78
Figura 51 - Tambores de particulados de zircônio e titânio próximos ao misturador da AL Solutions. 79

Lista de Quadros

Quadro 1 – Efeito sobre as pessoas. 15

Quadro 2 – Efeito sobre as estruturas. 16

Quadro 3 - Calor de combustão (oxidação) de várias substâncias por mol de O_2 consumido. .. 21

Quadro 4 - Importantes parâmetros de explosão de pó. 24

Quadro 5 - Classificação da explosão de acordo com o índice de deflagração. 33

Quadro 6 - Inertização de nuvens de pó, misturando o pó combustível com pó inerte. 35

Quadro 7 - Número de trabalhadores acidentados, falecidos e ilesos na explosão da refinaria da Imperial Sugar. Fonte: Adaptado de ABUSWER (2012)..... 52

Quadro 8 - Valores de pressão de abertura dos painéis de pressão e suas dimensões na geometria da refinaria da Imperial Sugar. Fonte: Adaptado de ABUSWER (2012) 59

Quadro 9 - Dados de entrada no DESC para a geometria da Imperial Sugar. 59

Quadro 10 - Quadro de conversão das porcentagens em Probit dado no interior do quadro. . 65

Quadro 11 - Porcentagem de danos Probit causados pela sobrepressão no Módulo (2,1). 65

Quadro 12 - Porcentagem de danos Probit causados pela sobrepressão no Módulo (2,2). 66

Quadro 13 - Porcentagem de danos Probit causados pela sobrepressão no Módulo (2,3). 66

Quadro 14 - Porcentagem de danos Probit causados pela sobrepressão no Módulo (2,4). 66

Sumário

Dedicatória v
Agradecimentos vii
RESUMO viii
ABSTRACT ix
Lista de Siglas x
Capítulo 1 - Introdução 1
Capítulo 2 - Objetivo 5
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica 6
3.1. Fogo 6
3.2. Explosão 8
3.3. Deflagração e Detonação 10
3.4. Métodos de quantificação da energia liberada em explosões 12
3.4.1. Teste de Sensibilidade da Queda do Martelo 12
3.4.2. Método Simplificado 13
3.4.3. Método do TNT Equivalente 14
3.4.4. Método Multienergia – TNO 15
3.4.5. Método do *Shock Wave* – TNO 15
3.4.6. Efeitos sobre as pessoas e estruturas 15
3.5. Explosão de pó 16
3.6. Fatores que influenciam a sensibilidade de ignição e a violência de explosão de pós 19
3.7. Processos industriais que podem causar explosões de pó 19
3.8. Diferenças entre Explosão de Pó e Explosão de Gás 22
3.9. Fatores que influenciam a explosividade dos pós 23
3.9.1. Tamanho da partícula 24
3.9.2. Concentração do pó 25
3.9.3. Concentração de Comburente (oxidante) 27
3.9.4. Temperatura de ignição 28
3.9.5. Turbulência da nuvem de pó 29
3.9.6. Taxa máxima de aumento de pressão e índice de deflagração 31
3.9.7. Concentração da mistura de pó com inerte 34
3.9.8. Presença de gases inflamáveis 35
3.9.9. Efeito Dominó 36
3.9.9.1. Explosões Primárias 36
3.9.10. Explosões Secundárias 36
3.10. Prevenção contra explosões de pó 38

3.11. Simulação de explosão de pó 40
Capítulo 4 – Normas NFPA e ABNT para evitar explosões de pó 41
4.1. NFPA 41
4.2. ABNT 42
Capítulo 5 – Estudos de casos 43
5.1. A *Imperial Sugar Company* 43
5.1.1. O processo 44
5.1.2. Edifício de Empacotamento 49
5.1.3. O acidente 50
5.1.4. As causas do acidente 52
5.1.5. Simulação da sobrepressão gerada durante o acidente 54
5.1.6. Recomendações da Norma Técnica Brasileira de prevenção contra incêndios e explosões aplicadas à *Imperial Sugar* 67
5.2. *AL Solutions* 70
5.2.1. O Processo 71
5.2.2. O Acidente 73
5.2.3. Fatores contribuintes para o acidente 76
5.2.4. Prevenção de acidentes na *AL Solutions* 78
5.2.5. Recomendações da Norma Técnica Brasileira de prevenção contra incêndios e explosões aplicadas à *AL Solutions* 81
6. Conclusões e sugestões 84
Bibliografia 85

Capítulo 1 - Introdução

Explosões em material particulado ou nuvens de pó, embora muitas vezes desconsideradas em análises preliminares de risco, são eventos severos, podendo causar mortes e ferimentos graves, além de danos a equipamentos e interrupção da produção, causando impacto econômico negativo. Essas explosões podem ocorrer quando formam-se nuvens de pó na presença de uma fonte de ignição. Nuvens de pó podem ser geradas em diversos processos industriais, seja na linha de produção, durante o armazenamento, ou durante a etapa de transporte. Por outro lado, diversas fontes de ignição estão frequentemente presentes em ambientes industriais, incluindo faíscas elétricas, fricção, superfícies quentes, entre outras (ECKHOFF, 2003).

O primeiro relato de explosão de pó data de 1785, e teria ocorrido no depósito de farinha de uma padaria em Turim, Itália. Um empregado trabalhava alimentando uma peneira de trigo com uma pá. A operação promoveu a formação de uma nuvem de pó de trigo, que teria se incendiado ao entrar em contato com uma lamparina que iluminava o local (ECKHOFF, 2003).

Um dos primeiros registros detalhados de acidente de elevada gravidade ocorreu em 1807, na cidade de *Leiden*, Holanda (ABBASI, T.; ABBASI, S, 2006). Um navio com cerca de 85.000 kg de pólvora a bordo, vindo de cidade de holandesa de *Ouderkerk*, atracou em *Leiden*. Acredita-se que a tripulação, ao tentar preparar sua comida em um fogão, inflamou o pó de pólvora, causando uma explosão equivalente à detonação de 9.000 kg de trinitrotolueno (TNT). Segundo os autores, a explosão matou 151 pessoas e feriu cerca de 2000. As casas que se encontravam a até 155 metros da embarcação foram destruídas. Inúmeras pessoas que estavam na cidade foram atingidas pelos destroços da explosão.

Em 1835, Michael Farady demonstrou o papel fundamental da presença de pó de carvão em uma explosão ocorrida em uma mina na cidade de *Haswell*, Inglaterra (AMYOTTE, 2014).

Em 1919, uma explosão de pó ocorreu em uma fábrica de processamento de milho em *Iowa*, nos Estados Unidos, matando 43 pessoas. Cinco anos depois, uma nova explosão de pó em uma fábrica similar, em outro estado americano, vitimou 42

trabalhadores (VIJAYARAGHAVAN, 2004). No Canadá, em 1949, uma explosão causada por pó de grãos em um elevador de carga matou 6 pessoas e feriu 14 (THEIMER, 1973).

Segundo o CSB (2006), de 1980 até 2005 ocorreram 281 acidentes envolvendo pó combustível apenas nos Estados Unidos. Estes eventos mataram 119 pessoas e deixaram 718 feridos. A Figura 1 ilustra a quantidade de eventos por ano, assim como seus efeitos (feridos e óbitos).

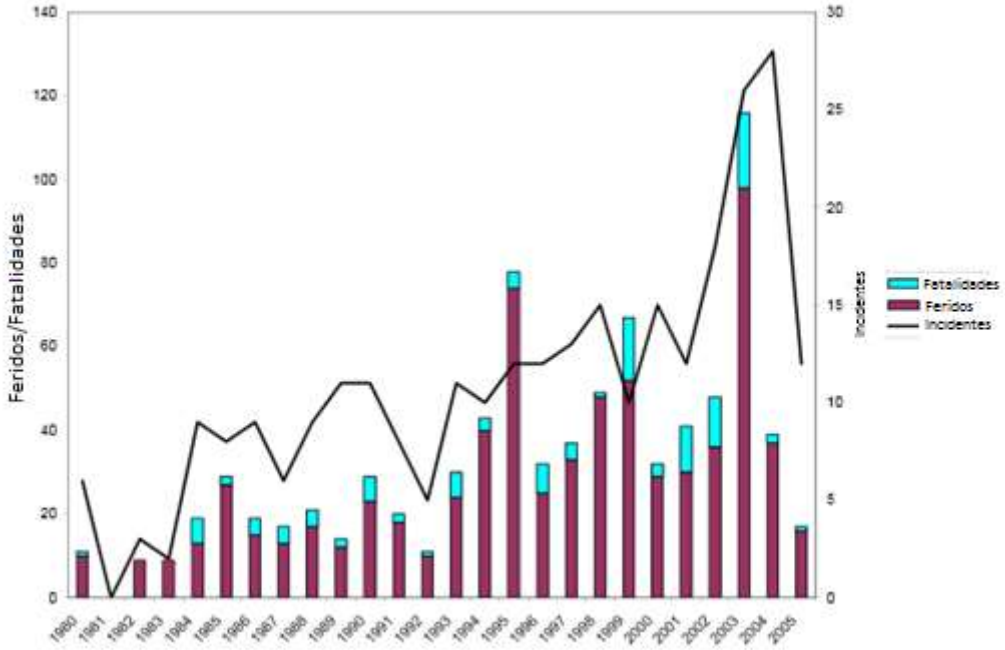

Figura 1 - Incidentes causados por incêndio ou explosão de pós-combustíveis no período de 1980 a 2005 nos Estados Unidos.
Fonte: Adaptado de CSB (2006)

O CSB, em estudo realizado em 2006 a respeito do perigo dos pós combustíveis, investigou também os setores mais afetados por incêndios ou explosões de pós nos Estados Unidos. Neste levantamento destacaram-se os setores de alimentos, madeira e produtos químicos, conforme Figura 2.

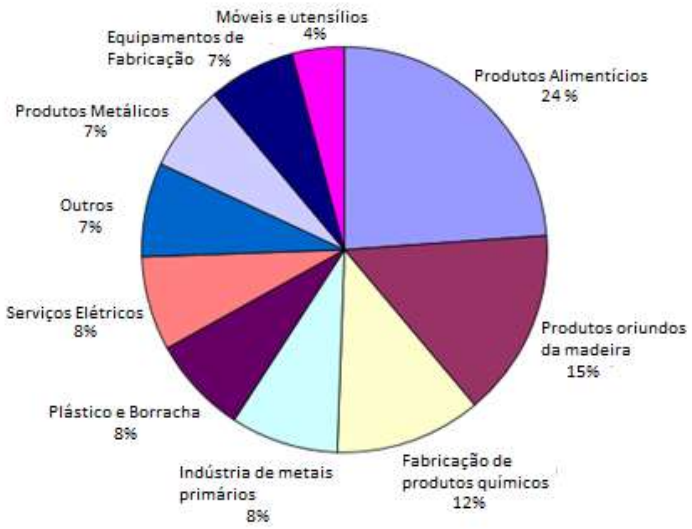

Figura 2 – Contribuição de diferentes setores no número total de incêndios ou explosões causadas por pós combustíveis nos Estados Unidos.
Fonte: Adaptado de CSB (2006)

No Brasil os relatos registrados de explosões de pó também estão relacionados ao setor alimentício, especialmente em relação à armazenagem de grãos. Pode-se citar a explosão ocorrida em um silo vertical no Porto de Paranaguá, Curitiba (PR), em janeiro de 1992, onde dois trabalhadores faleceram e cinco ficaram feridos. A causa provável teria sido a combustão de pó de cevada. A explosão ocorreu durante a operação de limpeza no décimo andar de um silo de 13 andares e 55 metros de altura (RANGEL, 2007).

Em junho de 1993, ocorreu explosão em um túnel de expedição de grãos da Cooperativa Agrícola Vale do Piqueri, em Assis Chateaubriand (PR) (MORAES, 2010). A explosão arrancou o túnel do subsolo, lançando-o a mais de um metro no ar, deixando uma cratera de mais de 40 metros de diâmetro. Quatro homens que trabalhavam no setor de expedição morreram. A explosão teria sido provocada pelo contato de uma suspensão de pó de milho, transportado pelo túnel, com uma faísca elétrica.

Em novembro de 2001 uma explosão no depósito da empresa Coimbra, responsável pelo armazenamento de grãos do Corredor de Exportação do Porto de Paranaguá (PR), deixou 18 pessoas feridas (MORAES, 2010). Na época foi constatado que o acidente foi causado por limpeza deficiente nas esteiras que transportavam os grãos. Cerca de cinco mil toneladas de milho eram estocadas no local.

No Brasil, até 2015, não existia norma que tratava especificamente sobre explosão de pó. O que se utilizava eram normas acessórias ao tema, como a NBR ISO 6184 (Sistema de proteção contra explosão) que trata da determinação dos índices de explosão de misturas ar/combustível, pós e gases combustíveis no ar, além da determinação da eficácia dos sistemas de supressão de explosões. Normas estrangeiras, como as americanas, inglesas e alemãs, eram utilizadas por empresas que já possuíam certa cultura de prevenção contra explosões.

Em julho de 2015 foi lançada a norma NBR 16385 (Sistemas de prevenção e proteção contra explosão – Fabricação, processamento e manuseio de partículas sólidas combustíveis – Requisitos), que trata do sistema de prevenção e proteção contra incêndios de pós em instalações industriais que manuseiam partículas sólidas combustíveis. De acordo com Antony Brown, um dos membros do comitê responsável pela criação da norma, mesmo que as instruções da NBR 16385 não sejam obrigatórias, ela torna-se imprescindível em determinado contexto pois, se a norma for citada em alguma norma regulamentadora (NR), ela passa automaticamente a ser lei em âmbito federal. Se a NBR 16385 for citada em uma Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros, ela deverá ser cumprida. Além disso, ainda de acordo com Antony Brown, em caso de explosões, a partir da investigação do Ministério Público, o procurador vai querer saber se há normas, sejam nacionais ou estrangeiras e, nesse caso, indagando o porquê de não ter sido obedecido os requisitos de prevenção e proteção (SOBRAL, 2016).

Tendo em vista o grande número de acidentes envolvendo explosões de pó, foi considerado importante divulgar nesse estudo dois importantes eventos que abrangem este tipo de explosão, alertando a facilidade com que eles ocorrem e a falta de comprometimento e planejamento operacional das empresas em cumprir as orientações e normas dos órgãos competentes de cada país.

No Brasil, não é dada a devida importância ao assunto, pois a maior parte das explosões trata-se de produtos alimentícios que em geral não são considerados, erroneamente, potenciais combustíveis.

Capítulo 2 - Objetivo

Esta dissertação tem como objetivo geral analisar explosões de pó em indústrias, assim como as orientações das normas existentes a respeito do assunto.

Os objetivos específicos são: i) apresentar os conceitos de fogo e explosão, ii) apresentar o caso do acidente na empresa *Imperial Sugar*, os fatores que levaram à explosão, apresentação da norma técnica 16385 e como a explosão poderia ter sido evitada se seguidas as orientações desta norma técnica e iii) apresentar o caso do acidente na empresa *AL Solutions*, as etapas do processo para a produção de discos de titânio e zircônio, os fatores que levaram à explosão, e como a explosão poderia ter sido evitada se seguidas as orientações da norma técnica 16385.

No capítulo 3 uma revisão a respeito de explosões de pó é apresentada.

No capítulo 4 é apresentada a Associação Norte-Americana de Combate ao Incêndio (NFPA) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

No capítulo 5 é feita uma apresentação da refinaria de açúcar da *Imperial Sugar* a da empresa *AL Solutions*. Estão inseridos neste capítulo a descrição dos acontecimentos que levaram a explosão das duas fábricas, a apresentação da norma técnica 16385 e um estudo de como essas explosões seriam evitadas caso ambas as empresas tivessem adotadas certas orientações desta norma.

No capítulo 6 são apresentadas as discussões e as conclusões desta dissertação.

Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica

3.1. Fogo

Fogo é a reação química na qual um combustível se combina com comburente (em geral oxigênio), sendo liberada energia. Existem três condições essenciais para haver o fogo: (1) combustível, (2) comburente e (3) calor. Essas condições essenciais são usualmente dispostas no tradicional "triângulo do fogo" (Figura 3). Se uma destas condições não está presente, o fogo não ocorre. Se uma delas é removida, o fogo é extinto (LEES, 1996).

Figura 3 - Triângulo do fogo.
Fonte: Adaptado de AMYOTTE e ECKHOFF (2010).

De acordo com LEES (1996), o fogo normalmente cresce e se espalha por queima direta, o que resulta do impacto da chama em materiais combustíveis, por transferência térmica ou por meio de viagens de material queimado.

A expansão do triangulo do fogo é conhecida como "pentágono da explosão" (Figura 4) por incluir a mistura do combustível com o comburente e o confinamento da mistura. O primeiro destes componentes adicionais ilustra a diferença entre as explosões de pó e de gás – a presença de um combustível sólido ao invés de um combustível gasoso. As explosões de gases, portanto, envolvem um sistema homogêneo no qual pequenas entidades de combustível e ar estão separadas somente por distâncias moleculares. A mistura completa de combustível e oxidante é facilmente alcançada e os efeitos gravitacionais são desprezíveis (AMYOTTE e ECKHOFF, 2010).

Entretanto, na mistura pó/ar, as partículas de pó são fortemente influenciadas pela gravidade; um pré-requisito essencial para a explosão de pó é a formação de uma

suspensão pó/oxidante. Uma vez que a explosão desta mistura pó/ar ocorre, o confinamento (parcial ou completo) permite o desenvolvimento de uma sobrepressão, o que causa uma queima rápida do pó que acarreta em uma transição para uma explosão de pó (ECKHOFF, 2003).

Figura 4 - Pentágono do Fogo.
Fonte: Adaptado de AMYOTTE e ECKHOFF (2010).

Um material inflamável queima no ar somente sob uma faixa limitada de composição. Abaixo de certa concentração de combustível, conhecida como limite inferior de inflamabilidade (**LFL** – *Lower Flammability Limit*) ou limite inferior de explosividade (**LEL** – *Lower Explosion Limit*), a mistura é demasiadamente pobre para queima. Por outro lado, acima de certa concentração de combustível, conhecida como limite superior de inflamabilidade (**UFL** – *Upper Flammability Limit*) ou limite superior de explosividade (**UEL –** *Upper Explosion Limit*), a mistura é demasiadamente rica para queimar. As concentrações entre esses limites constituem a faixa, ou região, de inflamabilidade. Os valores de LFL e UFL são geralmente estabelecidos para condições atmosféricas. Um aumento na quantidade de oxigênio disponível tende a aumentar o UFL. Observa-se ainda que um aumento da temperatura amplia a gama de inflamabilidade (LFL se torna menor e UFL aumenta). Fatores como a direção da propagação da chama e outras condições também afetam os limites de inflamabilidade (LEES, 1996).

Outras variáveis comuns ao estudo do fogo são definidas por LEES (1996), como o ponto de fulgor ou flash point (**TF**) que representa a temperatura mínima em que um líquido começa a desprender vapores em concentração suficiente para que, se

entrarem em contato com fonte de ignição, sofrerem ignição. Nesse caso as chamas não se sustentam, por não existirem vapores suficientes. Já o ponto de combustão (*fire point*) é definido como a menor temperatura em que os vapores continuaram a queimar após a ignição. A temperatura de *Fire Point* mostra-se alguns graus acima da temperatura de *Flash Point*. Por outro lado a temperatura de autoignição (**TI**) é a temperatura mínima na qual gases desprendidos de um material combustível se inflamam pelo simples contato com o oxigênio no ar.

A Figura 5 apresenta um diagrama da concentração versus temperatura tendo sido proposto por CROWL (2003). O gráfico ilustra como várias dessas propriedades se relacionam.

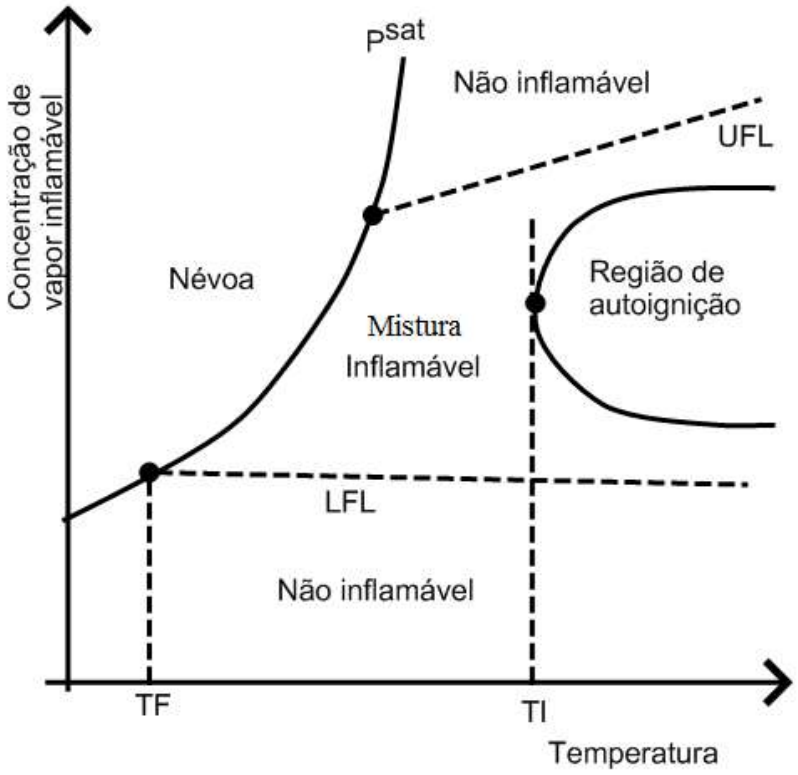

Figura 5 - Relações entre as várias propriedades de inflamabilidade.
Fonte: Adaptado de CROWL (2003).

3.2. Explosão

Várias são as definições de explosão existentes na literatura. Segundo Martin, Reza e Anderson (2000), explosão é um fenômeno resultante de uma liberação súbita de energia. A fonte exata desta energia é secundária; podendo originar-se por exemplo de um explosivo, como pólvora, vapor pressurizado ou mesmo de farinha de trigo. De

acordo com a norma 921 da NFPA (*National Fire Protection Association*), explosão é a conversão súbita de energia potencial (química ou mecânica) em energia cinética, com a produção e liberação de gases sob pressão, ou com somente a liberação de gases. Os gases sob alta pressão realizam trabalho mecânico como movimentar, alterar ou fragmentar os materiais nas redondezas. A norma 6184-1, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT, 2007) define explosão como a propagação de uma chama em uma pré-mistura de gases combustíveis, pó(s) em suspensão, vapor(res) combustíveis, névoa(s), em um oxidante gasoso como o ar, em um vaso fechado ou substancialmente fechado. Para CASHDOLLAR e HERTZBERG (1987), uma explosão é um fenômeno gás-dinâmico caracterizado por um aumento tão rápido em um sistema de pressão que forças destrutivas são geradas. Essas forças podem danificar ou destruir estruturas e expor pessoas ao perigo. LEES (1996) define explosão como uma liberação repentina e violenta de energia, sendo a violência da explosão dependente da taxa na qual a energia é liberada. A energia que pode ser liberada em uma explosão é basicamente dividida em três tipos (física, química e nuclear). Para Crowl e Louvar (2001), a explosão resulta de uma rápida liberação de energia. Esta energia é então dissipada por uma variedade de mecanismos, incluindo a formação de ondas de pressão, projécteis, radiação térmica e energia acústica. Segundo SILVA (2007), explosão é o resultado de uma reação físico-química, na qual a velocidade extremamente alta é acompanhada por brusca elevação de pressão e temperatura, devido ao fato da energia liberada pela reação ocorrer em um intervalo de tempo muito curto para ser dissipada na medida da sua produção, propaga-se rapidamente através do meio (ar ou água) provocando variações da pressão, que formam a onda explosiva.

Segundo LEES (1996), explosões em indústrias de processos causam menos acidentes graves do que o fogo. Quando ocorrem, no entanto, muitas vezes infligem maior perda de vidas e danos. A explosão é geralmente considerada como tendo um potencial maior de desastre que o fogo, contudo tendem a ser menos severas que as liberações tóxicas.

Torna-se claro que algumas características são consistentes através das definições do termo “explosão”. Rápida expansão dos gases ou rápido aumento na

pressão do gás e a liberação ou transformação da energia de maneira violenta (MARTIN, REZA e ANDERSON, 2000).

3.3. Deflagração e Detonação

De acordo com LEES (1996), a velocidade de propagação de uma chama durante uma explosão (velocidade com que a frente da chama se desloca através da mistura ar combustível, inflamando a região ainda não queimada) pode ser classificada em dois tipos: Deflagração e Detonação. Na deflagração a mistura inflamável queima relativamente devagar. Para misturas de ar-hidrocarbonetos a velocidade de deflagração típica é da ordem de 1 m/s.

A detonação é um pouco diferente. Na detonação a frente da chama viaja como uma onda de choque seguida bem de perto por uma onda de combustão que libera energia para manter a onda de choque. No estado estacionário a frente da detonação atinge uma velocidade igual à velocidade do som para os produtos quentes da combustão e, portanto, maior que a velocidade do som na mistura ainda não queimada. Para misturas ar-hidrocarbonetos a velocidade de detonação típica é da ordem de 2000-3000 m/s. A título de comparação, a velocidade do som no ar a 0°C é de 330 m/s (LEES, 1996).

A detonação gera pressões maiores e é mais destrutiva que a deflagração (LEES, 1996). A deflagração, por si só, não gera ondas de choque, pois a mesma é, por definição, uma onda subsônica de combustão. A natureza subsônica de uma deflagração é um dos principais motivos pelos quais as testemunhas de uma deflagração tendem a relatar um som diferente (“pancada” ou “ruído”) em relação às testemunhas de uma detonação (MARTIN, REZA e ANDERSON, 2000).

De acordo com CROWL e LOUVAR (2001), as frentes de pressão produzidas por detonações e deflagrações possuem características marcantes e distintas. Uma detonação produz uma onda de choque, com aumento abrupto de pressão (superior a 10 atm) e de duração total menor que 1 milissegundo.

A frente de pressão resultante de uma deflagração é temporalmente mais ampla (possui muitos milissegundos de duração), lisa (sem uma onda de choque

abrupta), e com uma pressão máxima (tipicamente de 1 ou 2 atm) muito menor do que a pressão máxima de uma detonação (Figura 6) (CROWL e LOUVAR, 2001).

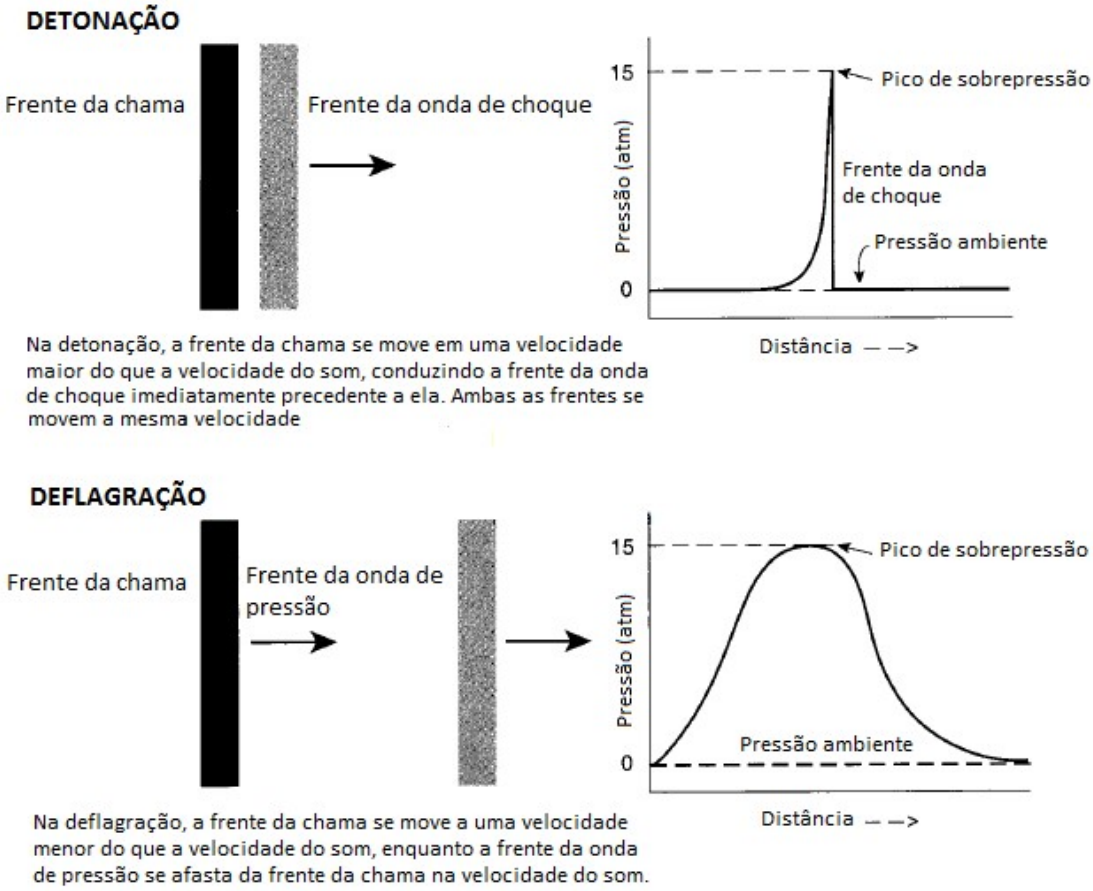

Figura 6 - Comparação entre detonação e deflagração.
Fonte: Adaptado de CROWL e LOUVAR (2001).

Em uma explosão acidental de uma nuvem de ar-hidrocarboneto (inflamada por uma fonte de ignição) a chama irá iniciar-se normalmente como uma chama lenta em escoamento laminar com velocidade na ordem de 3-4 m/s. Se a nuvem se encontrar desobstruída e livre de confinamento, a chama provavelmente irá atingir velocidades superiores a 20-25 m/s, e a sobrepressão poderá ser negligenciada. Em construções ou em módulos *offshore* com equipamentos de processo, como mostrado esquematicamente na Figura 7, a chama poderá atingir centenas de metros por segundo. Quando o gás está queimando, a temperatura irá aumentar, e o gás expandirá por um fator acima de 8 ou 9. O gás não queimado é, portanto, empurrado à frente da chama, e um campo de escoamento turbulento é gerado. Quando a chama se propaga em um campo de escoamento turbulento, a taxa efetiva de queima

aumentará, e a velocidade de escoamento e a turbulência à frente da chama aumentarão por consequência. Este forte mecanismo de realimentação positiva é causador da aceleração da chama e aumento da pressão da explosão e, em alguns casos, ocasiona a transição de uma deflagração em uma detonação (BJERKETVEDT, BAKKE e WINGERDEN, 1997).

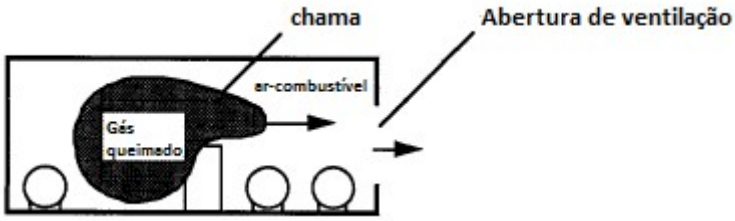

Figura 7 - Explosão de gás em uma área parcialmente confinada.
Fonte: Adaptado de BJERKETVEDT, BAKKE e WINGERDEN (1997).

3.4. Métodos de quantificação da energia liberada em explosões

Diversos métodos são utilizados para estimar a função pressão-tempo gerada a partir de uma explosão a uma determinada distância da origem. Alguns métodos levam em conta o efeito da turbulência, local da explosão, riqueza da mistura, entre outros fatores. Outros fazem considerações simplificadas que reduzem sensivelmente o tempo de obtenção da resposta (SILVA, 2007).

3.4.1. Teste de Sensibilidade da Queda do Martelo

A sensibilidade ao impacto de explosivos sólidos, líquidos ou gelatinosos é testado pelo método da queda do martelo. O princípio deste método é ilustrado na Figura 8 (ECKHOFF, 2016)

Ainda de acordo com ECKHOFF (2016), as amostras dos explosivos são submetidas à ação da queda de pesos com diferentes massas. O parâmetro a ser determinado é a altura da queda, para um peso de determinada massa específica, em que uma quantidade suficiente de energia de impacto é transmitida para a amostra de modo a decompô-la ou explodi-la. A *US Bureau of Mines* desenvolveu dois padrões de procedimentos para o teste de sensibilidade da queda do martelo ligeiramente diferentes. Se a amostra for sólida, 0,020 g da mesma é testada utilizando uma massa fixa de 2 kg para o martelo. O resultado é a altura mínima à qual pelo menos um dos 10 ensaios repetidos resulta na explosão. A amostra do explosivo a ser testada é

mantida entre duas superfícies planas paralelas de aço endurecido, tal como ilustrado na Figura 8.

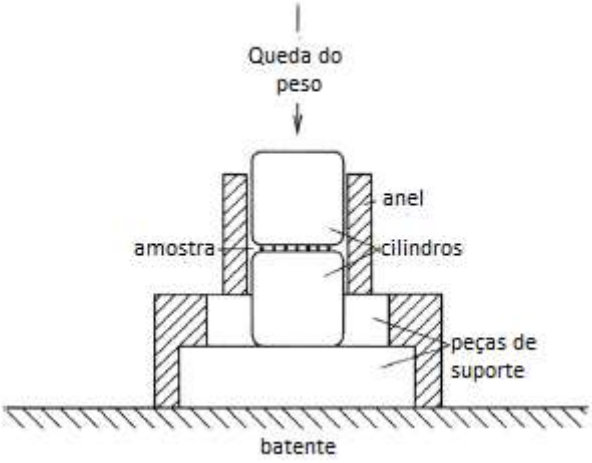

Figura 8 - Ilustração do princípio do teste de sensibilidade da queda do martelo.
Fonte: Adaptado de ECKHOFF (2016)

No caso de amostras líquidas, o mesmo procedimento realizado para amostras sólidas é utilizado, porém com as seguintes modificações (ECKHOFF, 2016):

- A massa do explosivo testada é de 0,007 g;
- Um disco dessecado de papel filtro, saturado com o líquido a ser testado, é colocado no batente, onde um êmbolo é baixado sobre a amostra de papel filtro.

3.4.2. Método Simplificado

De acordo com SILVA (2007), para a obtenção das pressões geradas a partir de uma detonação de um explosivo sólido, um dos métodos mais simples utilizados e, possivelmente, um dos mais difundidos, é o "Método Simplificado". Este faz uso de ábacos e gráficos que fornecem parâmetros em função da distância em escala (Z), que representa a Lei de escala para explosivos sólidos, conhecida como "*Hopkinsin-Cranz law of blast scaling*", de acordo com a equação 3.1:

$$Z = R/W^{1/3} \tag{3.1}$$

Onde R é a distância, e W a quantidade de explosivo.

A aplicação deste método é bem simples, pois, uma vez calculada a distância em escala, basta fazer a leitura direta da variável de interesse.

3.4.3. Método do TNT Equivalente

O método do "TNT equivalente" está baseado na correlação entre a explosão de uma certa massa de TNT (Trinitrotolueno). Explosões de TNT foram amplamente estudadas, e possuem diversas representações gráficas e analíticas para o levantamento de diferentes parâmetros. A massa de TNT equivalente é definida pela equação 3.2:

$$W_{TNT} = \frac{\eta M E_c}{E_{TNT}} \tag{3.2}$$

Onde:

η = eficiência da explosão do hidrocarboneto;

M = massa de hidrocarboneto (kg);

E_c = calor de combustão do gás inflamável (kJ/kg);

E_{TNT} = calor de combustão do TNT (4437-4765 kJ/kg).

Uma vez encontrada a *massa equivalente de TNT* (W_{TNT}), utiliza-se a equação (3.1), da Lei de escala, para definir a distância em escala (Z). A partir desta etapa, é possível converter a distância em escala em sobrepressão relativa através da Figura 9.

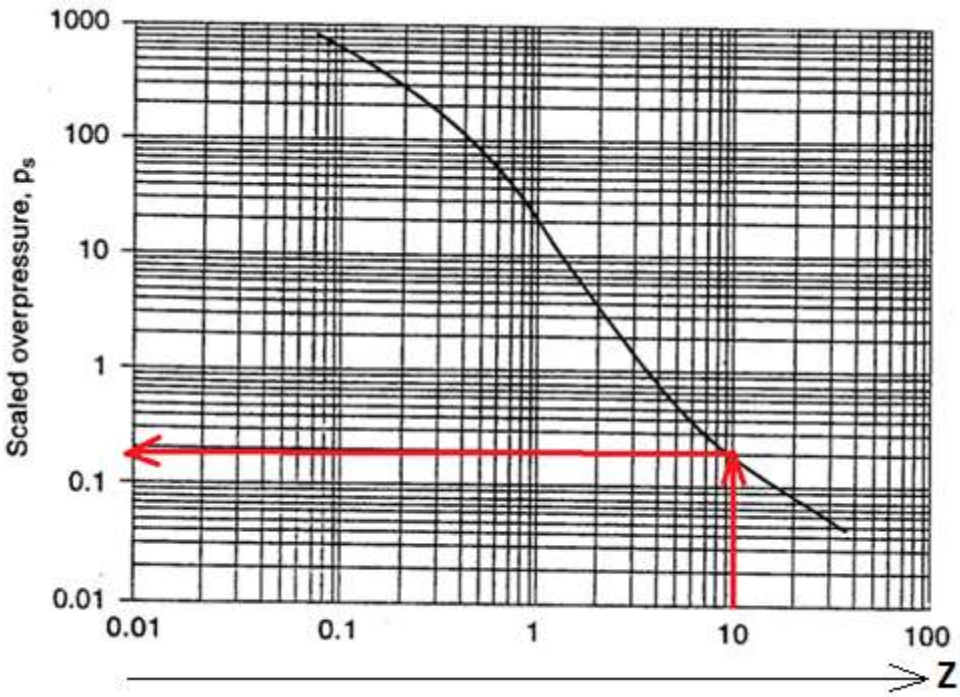

Figura 9 - Conversão da distância em sobrepressão relativa
Fonte: LEES (1996).

3.4.4. Método Multienergia – TNO

Este método é utilizado para avaliar a distribuição no tempo e espaço da pressão produzida por uma explosão. Propõe uma série de expressões que permitem determinar a função de sobrepressão com a "premissa de que apenas as parcelas com certo grau mínimo de confinamento, ou localizadas em partes da nuvem particularmente obstruídas, ao invés de toda a porção inflamável da nuvem, realmente contribuem para a geração de sobrepressão efetiva" (SILVA, 2007).

3.4.5. Método do *Shock Wave* – TNO

O método do *Shock Wave* é apropriado para explosões de gases. Este método considera que a nuvem de vapor pode ser simulada como sendo hemisférica e homogênea, com mistura estequiométrica e com ignição ocorrendo em seu centro. Uma grande vantagem é a reprodução mais fiel do comportamento da explosão a pequenas distâncias do centro da nuvem (SILVA, 2007).

3.4.6. Efeitos sobre as pessoas e estruturas

Quando acontece uma explosão e a consequente propagação da onda de pressão ou de choque, muitos danos podem ser causados, seja em estruturas, ou em seres humanos. Para seres humanos, admite-se que uma variação de pressão inferior a 0.1 bar é suportada sem perigo. Uma variação de 1 bar causa lesões nos ouvidos, e de 15 bar é letal (SILVA, 2007). Nos quadros 1 e 2 pode-se observar os efeitos causados sobre pessoas e estruturas de acordo com a variação de pressão.

Quadro 1 – Efeito sobre as pessoas.
Fonte: SILVA (2007)

	Variação de Pressão		
DANO	**Bar**	**kPa**	**psi**
Suportável (não causa danos)	Até 0,0001	0,1	0,0015
Queda	0,07 - 0,1	7,0 - 10	1,05 - 1,5
Ruptura do tímpano	0,35 - 1,0	35 - 100	5,25 - 15
Lesões nos pulmões	2,0 - 5,0	200 - 500	30 - 75
Morte	7,0 - 15,0	700 - 1500	105 - 225

Quadro 2 – Efeito sobre as estruturas.
Fonte: SILVA (2007)

DANO	Variação de Pressão		
	Bar	kPa	psi
Quebra de janelas	0,01 - 0,015	1,0 - 1,5	0,15 - 0,22
Danos mínimos em construções	0,035 - 0,075	3,5 - 7,5	0,52 - 1,12
Danos em painéis metálicos	0,075 - 0,125	7,5 - 12,5	1,12 - 1,87
Falha de painéis de madeira (construções)	0,075 - 0,15	7,5 - 15,0	1,12 - 2,25
Falha em paredes de tijolos	0,125 - 0,2	12,5 - 20	1,87 - 3
Rompimento de tanques de refinarias	0,2 - 0,3	20 - 30	3 - 4,5
Danos em edifícios (estruturas metálicas)	0,3 - 0,5	30 - 50	4,5 - 7,5
Danos em estruturas concretadas	0,4 - 0,6	40 - 60	6,0 - 9,0
Destruição total da maioria das construções	0,7 - 0,8	70 - 80	10,5 - 12

3.5. Explosão de pó

A explosão de pó é iniciada por uma rápida combustão de partículas suspensas no ar (ABBASI e ABBASI, 2007). Qualquer material sólido que possa queimar irá fazê-lo com velocidade e violência proporcionais ao grau de subdivisão do material. A Figura 10(a) ilustra como um pedaço de madeira, uma vez inflamado, queima vagarosamente, liberando o seu calor ao longo de um grande período de tempo. Quando a madeira é cortada em pequenos pedaços, como ilustrado na Figura 10(b), a taxa de combustão aumenta devido ao aumento da área superficial. A ignição também torna-se mais fácil. Se a subdivisão do material continuar ao nível de pequenas partículas da ordem de 0,1 mm ou menos, e as partículas estiverem suspensas em um volume suficiente de ar para dar a cada partícula espaço irrestrito de queima, a taxa de combustão será muito rápida, e a energia requerida para a ignição muito pequena. Essa nuvem de pó em chamas é uma explosão de pó. Em geral, a nuvem de pó é mais fácil de inflamar e queimar quanto menor forem as partículas que a compõem (ECKHOFF, 2003).

Figura 10 - Ilustração de como a taxa de combustão de uma dada massa de combustível sólido aumenta com o aumento da subdivisão do material.
Fonte: ECKHOFF (2003)

O grau de subdivisão de um sólido pode ser expresso em termos das características do tamanho das partículas ou pela área superficial por unidade de volume (ou unidade de massa). Esta característica é conhecida como *área superficial específica*. A Figura 11 ilustra a relação entre o tamanho de partícula e a área superficial. Após a subdivisão do cubo original à esquerda em oito cubos com a metade da dimensão linear do cubo que os originou, a área superficial total aumentou por um fator de 2, o que indica que a área superficial específica é simplesmente proporcional ao inverso da dimensão linear do cubo. Isto pode ser confirmado simplesmente expressando a área superficial específica **S** como a razão entre a área superficial e o volume de um único cubo de comprimento de aresta **x**, conforme demonstrado pela equação 3.3 (ECKHOFF, 2003).

$$S = \frac{6\mathrm{x}^2}{x^3} = \frac{6}{x} \tag{3.3}$$

O mesmo resultado também se aplica a esferas de diâmetro **x**, pois:

$$S = \frac{\pi\mathrm{x}^2}{(\pi/6)x^3} = \frac{6}{x} \tag{3.4}$$

Para partículas em forma de flocos, na qual a espessura **x** é muito menor que o diâmetro característico do floco, se tem:

$$S = \frac{2}{x} \tag{3.5}$$

Se as “partículas” são fibras de comprimento muito maior que o diâmetro **x**, se tem:

$$S = \frac{4}{x} \tag{3.6}$$

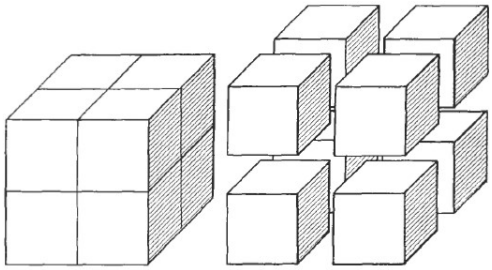

Figura 11 - Ilustração do aumento da área específica de um sólido com aumento da subdivisão.
Fonte: ECKHOFF (2003).

Conforme as partículas tornam-se cada vez menores, as forças entre elas tornam-se mais importantes do que as forças gravitacionais, tendendo a aglomeração, ou seja, em uma situação real, o pó em uma nuvem de pó pode não necessariamente estar disperso em pequenas partículas individuais, mas sim em grandes aglomerados (ECKHOFF, 2003).

A condição necessária para uma explosão de pó é a presença simultânea de uma nuvem de pó (em concentração apropriada no ar que vai sustentar a combustão ao longo do processo) e uma fonte de ignição. No caso de pós constituídos por substâncias voláteis, a explosão pode ocorrer em três etapas sucessivas: i) volatização - onde os voláteis são vaporizados ou colocados para fora das partículas, ii) mistura da fase gasosa do combustível (liberado pelo pó) com o comburente (geralmente ar) e iii) reação de combustão da mistura anterior (ABBASI e ABBASI, 2007).

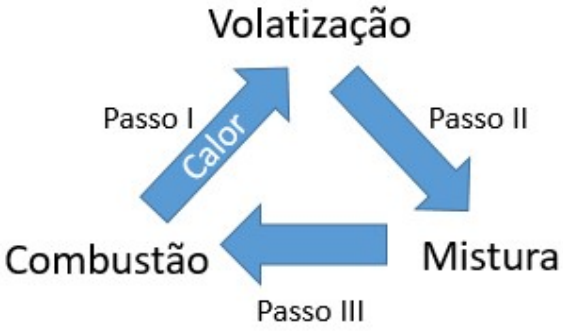

Figura 12 - Esquema mostrando o caminho da explosão de pó.
Fonte: Adaptado de RUSSO e BENEDETTO (2013).

3.6. Fatores que influenciam a sensibilidade de ignição e a violência de explosão de pós

Segundo ECKHOFF(2003), o tamanho da partícula/área superfical específica do pó é o fator central que influencia na sensibilidade de ignição e na violência de explosão. Entretanto, existem também outros fatores importantes, tais como:

- Composição química do pó, incluindo seu teor de umidade;
- Pressão inicial e temperatura da fase gasosa;
- Distribuição do tamanho das partículas e formas do pó, determinando a área superficial específica;
- Grau de dispersão, ou aglomeração, das partículas do pó;
- Distribuição da concentração de pó na nuvem;
- Turbulência da nuvem;
- Possibilidade de geração de turbulência causada por explosão de partes não queimadas na nuvem;
- Possibilidade de distorção da frente de chama por mecanismos outros que não a turbulência;
- Possibilidade de transferência de calor significativa por radiação;

3.7. Processos industriais que podem causar explosões de pó

Muitos pós combustíveis, se dispersos com uma nuvem no ar e inflamados, permitem que uma chama se propague através da nuvem de maneira similar, mas não idêntica, a propagação de chamas em gases com misturas combustível/comburente

(PROUST, 2006). De acordo com AMYOTTE e ECKHOFF (2010), explosões de pó podem ocorrer na seguintes indústrias com os materiais indicados:

- Madeireiras e industrias de papel (serragem, trituração, fracionamento);
- Metais e produtos derivados de metais (pós de metais);
- Geração de energia (carvão pulverizado, turfa e madeira);
- Borracha;
- Indústria de processos químicos (flocos de acetato, produtos farmaceuticos, tintas, pesticidas);
- Produção e processamamento de plásticos/polímeros;
- Mineração (carvão, enxofre, minérios de sulfeto); e
- Indústria textil (algodão, lã, linho).

Segundo ABBASI e ABBASI (2007), as principais operações unitárias de uso industrial em que pós são gerados, ou manuseados, são:

- Redução de tamanho;
- Transporte (manual ou mecânico);
- Separação pneumática;
- Câmaras de decantação;
- Ciclones;
- Filtros;
- Purificadores;
- Precipitador eletrostático;
- Secadores de bandeja;
- Secadores rotatórios;
- Secadores de leito fluidizado;
- Secadores pneumáticos;
- Secadores spray;
- Operações de mistura;
- Operações de triagem e classificação (peneiração);
- Armazenamento;

- Empacotamento;
- Trocadores de calor.

Explosões de pó geralmente surgem de uma rápida liberação de calor devido a reação química Combustível + Oxigênio → Óxidos + Calor. Em alguns casos especiais, pós de metais podem reagir, de forma exotérmica, com nitrogênio ou dióxido de carbono. Somente materiais que não são óxidos estáveis podem ocasionar explosão de pó. Portanto, materiais como silicatos, sulfatos, nitratos carbonatos e fosfatos não são capazes de gerar explosões (ECKHOFF, 2003).

O calor de combustão de um material é um parâmetro importante pois determina a quantidade de calor que pode ser liberada em uma explosão. Entretanto, quando comparam-se os materiais em termos dos seus riscos potenciais, é útil relacionar o calor de combustão com a quantidade de oxigênio consumida. Isto acontece porque, em um ambiente real, um gás em um dado volume de uma nuvem de pó contém quantidade limitada de oxigênio, o que determina na prática a quantidade de calor que pode ser liberada em uma explosão por unidade de volume de pó. O **Erro! Fonte de referência não encontrada.** lista o calor de combustão de várias substâncias, por mol de oxigênio consumido. Cálcio e magnésio estão no topo da lista, seguido pelo alumínio. O silício também está em uma posição elevada na lista, com calor de combustão por mol de oxigênio cerca de duas vezes maior que substâncias orgânicas naturais e sintéticos e carvões. O Quadro 3 está de acordo com a constatação de que as temperaturas das chamas de pó de metais como alumínio e silício são mais elevadas do que aquelas observadas em pós orgânicos e carvão (ECKHOFF, 2003).

Quadro 3 - Calor de combustão (oxidação) de várias substâncias por mol de O_2 consumido.
Fonte: ECKHOFF (2003)

Substância	Produto da Oxidação	kJ/Mol O_2
Ca	CaO	1270
Mg	MgO	1240
Al	Al_2O_3	1100
Si	SiO_2	830
Cr	Cr_2O_3	750
Zn	ZnO	700
Fe	Fe2O3	530
Cu	CuO	300
Sacarose	CO_2 e H_2O	470
Amido	CO_2 e H_2O	470
Polietileno	CO_2 e H_2O	390
Carbono	CO_2	400
Carvão	CO_2 e H_2O	400
Enxofre	SO_2	300

De acordo com ECKHOFF (2003), a equação de estado para os gases ideais descreve a interdependência mútua de vários parâmetros que influenciam a pressão da explosão:

$$P = \frac{nRT}{V} \tag{3.7}$$

Onde ***P*** é a pressão do gás, ***T*** é a temperatura, ***V*** é o volume em questão e ***n*** o número de mols e ***R*** a constante universal dos gases. Para um volume constante, ***P*** é proporcional a ***T*** e ***n***.

Na combustão de pós orgânicos e carvão, assumindo que CO_2 e H_2O são os produtos da reação, o número de moléculas de gás por unidade de massa de nuvem de pó aumenta um pouco durante a combustão. Isto é devido a geração de duas moléculas de H_2O por molécula consumida de O_2. Além disso, em substâncias orgânicas que contenham oxigênio, H_2O e CO_2 são gerados pela própria decomposição de materiais sólidos, sem o fornecimento de oxigênio do ar (ECKHOFF, 2003).

3.8. Diferenças entre Explosão de Pó e Explosão de Gás

Nos seguintes aspectos as nuvens de pó explosivas se comportam de maneira simular às misturas gasosas explosivas (ECKHOFF, 2006):

a. Limites de inflamabilidade/explosividade;
b. Velocidade de queima laminar;
c. Resposta da velocidade de queima a turbulência da nuvem;
d. Fenômeno de detonação;
e. Pressão de explosão adiabática à volume constante de similar magnitude;
f. Energias mínimas de ignição bem definidas;
g. Temperaturas mínimas de ignição para determinadas condições experimentais

Entretanto, existem duas diferenças básicas entre pós e gases que são de forte importância na concepção de normas de segurança. (ECKHOFF, 2006).

Em primeiro lugar, a física de geração e de manutenção das nuvens de poeira e das nuvens de gás/vapor são substancialmente diferentes. Isto significa que na maioria das situações onde nuvens de gás explosivas acidentais podem ser produzidas muito rapidamente, a geração de nuvens de pó explosivas seria altamente improvável. Em segundo lugar, ao contrário da propagação da chama do gás, a propagação da chama

em misturas de pó/ar não está limitada apenas à faixa de concentração de inflamabilidade de nuvens dinâmicas. O estado das camadas estagnadas/depósitos oferece uma possibilidade adicional discreta de propagação da chama (AMYOTTE e ECKHOFF, 2010).

Ainda segundo AMYOTTE e ECKHOFF (2010), em nuvens de pó, forças inerciais podem produzir gradientes de concentração (gradientes de deslocamento de partículas em relação à fase gasosa). Além disso, a radiação térmica pode contribuir de forma siginificativa para a transferência de calor da chama para a nuvem com o pó ainda não queimado, dependendo do tipo de material das partículas (ex.: metais leves).

3.9. Fatores que influenciam a explosividade dos pós

Os parâmetros básicos de explosividade dos pós estão descritos no Quadro 4. É importante reconhecer que estes parâmetros não são propriedades fundamentais de um dado material. Assim são fortemente dependentes de características como teor de umidade e tamanho de partícula, formato e porosidade. Dependem ainda das condições experimentais (e.g., volume do vaso, turbulência da nuvem de pó, e energia de ignição aplicada). As metodologias aplicadas nos experimentos para determinação dos parâmetros de explosividade, presentes no Quadro 4, representam um consenso entre as indústrias para garantir que os parâmetros são aplicáveis na prevenção e mitigação das explosões de pó em escala industrial (AMYOTTE e ECKHOFF, 2010).

Para AMYOTTE e ECKHOFF (2010), uma série de fatores pode influenciar a explosividade de um pó. Deste modo para avaliar o risco de explosão do pó atribuído a uma substância, é necessário quantificar os fatores que a influenciam. São eles:

i. Tamanho da partícula;
ii. Concentração do pó;
iii. Concentração do oxidante;
iv. Temperatura de ignição;
v. Turbulência da nuvem de pó;
vi. Taxa máxima de aumento de pressão;
vii. Concentração da mistura com pó inerte;
viii. Presença de gases inflamáveis.

Quadro 4 - Importantes parâmetros de explosão de pó.
Fonte: Adaptado de AMYOTTE & ECKHOFF (2010)

Parâmetro	Unidades Típicas	Descrição	Exemplo de metodologia de teste	Exemplo de aplicação industrial
P_{max}	bar(g)	Pressão da explosão	ASTM E 1226-05	Confinamento, ventilação, supressão, isolamento, inertização parcial
$(dP/dt)_{max}$	bar/s	Taxa de aumento de pressão	ASTM E 1226-05	O mesmo que P_{max}
K_{St}	bar m/s	Índice de deflagração	ASTM E 1226-05	O mesmo que P_{max}
MEC	g/m3	Concentração mínima explosiva	ASTM E 1515-07	Controle das concentrações de pó
MIE	mJ	Energia mínima de ignição da nuvem de pó (faísca elétrica)	ASTM E2019-03	Remoção das fontes de ignição e aterramento
MIT	°C	Temperatura mínima de ignição da nuvem de pó	ASTM E 1491-06	Controle de processos e de superfícies quentes (nuvens de pó)
LIT	°C	Temperatura mínima de ignição de uma camada de pó	ASTM E2021-06	Controle de processos e de superfícies quentes (camadas de pó)
MOC (LOC)	%volume	Concentração mínima de oxigênio na atmosfera para a propagação da chama na nuvem de pó	ASTM WK1680	Inertização (com gás inerte)

3.9.1. Tamanho da partícula

Como mencionado, quanto maior a área superficial por unidade de massa de uma partícula, maior o risco de explosão. Entretanto, em alguns casos, existe a probabilidade de partículas muito pequenas se aglomerarem em blocos ou torrões. Caso isto ocorra, a explosividade do pó diminui. Quando os tamanhos das partículas aumentam além de 500 µm, elas podem até mesmo se tornar não inflamáveis. A explosividade dos pós não varia linearmente com a área superficial da partícula, embora dependa dela. Esta dependência é ditada pela velocidade real da combustão

dos produtos voláteis e da concentração dos pós (AMYOTTE e ECKHOFF, 2010). As partículas também possuem um tamanho limite inferior, onde diâmetros abaixo de 30 µm não causam mais aumento na taxa de combustão (BENDETTO, RUSSO, *et al.*, 2010).

Existem diferentes definições do que vem a ser pó ou poeira. De acordo com o sistema de teste britânico padrão (BS 2955), materiais com tamanho de partícula menores que 1000 µm são definidos como poeiras, enquanto que partículas que possuem diâmetros menores que 76 µm são definidas como pós. Para a NFPA, pó é um sólido finamente dividido, com 420 µm ou menos de diâmetro. Na prática, poeiras são fisicamente iguais aos pós, mas em geral refere-se a pó aquelas que possuem valor econômico (AMYOTTE e ECKHOFF, 2010).

3.9.2. Concentração do pó

A combustão explosiva de nuvens de pó, como ilustrado na Figura 10(c), não poderá ocorrer ao menos que a concentração de pó (e.g., massa de pó por volume de nuvem de pó) esteja dentro de certos limites. O mesmo ocorre com a combustão de misturas homogêneas de gases combustíveis e ar, nos quais os limites de inflamabilidade inferiores e superiores são bem estabelecidos. A Figura 13 ilustra a variação de explosividade para um típico material orgânico natural, como o amido de milho, no ar à temperatura ambiente e pressão atmosférica (ECKHOFF, 2003).

Ainda segundo ECKHOFF (2003), a faixa de explosividade é bem estreita, estendendo-se sobre menos do que duas ordens de grandeza, de 50-100 g/m^3 (concentração mais baixa) até 2-3 kg/m^3 (concentração mais alta). Os limites de explosividade diferem um pouco de acordo com o material que compõe o pó. O limite mínimo de explosividade (LEL – *Lower Explosive Limit*), também conhecido como concentração mínima explosiva (MEC - *Minimum Explosive Concentration)*, vai determinar a concentração mínima de pó em um ambiente propício a explosão e responde à pergunta “Quão facilmente pode ser formada uma nuvem de pó explosiva?” (SILVA, 2012). O zinco, por exemplo, possui um limite mínimo de explosividade no ar em torno de 500 g/m^3.

O Limite Superior de Explosividade (**UEL –** *Upper Explosion Limit*) é dificilmente documentado para a maioria dos pós.

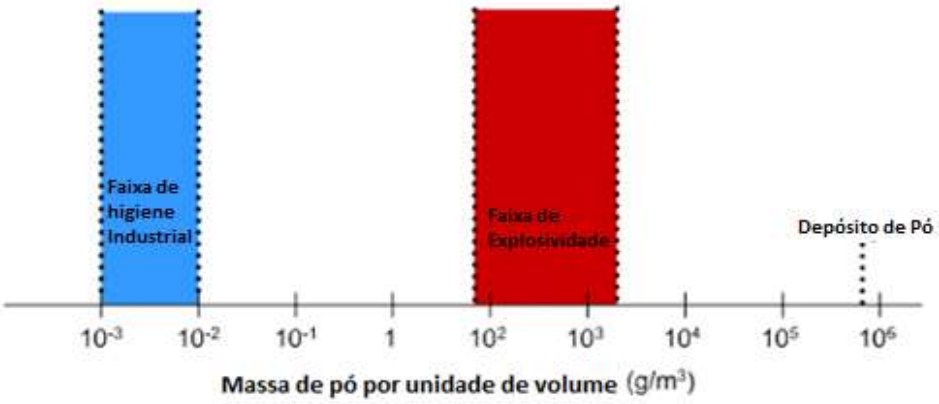

Figura 13 - Variação de concentrações de nuvens de pó no ar à temperatura ambiente e pressão atmosférica de um típico pó orgânico natural (amido de milho).
Fonte: Adaptado de ECKHOFF (2003).

De acordo com ECKHOFF (2003), uma camada de pó de 1 mm de espessura com densidade de 500 kg/m^3, se disperso em um ambiente com 5 metros de altura, gera uma nuvem de pó de concentração de 100 g/m^3 (Figura 14). Tal conclusão pode ser obtida utilizando a seguinte equação:

$$c = \rho \frac{h}{H} \tag{3.8}$$

onde ***ρ*** é a densidade da camada de pó**,** ***h*** é a espessura da camada de pó, ***H*** é a altura e ***c*** é a concentração da nuvem de pó.

Se a camada de pó de espessura ***h*** encontra-se dispersa de maneira homogênea na parede interna de um duto cilíndrico de diâmetro ***D*** ao longo de toda secção transversal do tubo, a concentração da nuvem de pó (**c**) pode ser obtida utilizando a seguinte equação:

$$c = \rho \frac{4h}{D} \tag{3.9}$$

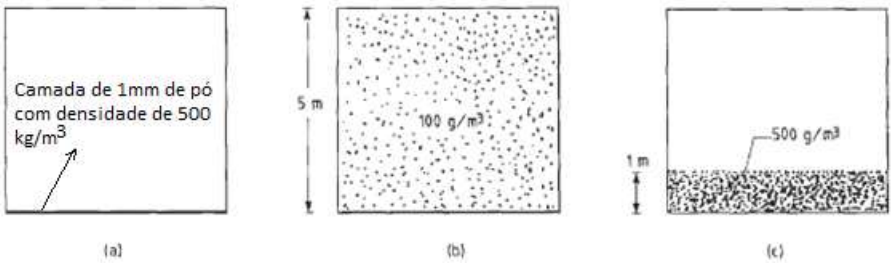

Figura 14 - Uma camada de 1 mm de pó com densidade de 500 kg/m^3 (a) gera uma nuvem de concentração de 100 g/m^3 se dispersa em uma sala de 5 m de altura (b). Dispersão parcial de 1 m gera 500 g/m^3 (c).
Fonte: Adaptado de ECHKHOFF (2003).

A faixa máxima de concentrações admissíveis especificadas no contexto de higiene industrial, em ambientes de trabalho, é de três a quatro ordens de grandeza menor do que a concentração mínima explosiva do pó. Isto significa que os níveis de concentração não desejáveis, que às vezes podem ocorrer no ambiente de trabalho de uma fábrica, estão muito abaixo dos níveis de concentração que podem propagar as chamas causadas pelo pó, como constatado pela Figura 13 (ECKHOFF, 2003).

3.9.3. Concentração de Comburente (oxidante)

O comburente mais comum é o oxigênio do ar. O oxigênio influencia o processo de explosão do pó. O ar atmosférico é constituído, em termos gerais, de 21% de oxigênio e 78% de nitrogênio. Uma concentração de oxigênio maior que 21% tende a aumentar a velocidade de queima do combustível. Já uma concentração menor que 21% causa a diminuição da velocidade de queima. Isto acontece porque o oxigênio é consumido pelo combustível durante o processo de combustão, diminuindo assim a concentração de comburente. Como consequência, a taxa de combustão do pó diminui. Eventualmente, a combustão pode até mesmo cessar, ou, se a explosão ocorrer, pode ser menos severa (ABBASI e ABBASI, 2007).

O oxigênio é um ingrediente chave na combustão e existe uma concentração mínima de oxigênio requerida para a chama se propagar. Explosões e incêndios podem ser prevenidos pela redução da concentração de oxigênio no meio, independente da concentração de combustível. Abaixo da concentração limitante de oxigênio (LOC – *Limiting Oxigen Concentration*) a reação não gera energia para aquecer, por exemplo, uma mistura de gases (incluindo a fase inerte) na medida necessária para a auto propagação da chama. A LOC também é chamada de concentração mínima de oxigênio (MOC – *Minimum Oxygen Concentration*) e concentração máxima segura para o oxigênio (MSOC – *Maximum Safe Oxygen Concentration*). A LOC possui unidade de porcentagem de mols de oxigênio em relação aos mols totais (CROWL e LOUVAR, 2001).

A Figura 15 ilustra como a pressão de explosão (P_{MAX}) e a taxa de aumento de pressão ($(dP/dt)_{MAX}$) diminuem com a diminuição da concentração de oxigênio presente em uma explosão de pó de carvão em um vaso fechado de 1 m^3 de volume. Nota-se que a redução na concentração de oxigênio do ar para cerca de 11,5%

provocou uma redução da taxa de aumento da pressão por um fator de 10 ou mais, enquanto que a pressão máxima da explosão foi reduzida por um fator menor que 2. Este resultado ilustra a forte influência da concentração de oxigênio na cinética do processo de combustão (ECKHOFF, 2003).

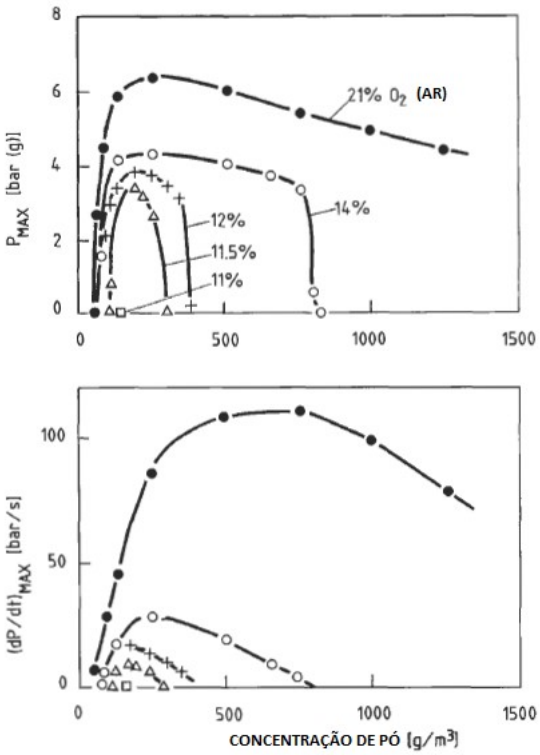

Figura 15 - Influência da concentração de oxigênio na pressão máxima de explosão e na taxa máxima de aumento de pressão para diferentes concentrações de pó de carvão.
Fonte: Adaptado de ECHKHOFF (2003).

3.9.4. Temperatura de ignição

A temperatura mínima necessária para iniciar o processo de ignição é conhecida como temperatura mínima de ignição (**MIT** – *Minimum ignition temperature*) (HASSAN, *et al.*, 2014).

Segundo ABBASI e ABBASI (2007), a MIT aumenta com a presença de umidade ou outros inertes na nuvem de pó, mas diminui com a diminuição do tamanho da partícula e o aumento do conteúdo de matéria volátil no pó, concentração de oxigênio, e espessura da camada de pó. A medição da MIT é essencial para eliminação das fontes de ignição para o projeto de sistemas de supressão de explosão.

A medição da MIT é normalmente realizada por meio de ensaios de forno, tal como o descrito na norma ASTM E1491-06 (2006). Nestes ensaios, o pó é disperso em um forno aquecido a uma temperatura pré-determinada. A nuvem de pó é exposta às paredes aquecidas do forno por vários segundos. Uma chama visível saindo do forno fornece a evidência da ignição. A concentração de pó e a temperatura são sistematicamente variadas para se encontrar a menor temperatura na qual a autoignição ocorre para a concentração de pó mais facilmente inflamável. Quatro diferentes tipos de fornos são adequados para a medição da MIT: o forno *Godbert-Greenwald* 0,27L, forno BAM 0,35L, forno *Bureau of Mines* 1,2L e o forno *Bureau of Mines* 6,8L. Cada forno possui dados de rendimento da MIT ligeiramente diferentes, com os maiores desvios ocorrendo com os maiores valores da MIT. Para um dado tipo de pó, estes valores serão influenciados pela concentração da mistura de pó/ar, umidade e tamanho da partícula (BENEDETTO, SARLI e RUSSO, 2010).

Exemplo de temperaturas mínimas de ignição para pós comuns no ar com umidade relativa de 30-90% são:

- Farinha de trigo: 410-430°C
- Amido de Milho: 410-450°C
- Pó de centeio: 430-500°C

Na verdade, a maioria dos pós de grãos e de farinha, quando soprados contra superfícies quentes com temperaturas em torno 400-500°C, podem ser inflamados. Mesmo em temperaturas em torno de 200°C, pós podem ser inflamados se estiverem em condições favoráveis (baixa umidade relativa, pequeno tamanho de partícula, alta turbulência) formando brasas. Estas brasas podem causar explosões (ABBASI e ABBASI, 2007).

3.9.5. Turbulência da nuvem de pó

Escoamentos podem ser divididos em “regime laminar” e “turbulento”. No escoamento laminar o fluido escoa em laminas ou camadas, enquanto que no escoamento turbulento, o escoamento é irregular e aleatório. Os parâmetros utilizados para definir se o escoamento será laminar ou turbulento são a velocidade do escoamento $\boldsymbol{u}$, o comprimento característico $\boldsymbol{L}$, a viscosidade cinemática $\boldsymbol{v}$ e o número

de Reynolds ***Re*** (FOX e MCDONALD, 2001). Estes parâmetros se relacionam de acordo com a equação abaixo:

$$Re = \frac{uL}{v} \tag{3.10}$$

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que caracteriza se um fluido possui escoamento laminar ou turbulento (BJERKETVEDT, BAKKE e WINGERDEN, 1997).

De acordo com ABBASI e ABBASI (2007), o movimento rápido, aleatório, de pequenos elementos que constituem uma nuvem de pó no espaço tridimensional gera turbulência. Uma nuvem de pó altamente turbulenta vai possuir pó uniformemente distribuído nela. Quando tal nuvem é inflamada, a turbulência irá causar um efeito semelhante ao de um moinho: misturando as partes queimadas/ardentes da nuvem com as partes frias não queimadas gerando um laminado de alternância tridimensional entre zonas quentes e zonas frias.

Em suma, uma chama se propagará muito rapidamente através de uma nuvem de pó se a mesma possuir alto grau de turbulência, resultando em uma explosão violenta. Por outro lado, quando inflamada, uma nuvem menos turbulenta libera inicialmente grande quantidade de calor, o qual é concentrado localmente devido à baixa taxa de dispersão de calor (ABBASI e ABBASI, 2007).

A turbulência desempenha um grande papel na determinação das características de uma explosão de pó e é, portanto, uma preocupação nas pesquisas envolvendo esse tema. A turbulência eleva a velocidade de queima em uma explosão de pó, aumenta a pressão máxima da explosão e a taxa máxima de aumento de pressão e diminui a inflamabilidade dos pós. Esta mesma característica da turbulência faz com que a determinação da energia mínima de ignição dos pós seja um processo difícil (AMYOTTE, CHIPPETT e PEGG, 1989).

Ainda segundo ABBASI & ABBASI (2007), existem dois tipos de turbulência, diferindo em sua origem. O primeiro tipo é gerado por operações que geram pós, como a do moinho de jato de ar, misturadores, filtro de mangas, tubulação de transporte pneumático e elevador de caçambas. Este tipo de turbulência é muitas

vezes chamado de “turbulência inicial”. O segundo tipo de turbulência é aquela gerada durante o processo de combustão, após a nuvem de pó ter inflamado. É um escoamento induzido pela expansão da nuvem de pó não queimada localizada a frente da chama em propagação. A velocidade do escoamento e a geometria das construções presentes no local governam o grau de turbulência.

3.9.6. Taxa máxima de aumento de pressão e índice de deflagração

A taxa máxima de aumento de pressão $(dP/dt)_{max}$ é definida como o maior valor da taxa de aumento de pressão durante uma explosão. Esta taxa é estudada em um teste padronizado, variando a quantidade de combustível na mistura explosiva em um vaso fechado de 1 m^3 de volume (RAMOS, 2010).

Ainda de acordo com RAMOS (2010), utilizando a $(dP/dt)_{max}$, uma característica específica da explosividade do pó pode ser calculada. Esta característica é conhecida como índice de deflagração (K_{St}), e pode ser obtida utilizando a “Lei Cúbica”:

$$K_{St} = \left({}^{dP}/_{dt}\right)_{max} V^{1/3} \tag{3.11}$$

Na equação, $(dP/dt)_{max}$ é o pico da taxa máxima de aumento pressão (bar/s) e V é o volume total interno do vaso onde foi realizado o teste (m^3). O valor de K_{St} (bar m/s) é considerado como sendo uma constante para qualquer pó, independentemente do tamanho do vaso.

A Figura 16 descreve a evolução típica de uma explosão de pó em um ensaio realizado em uma câmara de explosão de 20 L. No início do ensaio a câmara está vazia. O pó é alimentado em um compartimento adaptado à câmara de explosão. O pó é então impelido para o interior da câmara causando a formação de uma nuvem de pó e por consequência um aumento de pressão. Em uma fração de tempo pré-estabelecida (td) a ignição é iniciada. É possível observar um aumento no valor da pressão que atinge um valor máximo (P_{ex}). A variação do aumento da pressão pela variação do tempo, no ponto de pressão máxima da explosão, dá origem ao valor de $(dP/dt)_{max}$ (RAMOS, 2010).

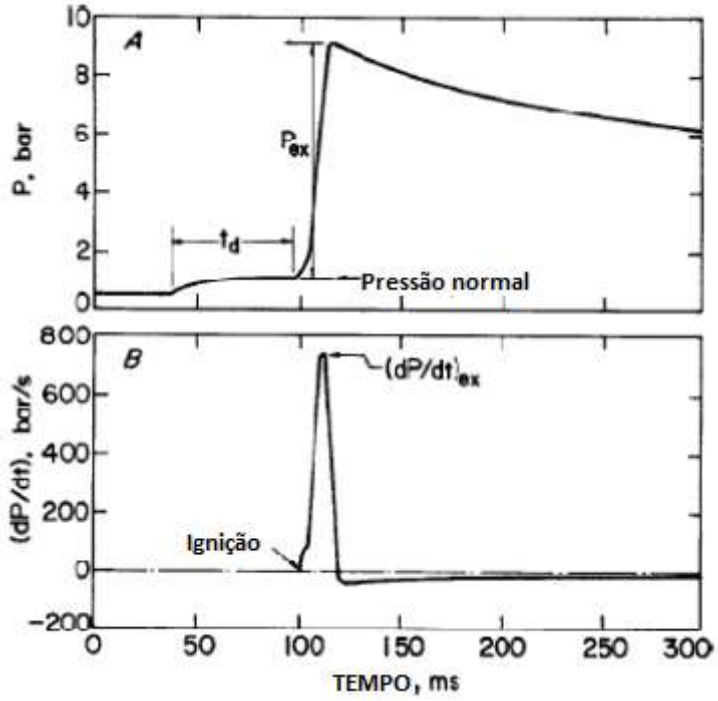

Figura 16 - Gráfico típico do ensaio de explosões de pó para a determinação de P e dP/dt.
Fonte: Adaptado de ASTM E1226

O subscrito "St", do índice de deflagração, deriva da palavra alemã para pó – *staud*. Uma análise das considerações básicas revela que a "lei cúbica" é válida apenas para vasos geometricamente semelhantes com superfícies de chama geometricamente semelhantes, com espessura de chama negligenciável em comparação com o raio do vaso e com velocidade de combustão como função da pressão e da temperatura idêntica em todos os volumes. Portanto, o valor de K_{St} obtido a partir de uma explosão contida em um vaso arbitrário é correspondente a uma medida arbitrária da violência da explosão, pois tanto a turbulência quanto a forma do vaso são arbitrárias e a espessura da chama provavelmente não poderá ser negligenciável em comparação com o raio do vaso (AMYOTTE e ECKHOFF, 2010).

Os pós podem ser divididos em "classes de explosão de pó" ou "classes St", com base no valor de K_{St}. "St 1" abrange valores de K_{St} de 0 a 200 bar m/s. "St 2" abrange valores de K_{St} de 200 a 300 bar m/s e "St 3" abrange valores de K_{St} superiores a 300 bar m/s. (PANTONY, *et al.*, 2001).

O Quadro 5 apresenta a classificação de uma explosão de acordo com o índice de deflagração. É possível notar que uma explosão classificada como St 3 (K_{St} > 300 bar m/s), é considerada muito forte.

Quadro 5 - Classificação da explosão de acordo com o índice de deflagração.
Fonte: Adaptado de RAMOS (2015).

K_{St} (bar m/s)	Classe de explosão de pó	Característica	Exemplo
0	St 0	Sem explosão	Cimento, areia, cinzas, sais
0 - 200	St 1	Explosão fraca	Açúcar, farinha, diversos amidos de milho
200 - 300	St 2	Explosão forte	Pó de madeira, pó de resina epóxi, pó de metil celulose, alguns pigmentos, aromas em pó e vitaminas
> 300	St 3	Explosão muito forte	Pó de alumínio, pó de magnésio, fósforo vermelho e antraquinona

De acordo com ABBASI & ABBASI (2007), o índice de deflagração (K_{St}), observado quando um pó é inflamado, não é apenas uma medida de "explosividade", mas também é uma propriedade chave em que a concepção de vários sistemas de detecção e de projeto de painéis de alívio de explosão são baseados.

Porém é importante observar que valores baixos de St não necessariamente indicam níveis menores de perigo. Na verdade, as explosões de pó mais devastadoras ocorreram com pós que geram explosões classificadas como St 1 (ABBASI e ABBASI, 2007).

Outro índice utilizado para medir a explosividade dos pós é o desenvolvido pela *Bureau of Mines,* que ranqueia os pós com relação ao carvão *Pittsburgh*. O índice de explosividade (IE) é o produto da severidade da explosão (ES) e da sensibilidade da ignição (IS):

$$IE = ES \; x \; IS \tag{3.12}$$

$$IS = \frac{(\ MIT\ x\ MIE\ x\ MEC)_{Pc}}{(MIT\ x\ MIE\ x\ MEX)_{amostra}} \tag{3.13}$$

$$ES = \frac{(MEP\ x\ MRPR)_{Pc}}{(MEP\ x\ MRPR)_{amostra}} \tag{3.14}$$

onde MEC é a concentração mínima explosiva, MEP é a pressão máxima da explosão, MIE é a energia mínima de ignição, MIT é a temperatura mínima de ignição, e MRPR é a taxa máxima de aumento de pressão; o subscrito Pc denota carvão *Pittsburgh*. Este índice é menos dependente do equipamento utilizado, mas sua determinação requer a realização de uma gama de ensaios (ABBASI e ABBASI, 2007).

A energia mínima de ignição (**MIE**) indica o limite mínimo de energia capaz de fazer com que uma nuvem de pó entre em ignição. Nuvens de pó de magnésio, ou outros pós extremamente inflamáveis, podem entrar em ignição apenas com o contato com a eletricidade estática humana, que possui um valor de aproximadamente 10 mJ. Levando-se em consideração que a energia de ignição do magnésio, por exemplo, é de 0,24 mJ, observa-se que até mesmo o acúmulo de carga elétrica nos trabalhadores que ficam próximos ao armazenamento deste material pode desencadear uma explosão (SILVA, 2012).

O teste da *Bureau of Mines* foi desenvolvido nos Estados Unidos e, desde então, tem sido amplamente utilizado em outros países (LEES, 1996).

3.9.7. Concentração da mistura de pó com inerte

Experimentos realizados por CHATRATHI e GOING (2000) sobre o efeito de supressão do bicarbonato de sódio, bicarbonato e potássio, fosfato de monoamônio e carbonato de cálcio sobre o pó de carvão, amido de milho, polietileno, antraquinona, etc. mostraram que curvas de inflamabilidade podem ser obtidas para misturas de combustível/inerte.

De acordo com AMYOTTE e ECKHOFF (2010), as curvas de inflamabilidade dos pós possuem as mesmas características das curvas de inflamabilidade de misturas de gases, e foram caracterizadas por um limite inferior de inflamabilidade, um limite superior de inflamabilidade e uma concentração mínima de inertização. Os resultados

do efeito de supressão mostraram que deflagrações com alto valor de K_{St} e deflagrações de pós de metal podem ser extintas, e a pressão máxima da explosão pode ser reduzida para um nível aceitável.

Ainda de acordo com AMYOTTE e ACKHOFF (2010), a eficácia do agente extintor utilizado é dependente da compatibilidade do pó combustível com o pó inerte. O **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a porcentagem de massa mínima de pó inerte a ser utilizado com o pó combustível compatível, de modo a tornar a mistura inerte.

O calor específico, condutividade térmica, geometria da partícula e a decomposição da partícula desempenham um papel crítico na eficácia dos supressores. Estes fatores, juntamente com a temperatura da chama e com o calor de combustão, podem explicar a variação na gravidade de uma explosão e a eficácia da sua extinção (AMYOTTE e ECKHOFF, 2010).

Quadro 6 - Inertização de nuvens de pó, misturando o pó combustível com pó inerte.
Fonte: Adaptado de ECKHOFF (2003).

Pó Combustível		Pó Inerte		
Tipo de pó	Tamanho médio da partícula (µm)	Tipo de pó	Tamanho médio da partícula por massa (µm)	Massa mínima (%) de inerte referente a massa total necessária para tornar inerte
Metil celulose	70	$CaSO_4$	<15	70
Pigmento orgânico	<10	$NH_4H_2PO_4$	29	65
Carvão betuminoso	20	$CaCO_3$	14	65
Carvão betuminoso	20	$NaHCO_3$	35	65
Açúcar	30	$NaHCO_3$	35	50

3.9.8. Presença de gases inflamáveis

De acordo com AMYOTTE e ECKHOFF (2010), se um gás inflamável também estiver presente com um pó, a explosividade do último é potencializada. A concentração mínima explosiva (MEC), a temperatura mínima de ignição (MIT) e a energia mínima de ignição são todas reduzidas, e a taxa máxima de aumento de pressão sobe. Portanto, um gás inflamável pode render uma mistura explosiva de gás e pó com uma concentração de pó abaixo do limite mínimo de explosividade habitual para o pó em uma concentração de gás inferior ao limite mínimo de explosividade habitual do gás. Isto também pode tornar explosivo pós cujo tamanho de partícula os determinavam como não explosivos. Por exemplo, pós que não ocasionam explosões

(classe St 0) podem tornar-se pós que ocasionam explosões (St 1, St 2 ou St 3) para concentrações de metano de 1%, 5% e 7%, respectivamente (ABBASI e ABBASI, 2007).

3.9.9. Efeito Dominó

3.9.9.1. Explosões Primárias

As concentrações de pó adequadas para uma explosão raramente estão presentes fora dos vasos de processos, portanto as explosões mais graves podem começar dentro de equipamento (moinho, misturadores, secadores, ciclones, funis, filtros, elevadores de caçamba, silos, dutos de aspiração e sistemas de transporte pneumáticos). É importante ressaltar que uma das principais diferenças entre a explosão de pó e uma explosão de gás é que estas raramente acontecem no interior de vasos de processos, devido principalmente a baixa concentração de oxigênio. No entanto, o pó geralmente está suspenso no ar no interior de um equipamento de processo, o que pode gerar condições para ocorrência de uma explosão. Com a ocorrência da explosão no interior do vaso, o mesmo pode se romper se não for provido de dispositivos de segurança para alívio de pressão (ABBASI e ABBASI, 2007).

Ainda de acordo com ABBASI e ABBASI (2007), apesar da importância da eliminação da possibilidade de explosões primárias, ainda mais importante é reduzir a possibilidade de que a explosão primária desencadeie uma série de outras explosões, ou seja, evitar o “efeito dominó”.

3.9.10. Explosões Secundárias

Uma explosão de pó secundária pode ser iniciada devido ao arrastamento de camadas de pó por explosões resultantes de uma explosão primária, tal como ilustrado na Figura 17. O evento primário pode ser uma explosão de pó originária de uma unidade de processo, ou pode ser qualquer perturbação com energia suficiente para dispersar pó combustível existente no chão e em outras superfícies (AMYOTTE, 2013).

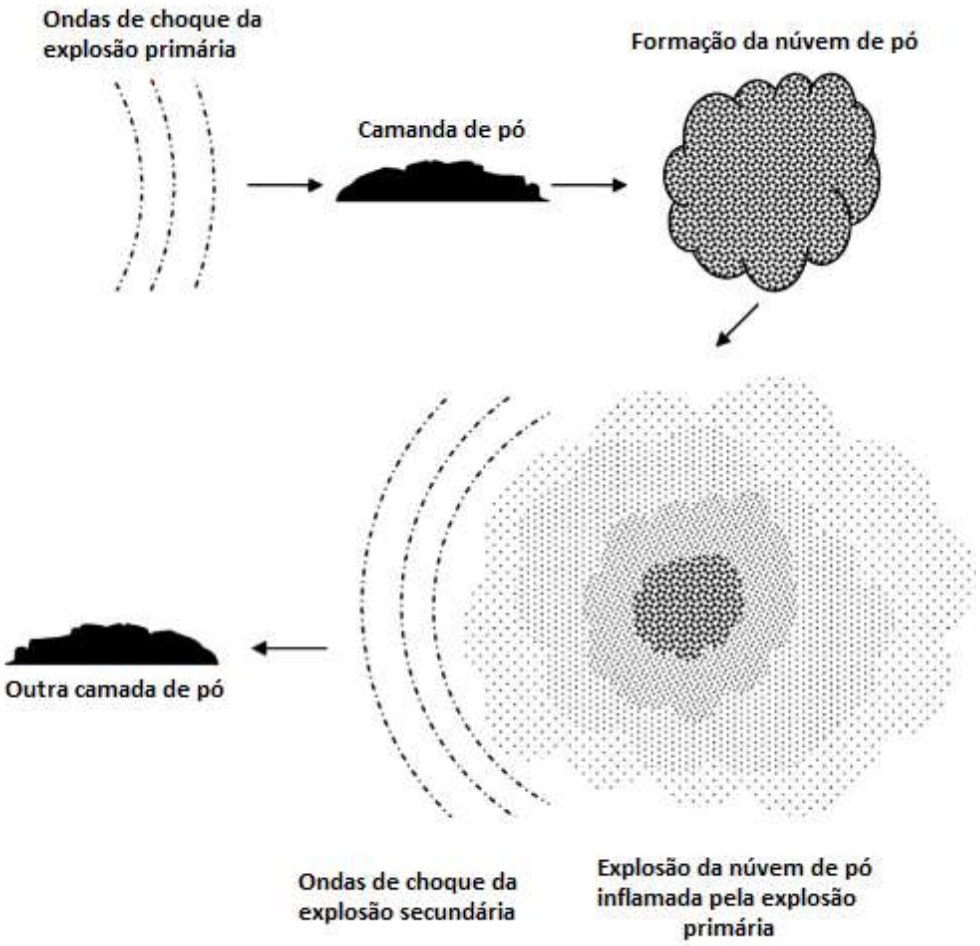

Figura 17 - Explosão Secundária de pó resultante de uma explosão primária.
Fonte: Adaptado de (ABBASI e ABBASI, 2007)

Segundo AMYOTTE (2013), uma descrição da explosão secundária é:

"Talvez o cenário mais devastador causado por uma explosão de pó é a geração de uma explosão secundária nas instalações ao redor de um equipamento no qual a explosão primária ocorreu. A explosão secundária ocorre quando a onda de choque proveniente da ruptura de, por exemplo, um equipamento, levanta o pó acumulado, e a chama oriunda da explosão primária subsequentemente inflama o pó suspenso na nuvem. A devastação e as mortes resultantes estão ambas associadas com as queimaduras dos ocupantes das instalações e com os danos causados à estrutura das mesmas."

Para ABBASI e ABBASI (2007), uma explosão de pó em uma determinada seção de um sistema constituído por vários vasos, pode causar que a pressão e/ou chamas se propagem para os outros vasos conectados por tubulações. Por exemplo, para uma

explosão em saco de filtro, onde a pressão típica da explosão é de 500 mbar, os testes demostram que esta pode propagar-se para dentro do tubo de admissão. Isto pode levar a uma explosão que se propagaria com aumento da violência em todo o sistema, pois a propagação da chama em um tubo tende a acelerar devido a turbulência. Isto resultaria em um jato de chama que entraria em um segundo vaso de processo. Como resultado, elevadas taxas de combustão são obtidas a altas pressões, mesmo que o segundo vaso possua aberturas de alívio de pressão e quantidade de pó que não represente perigo. Então é provável que ocorra o "empilhamento de pressão", como explosão secundárias e de ordem maior, causadas pela explosão primária propagada através de vasos de processos comunicantes e tubulações. A turbulência gerada com a primeira explosão passa através das tubulações interligadas e um outro vaso aumentaria a taxa de combustão do pó, elevando assim a taxa de aumento de pressão.

3.10. Prevenção contra explosões de pó

Para ABBASI e ABBASI (2007), as condições adequadas que devem prevalecer para que uma explosão de pó ocorra são resumidas no pentágono da explosão. Logo, a maneira mais óbvia de prevenir a explosão de pó é não permitir o surgimento das condições necessárias para a formação do pentágono de explosão. Isso pode ser alcançado modificando eficientemente o processo para reduzir o perigo de manipulação dos pós, prevenção de suspensão de pó inflamáveis, remoção completa ou minimização da presença de fontes de ignição ou o uso de inertes.

Segundo LEES (1996), assim como nos gases inflamáveis, o controle das explosões de pó pode ser abordado por meio de prevenção ou proteção. Existem muitas abordagens para prevenção de explosões de pó, sendo elas:

i. Uso de processos sem a presença de pós: Uma solução fundamental para a prevenção da explosão de pó é utilizar processos que não envolvam pós. Em particular, pode ser possível processar os materiais com umidade específica ao invés de secos, de modo que a suspensões de pó não ocorram. Esta abordagem está de acordo com o princípio de segurança inerente. Em geral, este princípio pode ser útil na prevenção de explosões de pó pela minimização, substituição, moderação e simplificação dos perigos.

ii. Prevenção de suspensão de pós inflamáveis: Se os pós inflamáveis precisam ser processados secos, geralmente não é possível prevenir a ocorrência de

concentrações acima da concentração mínima explosiva em alguns locais da planta de processamento. Mesmo assim, muito pode ser feito para minimizar o volume de qualquer nuvem de pó formada, ou reduzir a probabilidade de sua formação. O pó deve ser periodicamente removido do ambiente para prevenir sua acumulação (depósito).

iii. Eliminação das fontes de ignição: O controle das fontes de ignição deve ser considerado no projeto e operação da planta. Medidas que podem ser tomadas no projeto incluem a localização ou eliminação de chama direta, e evitar situações onde a eletricidade estática pode gerar fagulhas explosivas.

iv. Manutenção dos equipamentos para minimizar condições de falhas que podem constituir fontes de ignição é outro aspecto significativo do controle de fontes de ignição, não somente no exterior, mas também no interior dos equipamentos.

v. Inertização: A suspensão de um pó inflamável pode tornar-se não-explosiva com a adição de gás inerte. Os principais gases utilizados como inertes em processos que envolvam pó são nitrogênio, dióxido de carbono e gases nobres. Há perigos associados a utilização destes gases inertes. Um deles é a reação de gases tidos como inertes com o pó: dióxido de carbono pode reagir violentamente com pó de alumínio, e nitrogênio pode reagir a altas temperaturas com pó de magnésio. Dióxido de carbono também pode gerar eletricidade estática. Outro fator importante na utilização destes gases é a disponibilidade e o custo de fornecimento. A estratégia de utilizar gases inertes é particularmente eficaz para pós de grande explosividade (K_{St}> 600 bar m/s). A inertização deve ser utilizada em combinação com outros sistemas de segurança contra explosões, como os painéis de alívio de explosão.

vi. Contenção de explosão: Em alguns casos a contenção é uma opção a ser considerada, uma vez que é um método essencialmente passivo e pode resistir eficientemente a pressões geradas por explosões de pó.

3.11. Simulação de explosão de pó

Explosões de pó possuem um grande risco associado, e podem acontecer em qualquer lugar onde o pó está presente como produto principal, intermediário ou subproduto. A fim de prevenir a ocorrência de explosões de pó, se faz necessário o estudo do seu comportamento. Existem duas maneiras de se realizar este trabalho. Uma é realizar testes de explosão de pó em bancada de laboratório e em larga escala, próxima a dimensão encontrada no processo industrial. Outra é o uso de ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) para simular o processo de combustão e o comportamento da explosão de pó (SHI, XINGUANG, *et al.*, 2009).

Ainda de acordo com SHI et al (2009), a primeira opção possui a vantagem de se obter resultados reais sob condições reais. Entretanto possui muitas limitações. Por exemplo, os testes não podem ser realizados infinitamente, pois dependem de pessoal, material, tempo elevado, custos, etc. Em testes de larga escala depende-se ainda das condições meteorológicas e dos riscos.

A segunda opção possui a vantagem de prever resultados computacionais alterando as condições iniciais e de contorno, geometrias, e outros parâmetros sistematicamente. Detectores podem ser posicionados em qualquer lugar para monitorar as pressões oriundas da explosão de pó, aumento de pressão, consumo de oxigênio, concentração de CO e CO_2, turbulência e outros parâmetros de concentração. Métodos de CFD podem modelar o desenvolvimento de uma explosão antes da mesma acontecer, analisar as possíveis causas e prevenir futuras explosões. É uma opção muito útil para o gerenciamento de riscos. A desvantagem é sua confiabilidade. Condições reais não podem ser fielmente simuladas com o uso dos métodos de CFD, que também possuem suas limitações intrínsecas (SHI, XINGUANG, *et al.*, 2009).

Capítulo 4 – Normas NFPA e ABNT para evitar explosões de pó

Uma norma é um documento que fornece requisitos, especificações, diretrizes ou características que podem ser usadas de forma consistente para assegurar que os materiais, produtos, processos e serviços são adequados para os devidos fins (ISO, 2016).

Nos Estados Unidos da América, a NFPA (*National Fire Protection Association*) é amplamente utilizada para recomendações contra incêndios e explosões. No Brasil, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) é o órgão responsável pelas normas técnicas no país. Nos itens abaixo será comentado um pouco mais sobre ambos os órgãos normativos.

4.1. NFPA

A NFPA é uma organização global sem fins lucrativos, criada em 1896, dedicada a eliminar mortes, lesões e perdas econômicas que possam ser causadas por falhas elétricas, incêndios ou outros perigos relacionados. A NFPA publica códigos e normas direcionadas a minimizar os riscos e os efeitos de um incêndio, estabelecendo critérios para construção, transformação e design para todo o mundo. A organização possui mais de 200 comitês técnicos que compreendem mais de 6.000 voluntários, e fornece acesso online gratuito aos seus códigos e normas (NFPA, 2016).

Uma das normas da NFPA referente às explosões de pó é a NFPA 484, para metais combustíveis, que descreve métodos e testes para a determinação da combustibilidade de pós metálicos, servindo como guia na prevenção de incêndios e explosões causadas por metais. Essa norma se aplica a indústrias como a *AL Solutions*, que será estudada nesta dissertação, e que produzem, processam, manuseiam, reciclam ou armazenam metais ou ligas que são capazes de explodir e causar incêndios. Como muitas outras normas da NFPA, a 484 serve como orientação, e sua utilização não é obrigatória nos Estados Unidos, exceto quando adotadas pelas autoridades estaduais ou locais americanas (CSB, 2010).

A NFPA não realiza investigações de acidentes envolvendo indústrias químicas, essa tarefa é de responsabilidade do órgão governamental norte americano conhecido como *Chemical Safety Board* (CSB). A CSB não aplica penalidades às indústrias, mas emite recomendações para outras agências regulamentadoras como a OSHA

(*Occupational Safety Health Administration*) e a EPA (*Environmental Protection Agency*), além de organizações industriais e sindicatos de trabalhadores (CSB, 2010).

4.2. ABNT

A ABNT é responsável pela elaboração de Normas Brasileiras (ABNT NBR), elaboradas por seus Comitês Brasileiros (ABNT/CB), Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE). Desde 1950, a ABNT atua também na avaliação da conformidade e dispõe de programas para a certificação de produtos, sistemas e rotulagem ambiental. É uma entidade privada e sem fins lucrativos e membro fundador da *International Organization for Standardization* (ISO), da *Comisión Panamericana de Normas Técnicas* (Copant) e da *Asociación Mercosur de Normalización* (AMN).

Em 2015 a ABNT emitiu a NBR 16385 que prevê medidas de segurança para a prevenção, proteção e mitigação de incêndios e explosão de pós em instalações que manuseiam partículas sólidas combustíveis. Essa norma é aplicável a todas as fases de fabricação, processamento, mistura, transporte pneumático, estocagem, embalagem e manuseio de partículas sólidas combustíveis ou misturas híbridas, independente da concentração e tamanho da partícula, quando as substâncias apresentam perigo de incêndio ou explosão (NBR 16385).

A NBR 16385 é baseada principalmente na norma NFPA 654 de 2013, mas também se utiliza outras normas da NFPA como a 484 e 68. Outras normas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), ANSI (*American National Standards Institute*), EN (*European Standard*), IEC (*International Eletrotechnical Commission*) e VDI (*Association of German Engineers*) também são utilizadas (NBR 16385).

Capítulo 5 – Estudos de casos

Explosões de pó podem assumir muitas formas. Por volta da virada do século, os fotógrafos submetiam o público a um clarão ofuscante e uma fumaça oriundos da ignição do pó de magnésio que fornecia iluminação para fotografias executadas no interior de residências ou durante a noite, porém as explosões de pó são frequentemente eventos inesperados e devastadores. As consequências trágicas das explosões em minas de carvão, onde o pó pode potencializar a violência da explosão do metano no ar, são amplamente relatadas. Menos conhecido é o risco industrial presente quando um pó é produzido e exposto à uma atmosfera oxidante intencionalmente ou acidentalmente. Enquanto alguns pós podem não inflamar, centenas de outros podem causar explosões, inclusive alguns encontrados em residências, como o açúcar (GRIFFITH, 1978).

O conhecimento do risco de explosão é essencial para as indústrias que fabricam, processam, geram ou usam pós combustíveis (CASHDOLLAR, 2000).

Neste capitulo são abordadas duas explosões de pó que ceifaram vidas e causaram danos materiais. A primeira ocorreu em 7 de fevereiro de 2008. Uma enorme explosão praticamente demoliu toda a fábrica da *Imperial Sugar*, nos Estados Unidos, causando o óbito de 14 pessoas e ferindo 38 colaboradores. A explosão ocorreu logo abaixo dos silos de açúcar da empresa, e causou a suspensão do açúcar que se encontrava acumulado em pisos e superfícies elevadas, propagando ainda mais a explosão ao longo da fábrica. A outra explosão ocorreu na fábrica da *AL Solutions*, também localizada nos Estados Unidos. Em 9 de dezembro de 2010, uma explosão na área de processamento de titânio e zircônio (materiais altamente inflamáveis) feriu fatalmente 3 trabalhadores.

As informações sobre ambos os acidentes foram retiradas dos relatórios oficiais de investigação realizadas e publicadas pela CSB (*Chemical Safety Board*).

5.1. A *Imperial Sugar Company*

A *Imperial Sugar* é uma das empresas mais antigas em operação do estado do Texas (EUA), e a maior refinaria de açúcar dos Estados Unidos. Sua matriz fica localizada na cidade de *Sugar Land*, no condado de *Fort Bend* (Texas), cujo nome foi

dado pela própria empresa. O logotipo da coroa, utilizado pela empresa, também é utilizado no selo da cidade (IMPERIAL SUGAR COMPANY, 2015).

A *Imperial Sugar* foi fundada em 1843 por Samuel May Willians. Ao longo dos anos passou por uma série de proprietários. Até 1988 a empresa só possuía uma planta, em sua locação original no Texas, quando então compraram a *Holly Sugar Corporation*, uma empresa cuja sede ficava na cidade de *Colorado Springs* (Colorado) e que produzia açúcar a partir de beterraba. Após a aquisição da *Holly Sugar Corporation*, a *Imperial Sugar* fez diversas outras aquisições, as quais efetivamente dobraram o seu tamanho. Em 17 de janeiro de 2001 a *Imperial Sugar Company* decretou falência devido à diminuição das vendas de açúcar refinado e dos custos elevados de energia, porém se recuperou 7 meses depois, adaptando suas operações a nova realidade (IMPERIAL SUGAR COMPANY, 2015).

Em 2008 a *Imperial Sugar Company* operava um armazém em *Ludlow*, *Kentucky*, uma fábrica de embalagens e produção de açúcar em *Gramercy*, *Louisiana*, e a fábrica de *Port Wentworth*, *Georgia*, adquirida da empresa *Savannah Foods and Industries*, em dezembro de 1997. Em 2007, a companhia produziu 1,3 milhões de toneladas de açúcar, consolidando sua posição como uma das maiores refinarias de açúcar dos EUA (ABRH, 2012). Mais de 350 empregados diretos e terceirizados trabalhavam na fábrica de *Port Wentworth*, onde a produção anual de açúcar excedia 700.000 toneladas (CSB, 2009).

Em 2012 a *Imperial Sugar Company* foi comprada pelo conglomerado *Loius Dreyfus*, com sede na Holanda, por U$ 203 milhões de dólares (Kaplan, 2012).

Atualmente a *Imperial Sugar Company* é uma empresa de capital aberto, com ações na NASDAQ. A empresa, juntamente com outras subsidiárias, processa e vende açúcar refinado de cana de açúcar atuando na região do NAFTA. Ela refina, empacota e distribui açúcar granulado, em pó, líquido e mascavo sob as marcas *Dixie*, *Imperial* e *Holly*.

5.1.1. O processo

A fábrica da *Imperial Sugar*, em *Port Wentwoth*, produzia açúcar granulado. Esta planta começou a ser construída por volta de 1900, com a produção de açúcar

granulado iniciando em 1917. Ao longo dos anos a fábrica aumentou sua capacidade de refino, empacotamento e armazenamento. A planta operou por mais de 80 anos sem passar por nenhum grande acidente envolvendo pó de açúcar, apesar de fotografias que datam de 1970 até 2007, e correspondências internas dos anos 60, confirmarem derramamento de açúcar em alguns locais da fábrica (CSB, 2009).

Um sistema de parafusos sem fim, correias transportadoras e elevadores de caçamba transportavam o açúcar granulado da refinaria para três silos de armazenamento de 32 metros de altura. Em seguida, o açúcar era transportado para áreas especiais de processamento e para as máquinas empacotadoras. Dezenas de roscas transportadoras, elevadores de caçamba e correias transportadoras horizontais movimentavam açúcar granulado ao longo do prédio de empacotamento (Figura 18) (CSB, 2009).

Ainda de acordo com a CSB (2009), três silos de armazenamento foram instalados sob uma base circular de concreto acima do piso do prédio de empacotamento. Cada silo de concreto tinha cerca de 2,3 toneladas de capacidade de armazenamento, e possuía 12 metros de diâmetro e 32 metros de altura. Dois transportadores de correia ficavam localizados logo abaixo dos silos, em um túnel de 40 metros de comprimento, 2,3 metros de altura e 3,6 metros de largura (Figura 19).

O açúcar oriundo da refinaria alimentava o silo de número 3. Do silo 3, o material era transportado para os silos 1 e 2. O açúcar dos silos 1 e 2 era distribuído para os setores de carregamento, para os moinhos de produção de açúcar em pó, para o equipamento de produção de açúcar tipo especial, e para as máquinas de empacotamento de açúcar granulado (Figura 20).

O açúcar que saia do silo 3 passava por uma transportadora localizada no túnel logo abaixo dos silos. Esta transportadora era equipada com coletores de pó e sua correia transportadora viajava sob um colchão de ar, evitando a dispersão de material particulado (CSB, 2009).

De acordo com o relatório de investigação realizado pela CSB (2009), o açúcar era então descarregado no elevador de caçambas a oeste (Elevador oeste) (Figura 19). O elevador erguia o açúcar e o despejava em uma série de correias transportadoras,

encaminhando o produto para os silos 1 e 2. Duas saídas de 46 cm, localizadas no fundo dos silos 1 e 2 (Figura 19), despejavam açúcar granulado em uma correia transportadora de aço localizada no túnel abaixo dos silos (Figura 19 e Figura 21). Várias esteiras e elevadores de caçamba distribuíam açúcar para os moinhos de produção de açúcar em pó, máquinas de empacotamento e para o prédio de açúcar a granel.

Segundo a investigação feita pela CSB (2009), durante muitos anos o açúcar granulado transportado por estas correias estava exposto a possíveis contaminações causadas por detritos que poderiam cair sobre o produto. Para reduzir esse problema, em 2007 a *Imperial Sugar* instalou uma estrutura de aço inox com tampo e painéis laterais para proteger o açúcar granulado transportado na esteira reduzindo os riscos de contaminação. O tampo, que ficava apoiado sob os painéis laterais, era removível para limpeza e a manutenção da correia transportadora. Apesar de pó de açúcar ser gerado quando o mesmo fluía dos silos para a correia, e quando ocorriam obstruções que faziam com que o açúcar derramasse para fora da esteira, esta nova proteção não estava equipada com um sistema de remoção de pó de açúcar e painéis de explosão.

A investigação da CSB (2009) mostrou que durante décadas de operação, a concentração de pó de açúcar liberado dentro do amplo volume do túnel localizado abaixo dos silos quase nunca atingiu a concentração mínima para explosão (MEC) enquanto não havia tampo e painéis laterais. Após a esteira ter sido fechada, o pó de açúcar permaneceu contido e suspenso no interior da estrutura de aço inox sem nenhuma ventilação. Como o volume da estrutura de aço instalada na esteira era um décimo do volume do túnel, o pó de açúcar poderia facilmente atingir concentrações acima da MEC.

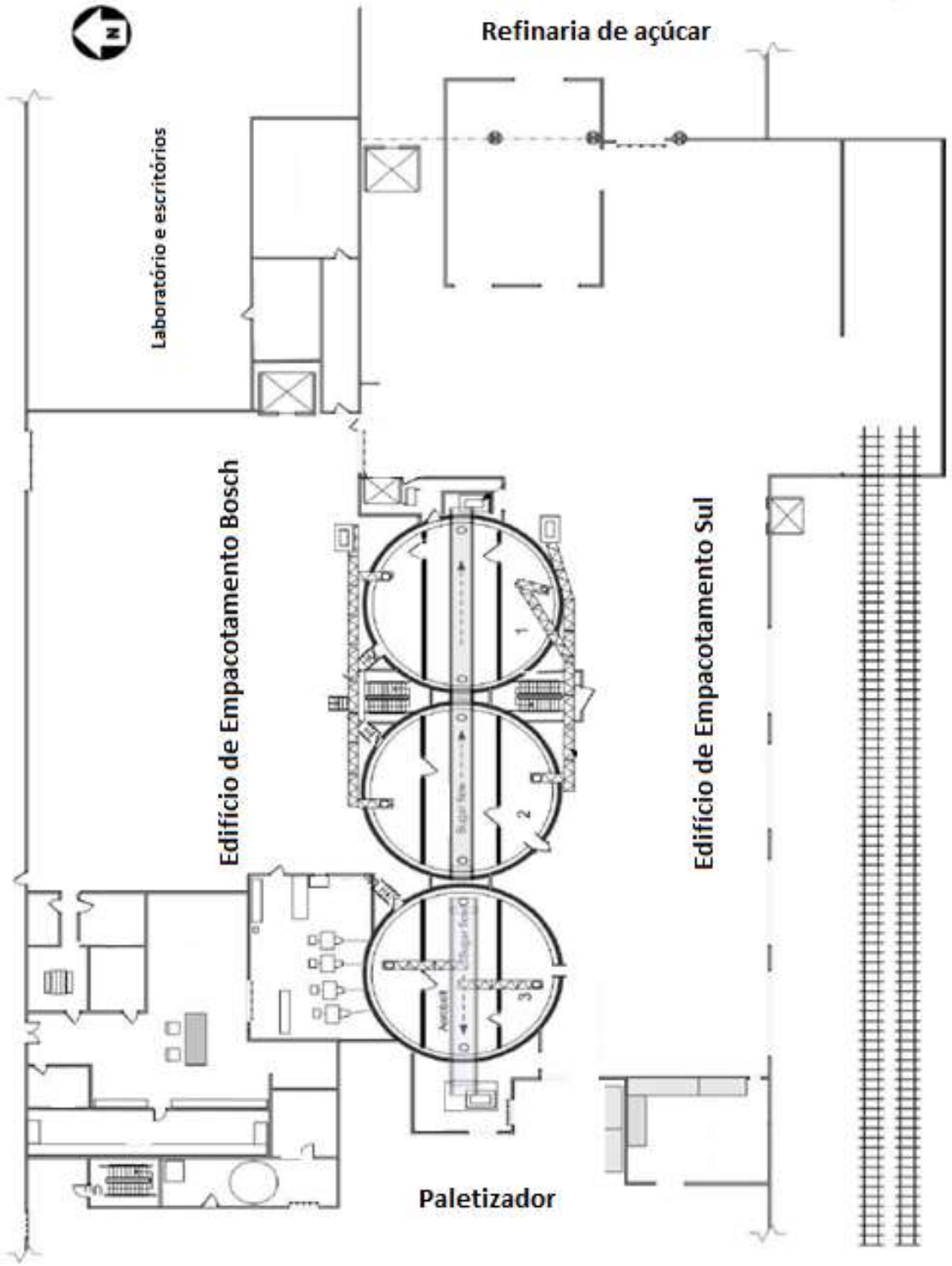

Figura 18 - Primeiro andar dos edifícios de empacotamento da Imperial Sugar.
Fonte: Adaptado de CSB (2009)

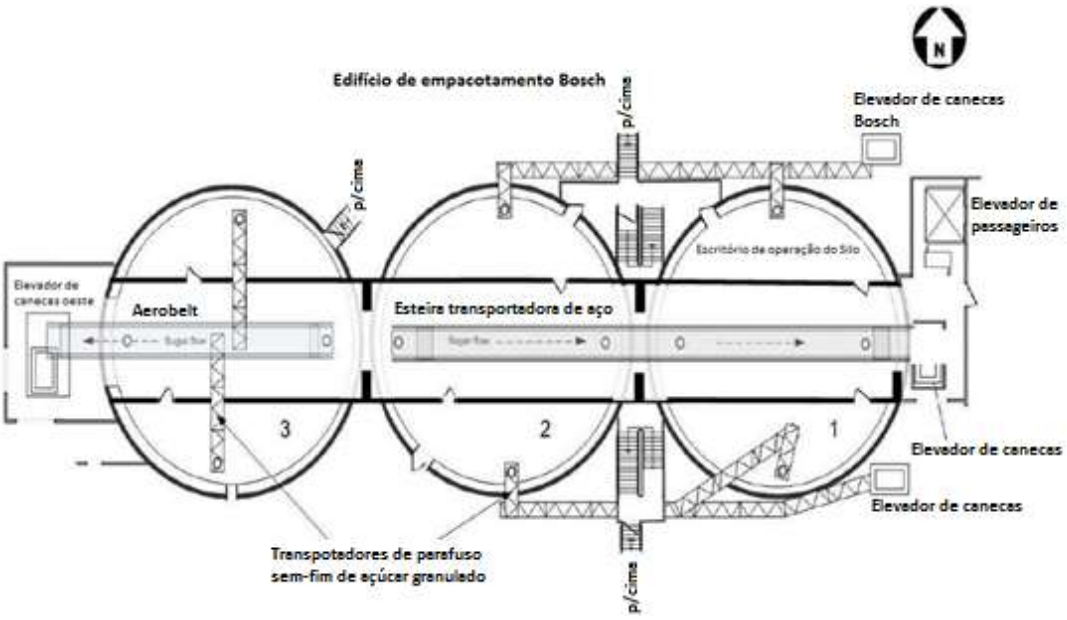

Figura 19 - Túnel abaixo dos silos.
Fonte: Adaptado de CSB (2009)

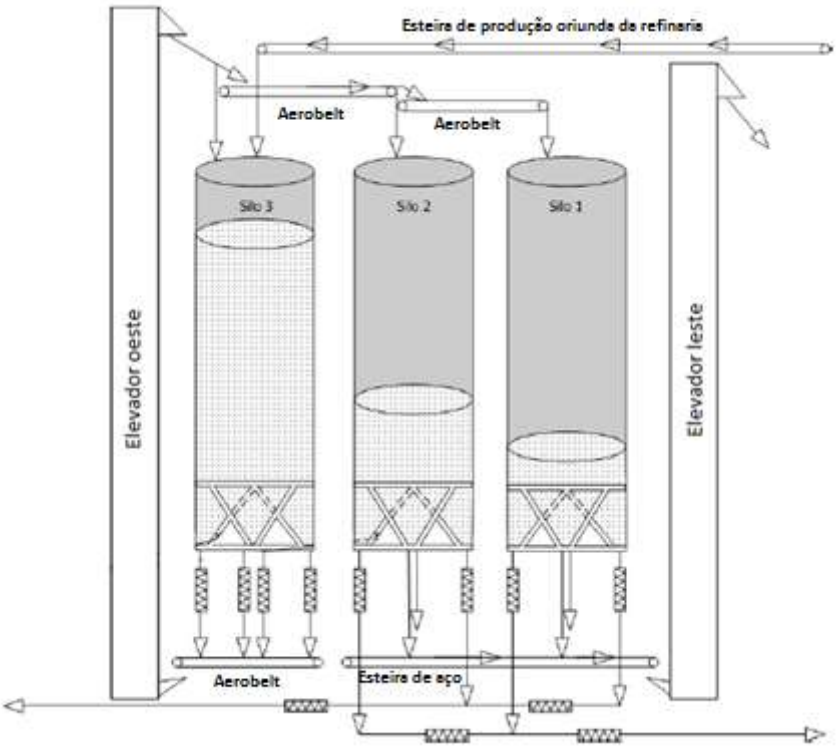

Figura 20 - Silos de abastecimento de açúcar da Imperial Sugar.
Fonte: Adaptado de CSB (2009)

Figura 21 - Esteiras transportadoras de açúcar localizadas abaixo dos silos da fábrica Imperial Sugar. Substancial acúmulo de açúcar na esteira e no piso.
Fonte: CSB (2009)

5.1.2. Edifício de Empacotamento

A fábrica da *Imperial Sugar* de *Port Wentwoth*, possuía dois edifícios de empacotamento. Aquele localizado no lado norte dos silos era o edifício de empacotamento Bosch (Figura 18). Este possuía 4 andares e grandes portões localizados na lateral de cada andar. Estes portões davam acesso para pessoas e empilhadeiras ao edifício de empacotamento sul. Uma escada de aço fechada com alvenaria ficava localizada entre os silos 1 e 2, de forma a dar acesso a cada andar do edifício (Figura 19). Correias transportadoras e um elevador de caçamba transportavam açúcar granulado para uma sala (*hummer room*) localizada no último andar. Nesta sala o açúcar granulado passava por peneiras que removiam possíveis torrões de açúcar e os separava em granulometrias padronizadas. O açúcar era então transportado para alimentadores no terceiro andar, localizados acima das máquinas empacotadoras. O segundo andar continha as máquinas empacotadoras de açúcar granulado. Por fim, transportadores de correia levavam o açúcar empacotado para a sala do paletizador (CSB, 2009).

De acordo com a CSB (2009), o prédio de empacotamento sul também possuía 4 andares (Figura 18). Os três silos da planta formavam a parede norte. Uma escada com estrutura de aço, envolvida por uma parede de tijolos, ficava localizada entre os silos 1 e 2 de maneira a também prover acesso aos andares superiores. O extremo leste do prédio era aberto para as áreas da refinaria. Cortinas de plástico foram instaladas nos grandes corredores para conter a poeira.

O segundo e terceiro andares abrigavam os equipamentos de empacotamento de açúcar granulado, em pó e mascavo. Esteiras transportadoras e elevadores de caçamba transportavam açúcar granulado através de todo o prédio para alimentadores localizados acima dos equipamentos de empacotamento. Correias e roletes transportavam o açúcar embalado para a sala do paletizador (Figura 18), alguns passando por grandes aberturas nos pisos e pela parede oeste (as aberturas serviam como dispositivos de segurança para alívio de sobrepressões que poderiam ser causadas por explosões) (CSB, 2009).

O equipamento de produção de açúcar em pó ficava localizado no quarto andar do prédio. O amido de milho era transportado de um silo de armazenamento para alimentadores localizados acima dos moinhos, através de uma tubulação de transferência pressurizada à ar. Uma pequena quantidade de amido de milho era adicionada ao açúcar granulado, sendo a mistura então alimentada nos moinhos. Os moinhos pulverizavam a mistura açúcar granulado/amido de milho em uma granulometria específica, e depois descarregavam o açúcar em pó em alimentadores localizados acima das máquinas de empacotamento. Os moinhos eram conectados ao sistema de coletores de pó para remover a poeira gerada pelo açúcar e pelo amido de milho. O açúcar em pó chegava a conter 3% de amido de milho para evitar sua aglutinação (CSB, 2009).

5.1.3. O acidente

Segundo relatório oficial emitido após a investigação realizada pela CSB (2009) uma série de fatores contribuintes agiram durante o evento acidental. Em fevereiro de 2009, por volta das 19h15min, chamas e detritos provenientes de uma série de explosões emergiram dos silos e dos edifícios de embalagem da fábrica da *Imperial Sugar* de *Port Wentwoth* (Figura 22).

Figura 22 - Explosão na Imperial Sugar (Imagens retiradas do vídeo de segurança da Georgia Ports Authority)
Fonte: CSB (2009)

Pisos de concreto de três polegadas de espessura do prédio de empacotamento sul cederam com a força de explosão que evoluiu através dos prédios de empacotamento e adjacências. O telhado de madeira da sala do paletizador cedeu e caiu na área de carga ferroviária de açúcar a granel. Bolas de fogo avançaram de norte a sul do prédio de empacotamento, enquanto o pó de açúcar, que se desprendia das superfícies devido ao abalo das explosões, era consumido pelo fogo. Grandes fendas foram abertas no chão. Pilhas de açúcar granulado e açúcar em pó, que tinham se acumulado entorno dos equipamentos, intensificaram as chamas. O fogo avançou através das roscas transportadoras fechadas e atingiu a refinaria e o setor de açúcar a granel, localizados a centenas de metros de distância do prédio de empacotamento onde o incêndio foi iniciado. Violentas bolas de fogo emergiram da planta durante mais de 15 minutos, conforme o pó de açúcar acumulado e disperso no ambiente continuava a alimentar as chamas (CSB, 2009).

O número total de trabalhadores que estavam na fábrica na noite do acidente era de 135. Doze funcionários da *Imperial Sugar* e dois funcionários terceirizados foram fatalmente feridos (CSB, 2009). De acordo com o relatório da CSB (2009), dentre as vítimas, quatro tiveram queimaduras fatais quando o piso onde estavam cedeu e os destroços os prenderam dentro de prédio. Quatro outros trabalhadores também não conseguiram escapar do fogo e morreram no local, incluindo dois que entraram novamente no prédio em chamas na tentativa de resgatar os colegas. Seis trabalhadores tiveram queimaduras graves e vieram a falecer no hospital *Joseph M.*

Still Burn Center, em *Augusta*, *Georgia*. No Quadro 7 ilustra-se o número de trabalhadores acidentados, falecidos e ilesos decorrente do evento da explosão da refinaria de *Imperial Sugar*.

Quadro 7 - Número de trabalhadores acidentados, falecidos e ilesos na explosão da refinaria da Imperial Sugar. Fonte: Adaptado de ABUSWER (2012).

Andar	Nº de feridos	Falecidos			Ilesos	Total de trabalhadores afetados (%)	Nº total de trabalhadores
		No hospital	No local	%			
1º	8	2	-	6,5	21	32	31
2º	0	1	2	17	15	17	18
3º	15	1	1	5	22	44	39
4º	13	2	5	15	27	43	47
Total	36	6	8	10	85	37	135

5.1.4. As causas do acidente

De acordo com o relatório de investigação do acidente publicado pela CSB (2009), antes da explosão o sistema de transporte de açúcar por esteiras liberava pó de açúcar nas áreas de trabalho. A CSB concluiu que o sistema de coleta de pó era subdimensionado e não reduzia os níveis de concentração no ambiente. Os trabalhadores utilizavam ar comprimido para limpar o pó que se depositava, aumentando ainda mais a dispersão das partículas no meio. Ao longo do tempo, camadas espessas de pó foram se depositando sobre superfícies elevadas e em locais de difícil acesso (CSB, 2009).

Segundo a CSB (2009), a *Imperial Sugar* não possuía práticas adequadas de limpeza do pó de açúcar em sua fábrica, o que resultou em acumulo significativo de material ao longo do tempo. Em alguns locais, a quantidade de açúcar depositada chegava a altura dos joelhos. A CSB obteve o relato de um trabalhador que informa que precisava utilizar um rodo para criar um caminho através do açúcar depositado para ter acesso ao equipamento que ele operava durante seu turno de trabalho.

Quando a empresa decidiu instalar painéis de proteção na esteira logo abaixo dos silos 1 e 2, para evitar contaminação do açúcar, o volume para a dispersão do pó na esteira foi reduzido pela décima parte. Inicialmente, o volume dentro do túnel era

de aproximadamente 246 m^3, sendo reduzido para 24 m^3 com a esteira recoberta pelos painéis (CSB, 2009).

Segundo a investigação da CBS (2009), torrões de açúcar poderiam se formar na saída do silo 1, ocasionando o surgimento de um dique de contenção, isso causaria o derramamento do açúcar que vinha do silo 2 na correia transportadora e aumentava a quantidade de pó de açúcar disperso no volume fechado da esteira. O açúcar derramado, então, se acumulava dentro da transportadora que se encontrava fechada pelos painéis de proteção. A CSB concluiu que, conforme a açúcar granulado era derramado para fora da correia em movimento, na saída do silo obstruída pelos torrões, o pó ultrapassou a MEC e houve ignição do material disperso no ar por uma fonte de ignição desconhecida. A explosão primária ocorreu, aproximadamente, na metade do comprimento do túnel localizado abaixo dos silos 1 e 2, e provocou uma série de explosões secundárias que rapidamente se propagaram para as demais áreas.

A explosão primária do pó de açúcar, no túnel abaixo dos silos, enviou ondas de sobrepressão para os silos e, em seguida, para fora do primeiro andar do prédio Bosch. As ondas de pressão se deslocaram entre os silos 1 e 2 e saíram pela escadaria sul, arremessando as paredes de tijolos para dentro do prédio de empacotamento (Figura 23) (CSB,2009).

Figura 23 - Parede de tijolos arremessadas para dentro do prédio de empacotamento da Imperial Sugar. Fonte: CSB (2009).

Pó de açúcar acumulado em superfícies elevadas, e açúcar derramado no chão ao redor dos equipamentos de empacotamento, contribuíram para o aumentar a energia da explosão. O fogo continuou a ser alimentado pelo pó acumulado conforme as ondas de pressão os deslocavam (CSB, 2009).

Uma “chuva de açúcar” teria adicionado ainda mais combustível às chamas que avançavam. As ondas de pressão causaram ainda o rompimento dos pisos de concreto (Figura 24) (CSB, 2009).

Figura 24 - Lajes de concreto de 3 polegadas de espessura retiradas dos seus suportes de aço pela pressão causada pelas ondas de pressão.
Fonte: CSB (2009).

Durante 4 meses os investigadores da CSB examinaram e fotografaram o interior dos edifícios e os equipamentos da planta de *Port Wentwoth*. Foram feitas entrevistas com testemunhas que estavam trabalhando no local na noite do acidente, funcionários terceirizados e trabalhadores feridos no acidente. A investigação concluiu que o incidente foi uma combinação de uma explosão primária e múltiplas explosões secundárias (CSB, 2009). Segundo a CSB, explosões secundárias, causadas pelo pó de açúcar, seriam improváveis de acontecer caso a *Imperial Sugar* realizasse manutenção de rotina em seus equipamentos. A limpeza deveria ter sido realizada prontamente ao derramamento de açúcar, de forma a impedir acúmulo. Essa prática evitaria concentrações de açúcar perigosas em superfícies de difícil acesso e no chão (CSB, 2009).

5.1.5. Simulação da sobrepressão gerada durante o acidente

ABUSWER (2012) simulou a sobrepressão e as consequências resultantes das explosões de pó na fábrica da *Imperial Sugar* utilizando o *software* DESC (*Dust Explosion Simulation Code*). O DESC é uma ferramenta de CFD baseada no *software* de

fluidodinâmica computacional conhecido como FLACS (*Flame Acceletarion Simulation*), ambos desenvolvidos pela empresa Gexcon (SKJOLD et al., 2005).

De acordo com ABUSWER (2012), o primeiro passo para a simulação no DESC é o preparo dos arquivos com dados sobre o pó combustível em uma planilha no *software* (Figura 25). Foram obtidos dados experimentais oriundos de ensaios de explosões de pó de açúcar feitos em laboratório utilizando uma câmara esférica, conhecida como câmara SIWEK. Foram obtidas ainda informações como densidade, tamanho e propriedades termodinâmicas do pó de açúcar.

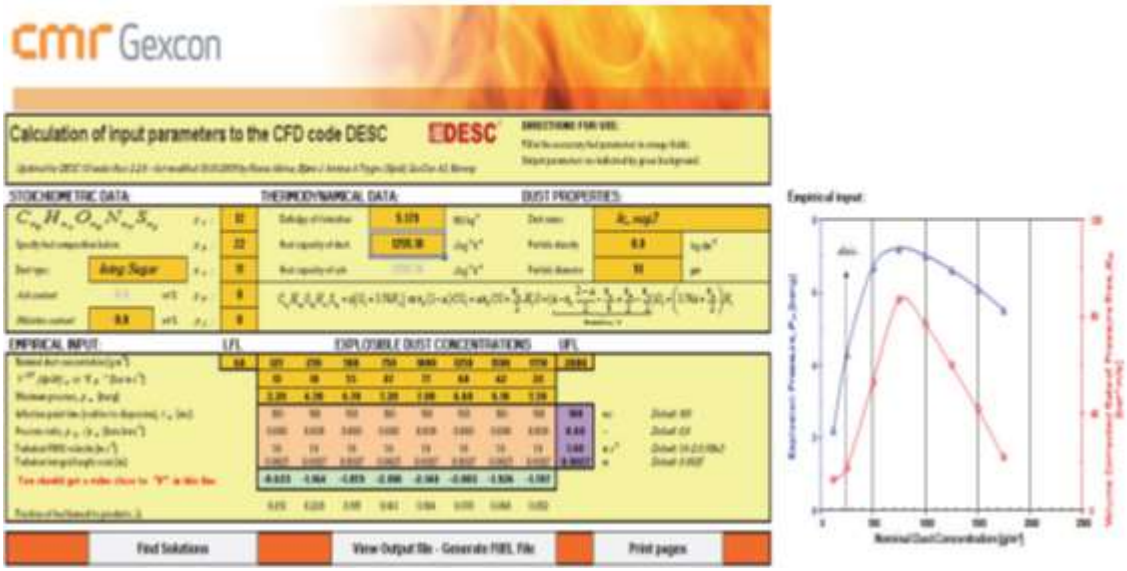

Figura 25 - Planilha presente no software DESC.
Fonte: ABSUWER (2012).

A câmara SIWEK é indicada em algumas normas (EN 14034 e ASTM E1226-10) para a determinação dos parâmetros de explosão de pós, tais como P_{max}, $(dp/dt)_{max}$, K_{St} e MEC. A câmara consiste em uma esfera oca de 20 litros de volume interno fabricada em aço inoxidável (Figura 26). Para o ensaio, uma amostra de pó é colocada na câmara de armazenamento. A câmara é pressurizada e o pó é disperso através da válvula de saída e do bocal de recuperação (Figura 27) (Krietsch et al., 2013)

Figura 26 - Câmara SIWEK.
Fonte: Safety Management Services (2016)

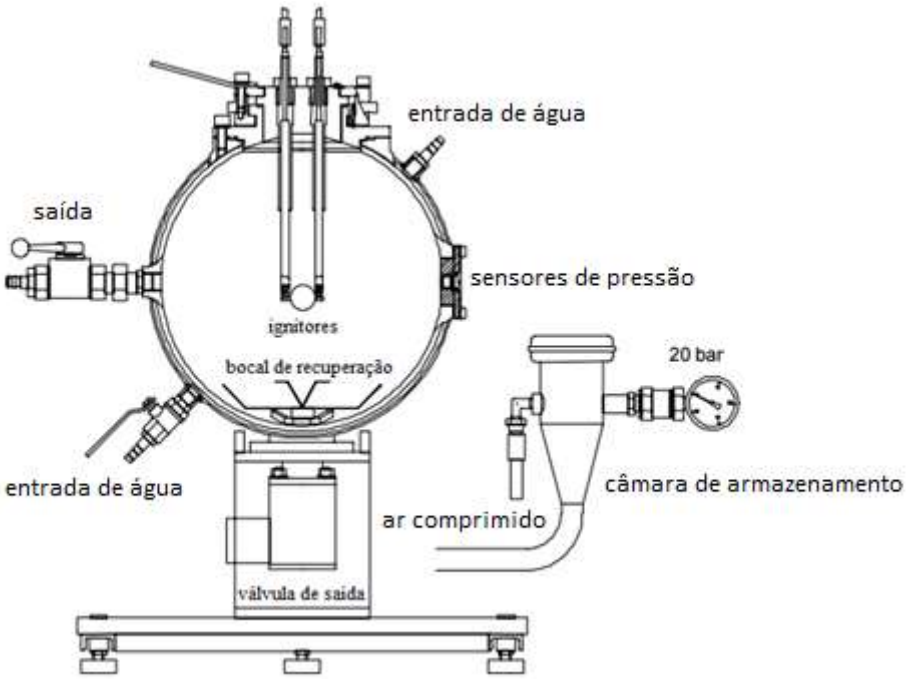

Figura 27 - Componentes da câmara de SIWEK.
Fonte: Adaptado CESANA e SIWEK (2016)

No estudo de ABUSWER (2012), a geometria da planta da Imperial sugar foi construída utilizando o módulo do FLACS de construção de geometrias (Figura 28).

Alguns detalhes, como a localização exata dos trabalhadores, máquinas, e várias estruturas no momento da explosão, não estavam disponíveis, tendo sido estimadas. Do mesmo modo, os valores destrutivos de pressão estática das paredes da fábrica e das janelas também não existiam, e um valor fixo foi assumido para cada item (ABUSWER, 2012).

Ainda de acordo com ABUSWER (2012), na geometria da fábrica da *Imperial Sugar*, a destruição das paredes foi simulada como portões (aberturas) nas paredes. A Figura 29 e a Figura 30 mostram estes portões como grupos. Também foram adicionados no modelo portões que foram cobertos por painéis de alívio de pressão (PP), que abrem a determinada pressão. Eles foram distribuídos no túnel inferior (PP1 – PP4, PP58 e PP57), em cada lado do túnel de subida vertical (PP5 – PP8 e PP53 – PP56), e no túnel superior (PP9 – PP12). Estes portões e grupos foram utilizados como painéis de segurança de pressão e foram distribuídos para liberar eficientemente qualquer pressão oriunda de uma explosão. Na Figura 28 ilustra-se em perspectiva 4 andares dos prédios de empacotamento, e a Figura 31 mostra a distribuição dos módulos na geometria da fábrica da *Imperial Sugar* (ABUSWER, 2012).

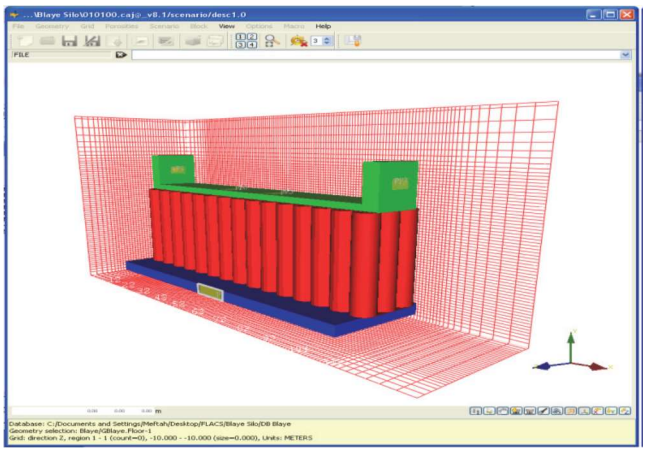

Figura 28 - Construção do modelo da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABUSWER (2012)

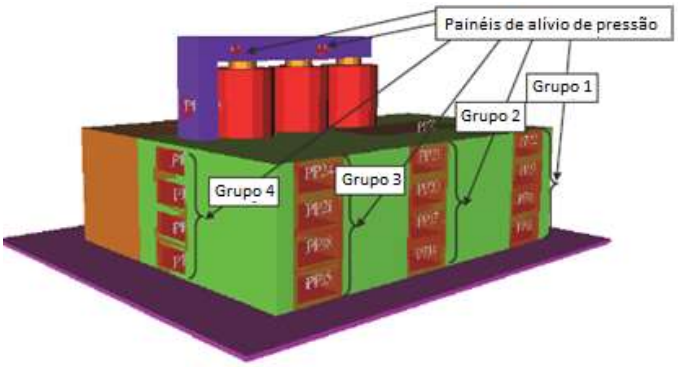

Figura 29 - Imagem CASD (visão frontal 3D) da refinaria da Imperial Sugar com os painéis de alívio de pressão (PPs).
Fonte: Adaptado de ABUSWER (2012)

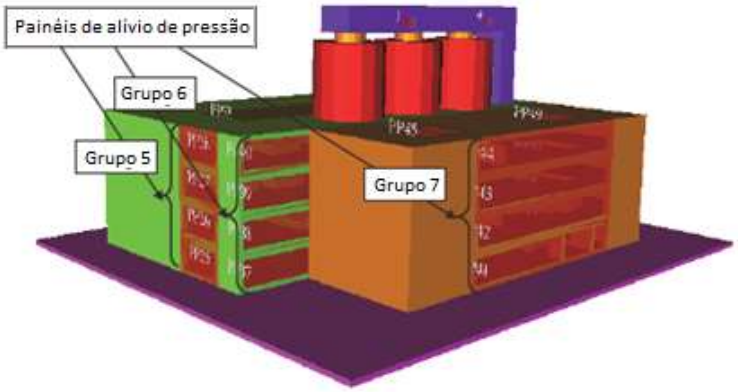

Figura 30 - Imagem CASD (visão traseira 3D) da refinaria da Imperial Sugar com os painéis de alivio de pressão (PPs).
Fonte: Adaptado de ABUSWER (2012)

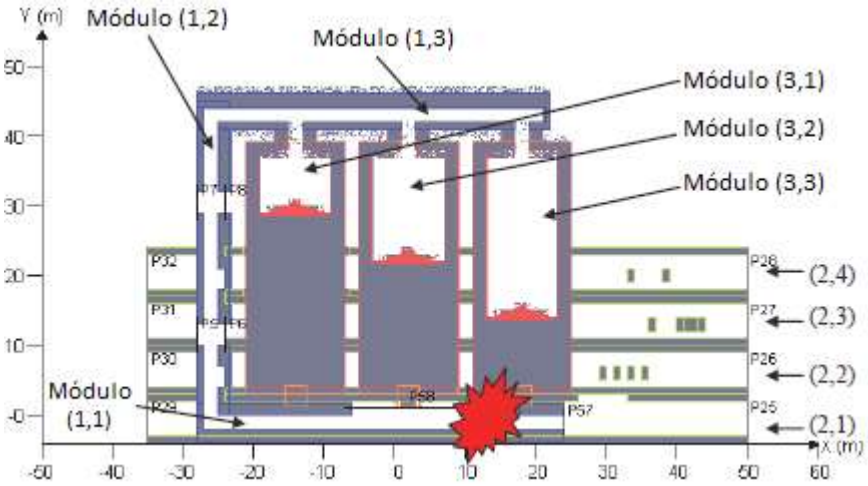

Figura 31 - Vista lateral da distribuição dos módulos na geometria da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: Adaptado de ABUSWER (2012)

Valores de pressão estática variando de 7 a 70 kPa podem causar destruição completa de uma unidade (COZZANI e SALZANO, 2004). Portanto, os painéis de pressão foram ajustados para estar dentro dos valores de sobrepressão destrutiva a 10, 20 e 30 kPa para representar diferentes forças aplicadas aos componentes da parede da refinaria, como representado no Quadro 8 (ABUSWER, 2012).

Na Figura 32, M1 a M80 representam pontos de pressão de monitoramento no DESC. A concentração de pó, pressão de abertura dos painéis, propriedades do combustível (pó de açúcar), energia de ignição e o tamanho do volume simulado foram definidos e ajustados de acordo com os dados disponíveis. O Quadro 9 apresenta alguns dados importantes necessários para a simulação (ABUSWER, 2012).

Quadro 8 - Valores de pressão de abertura dos painéis de pressão e suas dimensões na geometria da refinaria da Imperial Sugar. Fonte: Adaptado de ABUSWER (2012)

Painel de pressão No.	Pressão de abertura (kPa)	Área (m^2)
PP1 – PP4	30	68
P58	30	85
P57	30	20
PP5 – PP8	30	25
PP53 – PP56	30	20
PP9 – PP12	30	40
Grupo 1	20	84
Grupo 2	30	84
Grupo 3	20	84
Grupo 4	20	84
Grupo 5	10	84
Grupo 6	20	112
Grupo 7	30	294

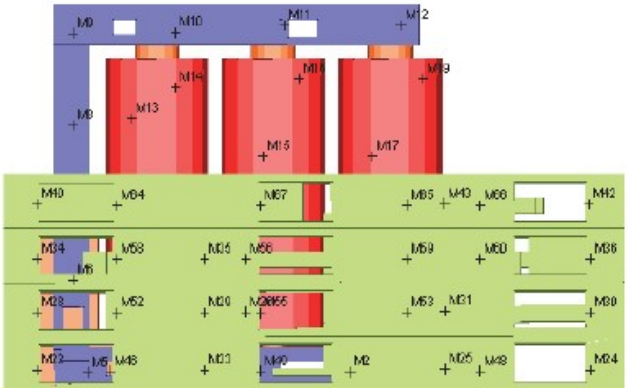

Figura 32 - Representação no DESC dos 3700 m3 dos silos interconectados e os pontos de monitoramento (M1 - M80) na refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABUSWER (2012).

Quadro 9 - Dados de entrada no DESC para a geometria da Imperial Sugar.
Fonte: Adaptado de ABSUWER (2012)

No	Dados de entrada no DESC
1	Tamanho do volume de simulação (x,y,z) = (110 m, 70 m, 95 m)
2	Tamanho da geometria (x,y,z) = (85 m, 50 m, 70 m)
3	Nome do combustível = Açúcar em pó
4	Concentração do pó = 500 g/m^3
5	Número de pontos de monitoramento = 80
6	Número de painéis de pressão (PP) = 58
7	Energia de Ignição = 10 kJ

De acordo com ABSUWER (2012), utilizando a equação Probit (5.1) pode-se estimar o dano ocorrido como resultado da pressão máxima obtida da simulação no DESC.

$$Y = K_1 + K_2 \ln(P_{ovr}) \quad (5.1)$$

onde Y = Variável Probit (adimensional)

(P_{ovr}) = sobrepressão (N/m^2)

K_1 e K_2 = constantes

Segundo CROWL e LOUVAR (2007), as constantes K1 e K2 que representam danos estruturais são, respectivamente, -23,8 e 2,92. Portanto a equação Probit utilizada foi:

$$Y = -23{,}8 + 2{,}92 * \ln(P_{ovr}) \quad (5.2)$$

As simulações foram realizadas por ABSUWER (2012), para cada andar da refinaria, e revelaram que a pressão máxima de explosão dentro da fábrica da *Imperial Sugar* foi de 25 kPa, sobrepressão que foi atingida em 2,6 segundos. As Figuras 33 a 36 mostram a vista superior dos andares e a distribuição da pressão. As áreas estão delimitadas com linhas de contorno para designar as diferentes zonas de pressão (A – R). Cada zona tem uma cor diferente para indicar a magnitude da pressão (ABSUWER, 2012).

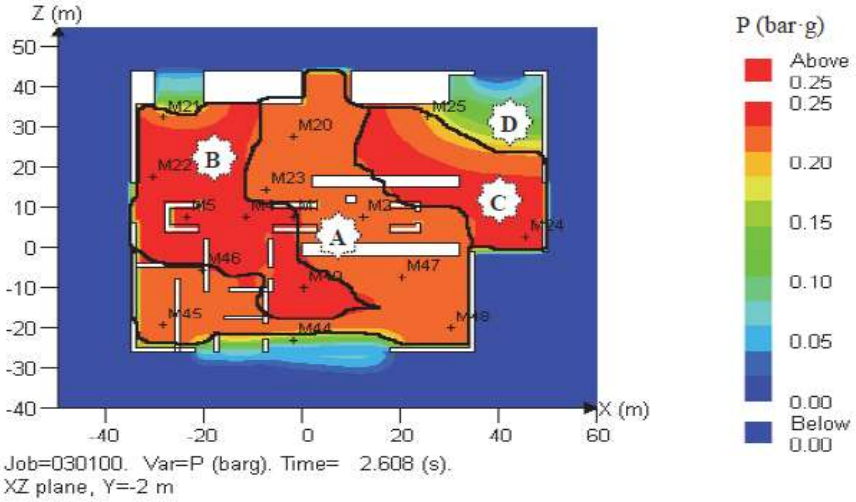

Figura 33 - Simulação de pressão no DESC a partir da vista superior do primeiro andar, Módulo (2,1) da explosão da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABSUWER (2012)

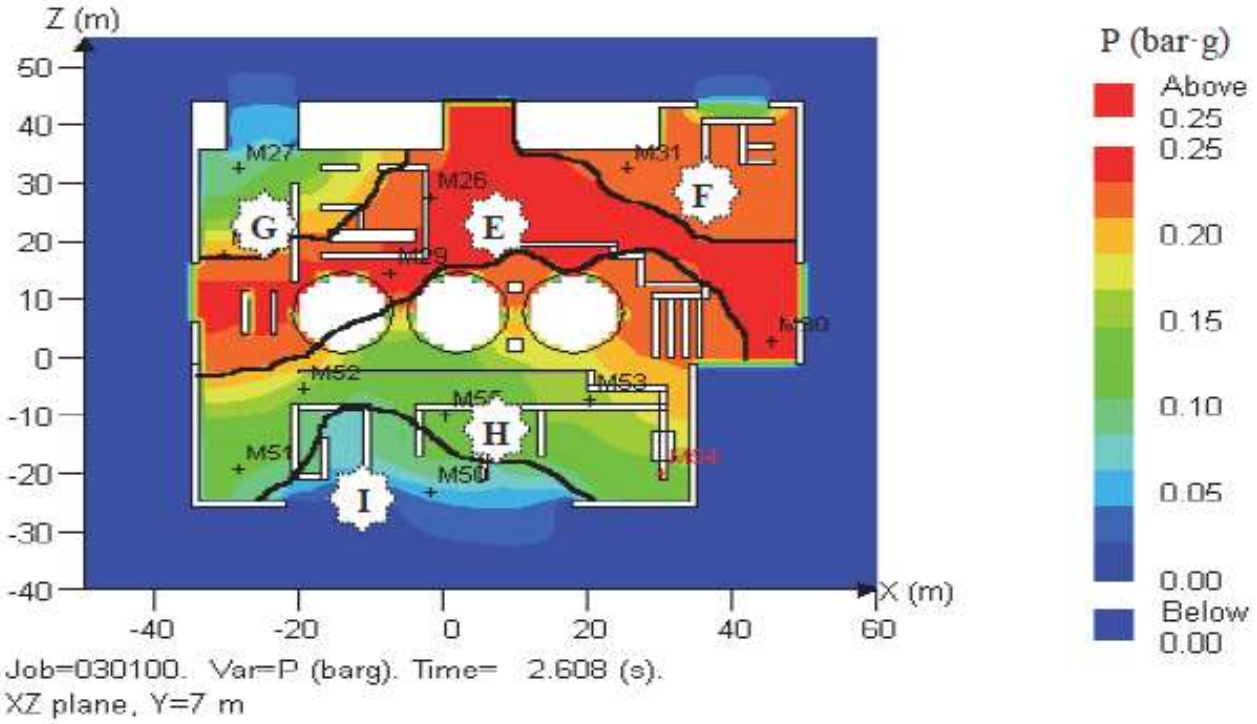

Figura 34 - Simulação de pressão no DESC a partir da vista superior do segundo andar, Módulo (2,2) da explosão da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABSUWER (2012)

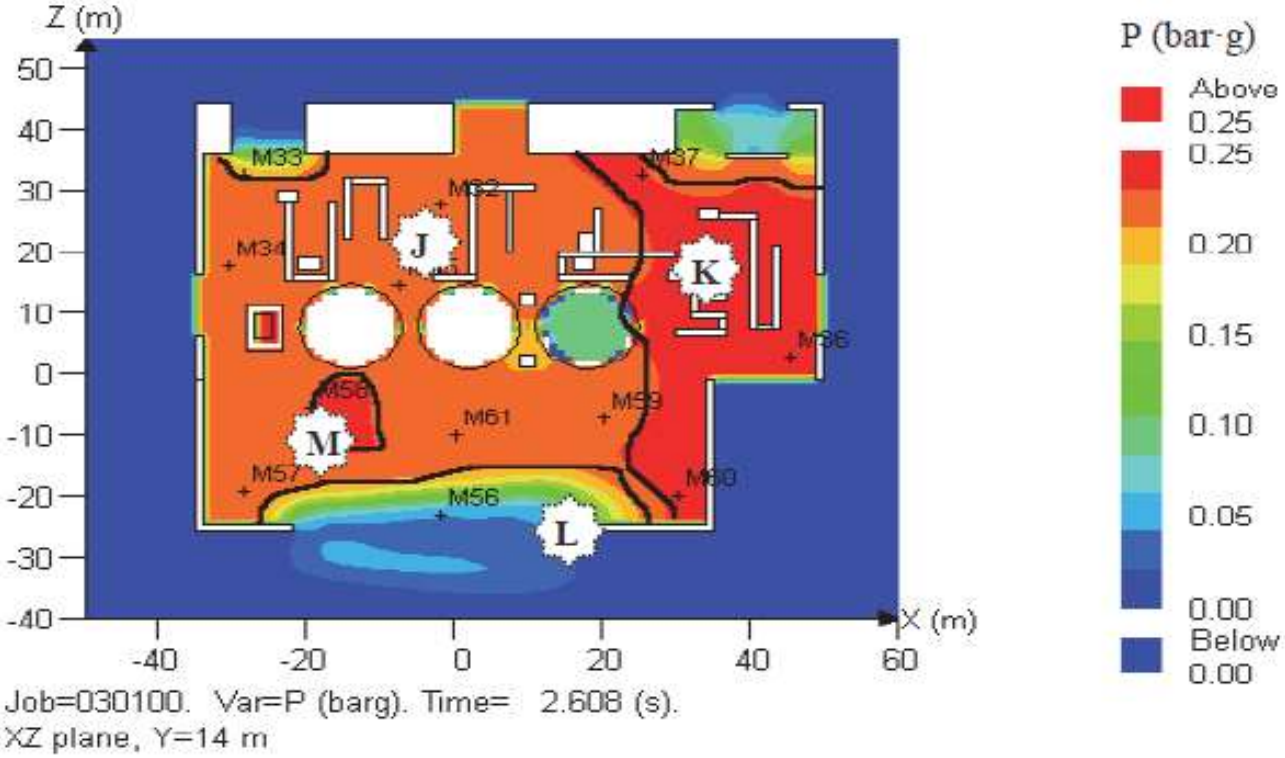

Figura 35 - Simulação de pressão no DESC a partir da vista superior do terceiro andar, Módulo (2,3) da explosão da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABSUWER (2012)

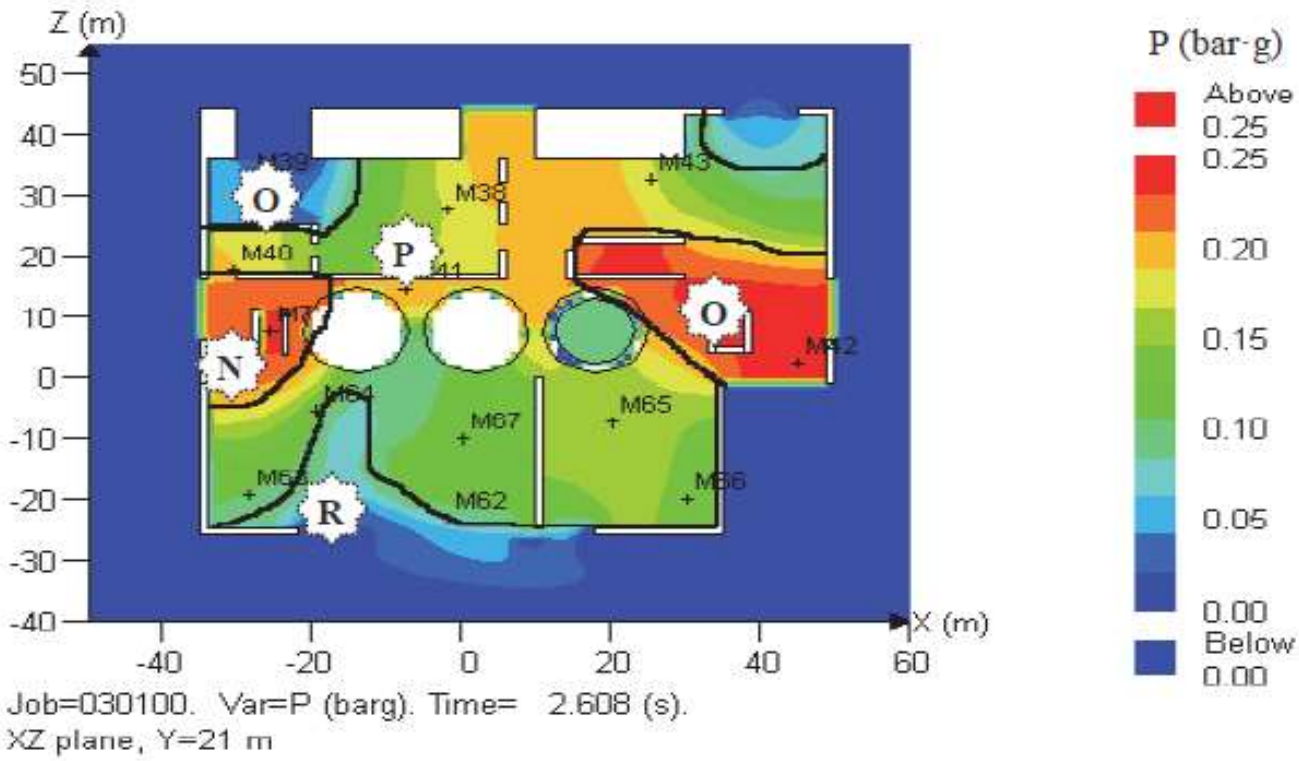

Figura 36 - Simulação de pressão no DESC a partir da vista superior do quarto andar, Módulo (2,4) da explosão da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABSUWER (2012)

As Figuras 37 até 40 mostram o desenvolvimento da pressão de explosão, medida pelos pontos de monitoramento (M1 – M67), em função do tempo (ABSUWER, 2012). A Figura 37 mostra dois picos de explosão, que representam a pressão da explosão primária dentro da esteira recoberta por painéis, e a pressão da explosão secundária no primeiro andar, respectivamente. De acordo com a Figura 37, em 1,2 s a pressão dentro da esteira abaixo dos silos 1 e 2 atinge 0,3 bar(g) (30 kPa), que é a pressão definida no modelo (portões) como representativa das forças das paredes da fábrica. Após este evento, a pressão repentinamente diminui para um valor próximo a zero por conta da mesma ter sido liberada dentro da área do primeiro andar da refinaria, que possui um volume muito maior que a esteira. Logo em seguida, em 1,7 s, dá-se início a explosão secundária como resultado das condições pré-existentes no primeiro andar da fábrica. A pressão da explosão secundária aumenta até atingir 0,2 bar, que foi a pressão de abertura dos painéis nas paredes da refinaria. A pressão continua a aumentar por mais alguns milissegundos, atingindo 0,25 bar em 2,4 s, por conta da taxa de pressão da explosão ser significativamente maior que a taxa de alívio

da pressão. Após este evento, a curva de pressão cai repentinamente quando a pressão foi totalmente liberada. No tempo de 3,1 s a pressão flutua por alguns instantes (devido a algumas zonas comprimidas dentro do andar) até que a pressão é completamente aliviada no tempo de 6 s. As Figuras de 38 a 40 mostram os picos da pressão de explosão para o segundo, terceiro e quarto andar. Todas as três possuem o desenvolvimento das pressões praticamente idênticas durante o mesmo tempo de explosão (6 s).

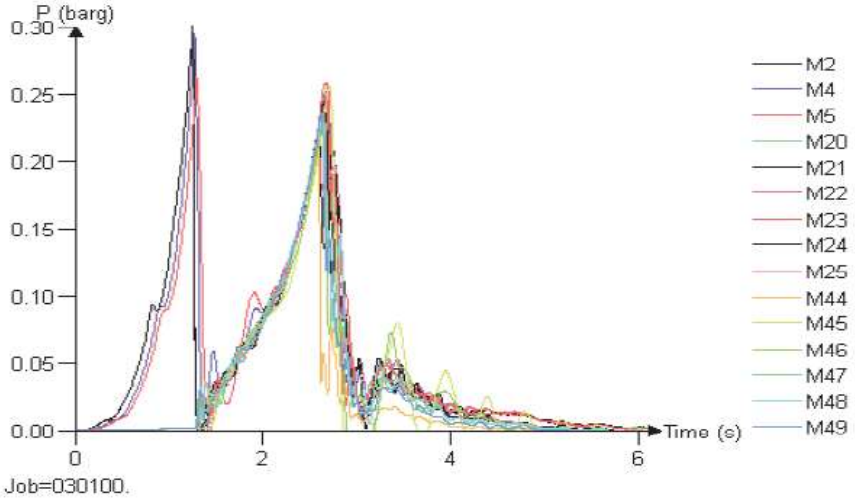

Figura 37 - Simulação pressão/tempo dos pontos de monitoramento no primeiro andar, Modulo (2,1), da explosão da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABSUWER (2012)

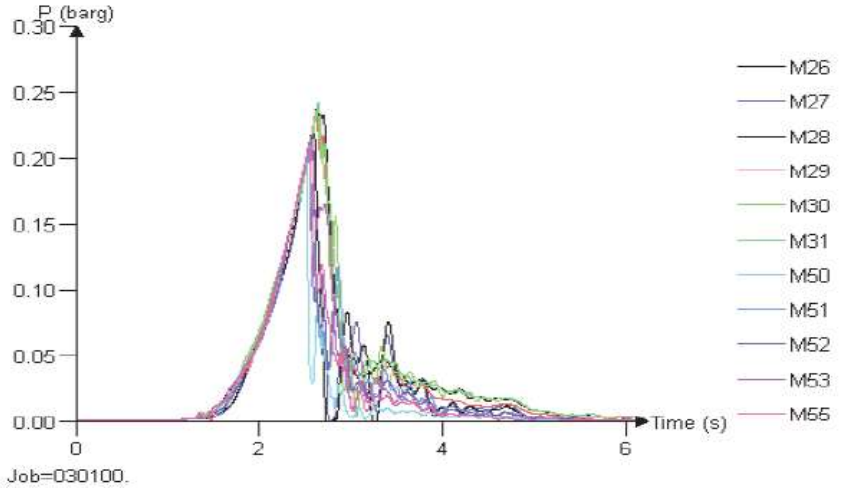

Figura 38- Simulação pressão/tempo dos pontos de monitoramento no segundo andar, Modulo (2,2), da explosão da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABSUWER (2012)

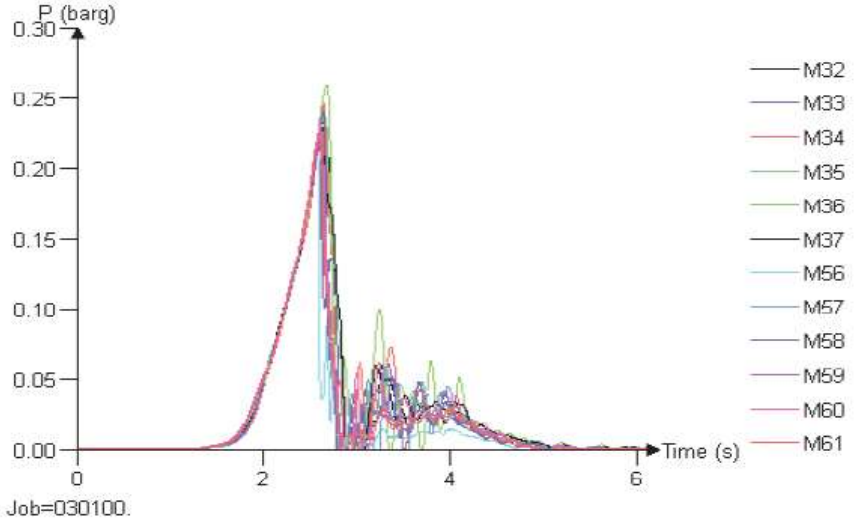

Figura 39 - Simulação pressão/tempo dos pontos de monitoramento no terceiro andar, Modulo (2,3), da explosão da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABSUWER (2012)

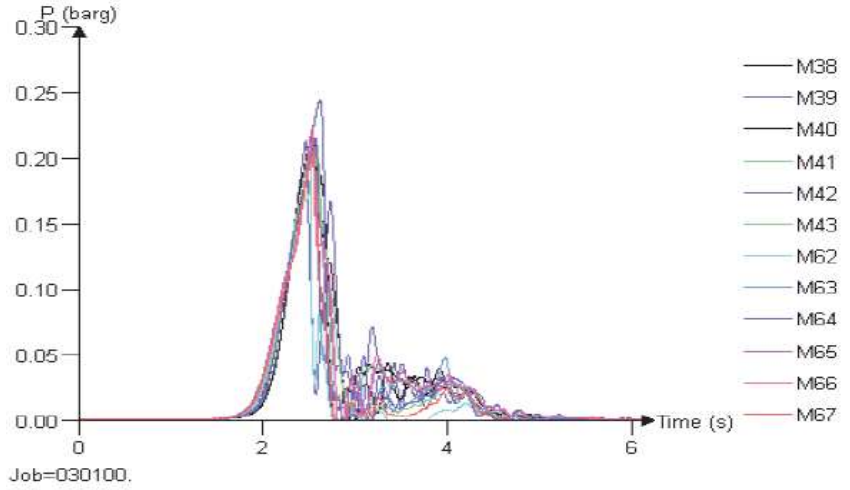

Figura 40 - Simulação pressão/tempo dos pontos de monitoramento no quarto andar, Modulo (2,4), da explosão da refinaria da Imperial Sugar.
Fonte: ABSUWER (2012)

Com o auxílio da equação Probit, e das transformações do Quadro 10, foi possível determinar o dano estrutural de cada zona de pressão como uma porcentagem do dano total.

Quadro 10 - Quadro de conversão das porcentagens em Probit dado no interior do quadro.
Fonte: CROWL & LOUVAR (2007)

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

A pressão de explosão, juntamente com o seu valor de Probit correspondente e sua porcentagem de dano para cada zona de pressão nos andares da refinaria, podem ser vistos nos quadros de 11 até 14.

Quadro 11 - Porcentagem de danos Probit causados pela sobrepressão no Módulo (2,1).
Fonte: Adaptado de ABSUWER (2012)

Zona do Incidente	P_{max} [bar(g)]	Y	Porcentagem do dano (%)
A	0.22	5.39	65
B	0.25	5.77	78
C	0.23	5.52	70
D	0.16	4.47	30

Quadro 12 - Porcentagem de danos Probit causados pela sobrepressão no Módulo (2,2). Fonte: Adaptado de ABSUWER (2012)

Zona do Incidente	P_{max} [bar(g)]	Y	Porcentagem do dano (%)
E	0.25	5.77	78
F	0.22	5.39	65
G	0.16	4.47	30
H	0.16	4.47	30
I	0.10	3.10	03

Quadro 13 - Porcentagem de danos Probit causados pela sobrepressão no Módulo (2,3). Fonte: Adaptado de ABSUWER (2012)

Zona do Incidente	P_{max} [bar(g)]	Y	Porcentagem do dano (%)
J	0.22	5.39	65
K	0.25	5.77	78
L	0.16	4.47	30
M	0.25	5.39	78*

*O valor correto seria de 65% e não 78%

Quadro 14 - Porcentagem de danos Probit causados pela sobrepressão no Módulo (2,4). Fonte: Adaptado de ABSUWER (2012)

Zona do Incidente	P_{max} (bar(g))	Y	Porcentagem do dano (%)
N	0.22	5.39	65
O	0.25	5.77	78
P	0.16	4.47	30
Q	0.04	0.42	0
R	0.07	2.06	01

5.1.6. Recomendações da Norma Técnica Brasileira de prevenção contra incêndios e explosões aplicadas à *Imperial Sugar*

De acordo com a NBR 16385 é possível destacar alguns itens com relação ao acidente ocorrido na *Imperial Sugar*:

- Investigação de acidentes

Segundo o item 4.10 da NBR 13685, devem ser investigados os acidentes que resultam em incêndio ou explosão de uma magnitude capaz de causar danos materiais, descontinuidade de produção ou ferimentos.

O acidente da *Imperial Sugar* foi investigado pelo CSB e o resultado da investigação foi divulgado por meio de um relatório em setembro de 2009, o que atende o item 4.10 da norma.

- Atenuação da propagação do incêndio e da explosão

De acordo com o item 5.2.4 da NBR 13685, a atenuação da propagação do incêndio e da explosão é alcançada quando os produtos e/ou materiais combustíveis localizados em áreas adjacentes não puderem atingir suas respectivas temperaturas de ignição. O projeto da edificação, conservação e limpeza também deve prevenir que os produtos e/ou materiais combustíveis se acumulem em áreas exteriores ao processo, contribuindo para a propagação do incêndio ou da explosão. Por fim, os sistemas de processamento de partículas devem prevenir a propagação do incêndio ou da explosão, de um processo para o outro processo adjacente, ou para o interior da edificação.

Segundo o relatório de investigação do acidente da *Imperial Sugar*, havia expressivo acúmulo de pó de açúcar em áreas exteriores ao processo (CSB, 2009), o que contribuiu para a propagação da explosão (explosão secundária). Logo, medidas de atenuação da propagação de incêndio e explosão não foram totalmente adotadas na fábrica.

- Prevenção dos efeitos da explosão

A prevenção dos efeitos da explosão é alcançada, segundo a NBR 13685, quando as deflagrações não produzirem pressões internas no ambiente ou

equipamento, suficientes para ameaçar sua integridade estrutural. A deflagrações também não podem produzir extensão da frente de chama fora do compartimento ou do equipamento, exceto em casos intencionalmente ventilados para lugar seguro. Por fim, as deflagrações não podem produzir ruptura do compartimento ou do equipamento e projeção de fragmentos e/ou outros objetos adjacentes que possam constituir riscos.

Segundo a CSB (2009), o acidente da *Imperial Sugar* foi causado, entre outros fatores, pela instalação de uma estrutura de aço inox com tampo e painéis laterais para proteger o açúcar granulado transportado na esteira reduzindo os riscos de contaminação. Essa estrutura de aço não possuía sistema de proteção contra explosões e, portanto, qualquer deflagração ocorrida em seu interior seria suficiente para ameaçar a sua integridade estrutural e rompê-la. Deste modo a Imperial Sugar, segundo a NBR 13685, não atendia ao item de prevenção dos efeitos da explosão.

- Cenários de explosão

A NBR 16385, no item 5.3.2, afirma que todo duto, transportador fechado, silo, depósito fechado, ciclone, filtros ou outros vasos contendo um pó combustível em quantidade suficiente ou com condições de suportar a propagação de uma frente de chama devem ser considerados risco de explosão nas situações de partida, condições normais ou anormais, ou desligamento da operação. Também há risco de explosão durante a manutenção ou falha de equipamento.

Os responsáveis pela instalação da estrutura de aço inox que veio a causar a explosão primária em uma das esteiras da *Imperial Sugar* não consideraram essa instalação como de risco de explosão.

- Risco de explosão em equipamento enclausurado

De acordo com o item 6.1.7 da NBR 16385, a existência do risco de uma explosão deve ser considerada no equipamento enclausurado de processo, quando a presença de pó combustível possui quantidade suficiente para causar a ruptura do compartimento quando houver inflamibilidade e em suspensão.

No caso analisado, a estrutura de aço inox enclausurou a esteira de transporte de açúcar da *Imperial Sugar* causando a explosão primária. Esta, por sua vez, desencadeou outras explosões que vieram a destruir a fábrica quase que por completo. De acordo com as investigações, a instalação da estrutura de aço sobre a esteira não foi considerada na época, como causadora de um possível risco de explosão.

- Tratamento das áreas de processo e de manuseio de pó combustível

De acordo com o item 6.2 da NBR 16385, as áreas nas quais os pós combustíveis são produzidos, processados, manuseados ou coletados de tal forma que o acúmulo de pó combustível em superfícies expostas ou escondidas, externamente ao equipamento ou recipientes, exceda o limite determinado por esta norma, devem ser destacadas de forma segregada ou separada de outras ocupações, para minimizar os danos a partir de um incêndio ou explosão.

Na fábrica da *Imperial Sugar*, antes do acidente de 7 de fevereiro de 2008, não havia tratamento de áreas separadas de outras ocupações de modo a mitigar os danos causados por uma possível explosão.

- Sistemas de alívio de deflagração

O item 6.4 da NBR 16385 afirma que todo ambiente construído contendo pó com risco de explosão, o qual seja externo aos equipamentos protegidos, deve ser dotado de sistema de alívio de deflagração direcionado para uma localização segura.

Neste contexto, a estrutura de aço inox utilizada para enclausurar uma das esteiras transportadoras de açúcar, e que permitiu o surgimento de condições que viriam a causar a explosão primária, poderia ter sido projetada com sistemas de alívio de deflagração. Esta medida poderia salvar vidas e reduzir os danos materiais.

- Transportadores enclausurados

O item 7.17 da NBR 16385 afirma que transportadores enclausurados com potencial de explosão devem ser protegidos.

Não foi projetado nenhum sistema de proteção para a estrutura de aço inox instalada em uma das esteiras transportadora de açúcar da refinaria da Imperial Sugar, logo a empresa estaria também em desacordo com recomendação deste item da NBR.

5.2. *AL Solutions*

A empresa *AL Solutions* foi fundada em 1991, e foi incorporada à atual administração em 2006 como *Solutions AL, Inc*. (*AL Solutions*, 2015). Antes da incorporação, a empresa era de propriedade da *Jamegy Inc*. A *AL Solutions*, em 2010, operava duas plantas de processamento de metais. O escritório principal e uma das plantas ficavam localizados em *New Cumberland*, *West Virginia*. A outra planta ficava em Washington, Missouri. A *AL Solutions* empregava 23 trabalhadores em sua planta de *New Cumberland* e 2 trabalhadores na planta de *Washington* (CSB, 2010).

De acordo com o relatório oficial emitido pela CSB (2010), a planta da *AL Solutions*, em *West Virginia*, ficava na margem do rio *Ohio*. A planta possuía uma instalação principal de produção, uma área externa de armazenamento, laboratório e um escritório. A planta operava 24 horas por dia, 7 dias por semana. Possuía equipamentos para moagem de metais, mistura, prensagem e tratamento de água. O edifício de produção ficava separado do armazém e do escritório por uma estrada de acesso (Figura 41).

Figura 41 - Vista aérea da planta da AL Solutions (New Cumberland), 2010.
Fonte: Adaptado de CSB (2010)

5.2.1. O Processo

A *AL Solutions* processava sucatas metálicas de titânio e zircônio produzindo discos compactos densamente comprimidos, medindo aproximadamente 7,62 cm de diâmetro e 2,54 a 5,08 cm de espessura. O peso e o tamanho dos discos podiam variar de acordo com a especificação do cliente. Os clientes da *AL Solutions* utilizavam os discos compactos em fornos, ou os utilizavam adicionados às ligas de alumínio para aumentar a resistência mecânica das mesmas (CBS, 2010).

Ainda de acordo com o documento emitido pela CSB (2010), vários fornecedores enviavam sucata de titânio e zircônio para a *AL Solutions* em tambores de cerca de 210 litros (Figura 42). As sucatas chegavam acondicionadas em água, mas também vinham empacotadas com sal ou com um agente para torná-las inertes, tais como argônio, de modo a diminuir o risco de explosão durante o transporte (CSB, 2010).

O titânio e o zircônio são metais com grande risco de inflamabilidade (CSB, 2010). Partículas finas de titânio são facilmente inflamáveis e podem sofrer ignição espontânea em concentrações altas de oxigênio ou pressão elevadas. De acordo com a *Hazard Materials Identification System* (HMIS), os pós de titânio têm uma classificação de risco de inflamabilidade de 3 ou 4 (em uma escala de 0 até 4, com o risco mais elevado sendo classificado como 4). Partículas de titânio em suspensão em concentrações maiores que 43 g/m^3 podem causar explosões (CSB,2010). O zircônio possui risco de inflamabilidade equivalente ao do titânio, sendo sua classificação no HMIS também como 3 ou 4. Partículas muito pequenas de zircônio (com menos de 2% de umidade) podem auto-inflamar no ar à temperatura ambiente. Nuvens de pó de zircônio com concentrações inferiores a 100 g/m^3 são explosivas (CSB, 2010).

Figura 42 - Amostra de sucata de titânio usada na AL Solutions.
Fonte: CSB (2010).

Segundo a CSB (2010), a empresa retirava as sucatas de metal dos tambores e as moíam, submersas em água, por várias horas. Durante a moagem, uma lâmina reduzia o tamanho das partículas do metal. O processo também removia a camada superficial de óxido da matéria-prima. Quando o processo de moagem era finalizado, os operadores deixavam os metais decantarem na água, e estes eram destinados para tanques de armazenamento (Figura 43).

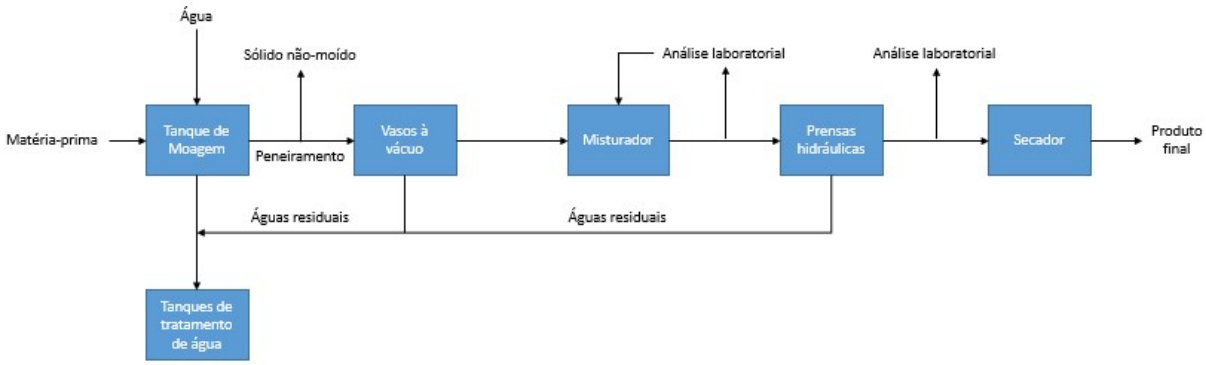

Figura 43 - Diagrama simplificado do processo de prensagem da planta de New Cumberland.
Fonte: Adaptado de CSB, 2010.

O metal moído era transferido do tanque de moagem para o processo de peneiramento, onde sólidos maiores eram removidos. Estes sólidos poderiam ser devolvidos para o tanque de moagem para posterior redução de tamanho ou descartados. Operadores colocavam o metal moído e peneirado em vasos que operavam à vácuo e depois removiam o excesso de água para os tanques de tratamento de água. Em seguida, os operadores misturavam o metal para assegurar uniformidade na composição do lote. Uma vez que o material atendia as especificações verificadas em laboratório, o mesmo era encaminhado para as prensas hidráulicas. O material misturado era prensado em discos compactos (Figura 44). Uma prensa era utilizada para criar os discos de zircônio e outras duas prensas criavam os discos de titânio. Um forno era utilizado para remover qualquer quantidade de água remanescente dos processos anteriores. O laboratório analisava a densidade e a umidade dos discos antes dos mesmos serem embrulhados em papel alumínio e enviados para o cliente (CSB, 2010).

Em um turno típico, quatro trabalhadores realizavam suas funções na planta de produção: dois operadores operavam as prensas, um operador operava o misturador,

e um supervisor era encarregado do moinho e do tratamento de água. Outro operador trabalhava no armazém, secando e embalando os discos. Durante o dia, o gerente da fábrica e um engenheiro responsável pelas operações ficavam no local para ajudar com quaisquer questões operacionais. Durante o turno, dois técnicos de laboratório analisavam as amostras (CSB, 2009).

Figura 44 - Amostras dos discos compactados de zircônio.

Fonte: CSB (2010)

5.2.2. O Acidente

De acordo com o relatório emitido pela CSB, por volta das 13:20 horas do dia 9 de dezembro de 2010, um eletricista que estava localizado aproximadamente a 2 m do galpão de produção, ouviu um ruído vindo da porta parcialmente aberta do galpão. O funcionário descreveu o ruído para a equipe de investigação da CSB "como oriundo de uma falha metálica, como se algo tivesse estalado ou caído no chão". Após este barulho o funcionário ouviu um som parecido com o de se acender um fogão, e após isso o som de uma grande explosão. O supervisor de turno estava na sala do moinho, e também ouviu o barulho de uma grande explosão e segundos depois notou chamas vindo da sala de mistura e da prensa. Outro eletricista, localizado na sala de hidráulica, vizinha as salas de mistura e de prensa, ouviu o ruído de uma explosão vindo de ambas as salas vizinhas. Este eletricista relatou ver uma explosão vindo em direção a sala onde ele estava. A explosão o atingiu, queimando sua cabeça, pescoço, braços e mãos. Um terceiro eletricista também estava presente no momento da explosão. Ele se encontrava no banheiro e ouviu um grande ruído. Sentiu o deslocamento do ar entrando pela porta do banheiro, e então viu faíscas laranja no teto. Empregados que estavam trabalhando no escritório ouviram a explosão e ligaram para os bombeiros

(Figura 45). Alguns funcionários relataram que ouviram uma segunda explosão minutos depois da explosão principal. Ao contrário do caso da Imperial Sugar, onde explosões secundárias teriam sido causadas pelo pó acumulado na área de trabalho, neste caso a segunda explosão não teria relação com pós ou poeiras. Segundo a CSB, essa segunda explosão pode ter sido causada pela ruptura do tanque de propano de uma empilhadeira que estava localizada dentro do edifício (CSB,2010).

Figura 45 - Galpão de produção momentos após a explosão da AL Solutions.
Fonte: CSB (2010)

Como resultado da explosão inicial, o operador da prensa de zircônio sofreu queimaduras graves. O supervisor, um dos eletricistas e o gerente da planta prestaram socorro ao operador antes da chegada do serviço de emergência. Neste tempo, os funcionários perceberam que outros dois operadores estavam desaparecidos e presumiram que ambos ainda se encontravam no galpão em chamas. Os bombeiros tiveram dificuldade de acessar o interior do galpão por conta da intensidade das chamas. Assim que conseguiram entrar, encontraram dois operadores falecidos nos locais indicados pela Figura 46 (CSB, 2010).

Figura 46 - Layout do galpão de produção, provável ponto de início do incidente e locais onde se encontravam os trabalhadores feridos e falecidos no momento da explosão da AL Solutions.
Fonte: Adaptado de CSB (2010).

Além dos dois operadores, que estavam na sala do misturador e das prensas, e que morreram no local, o operador da prensa de zircônio morreu três dias após por consequência das graves queimaduras (CSB, 2010).

A explosão e o incêndio subsequente causaram danos nas portas, paredes e janelas do galpão. A Figura 47 mostra o teto da sala de mistura e prensagem após a explosão (CSB, 2010).

Momentos antes do acidente os dois operadores que viriam a falecer estavam operando as prensas e produzindo os discos de zircônio e titânio. Outro operador estava no misturador, misturando uma batelada de zircônio. O supervisor de turno estava trocando a lâmina do moinho. Os três eletricistas estavam realizando trabalhos

preparatórios para uma interrupção de manutenção para o dia seguinte ao da explosão (CSB, 2010).

Figura 47 - Teto da sala de mistura e prensagem da AL Solutions.
Fonte: CSB (2010)

5.2.3. Fatores contribuintes para o acidente

Durante o processo de moagem o metal é finamente dividido e tem suas superfícies expostas ao ar, podendo se tornar altamente reativo. Metais finamente divididos, como o zircônio e o titânio, podem se tornar pirofóricos e entrar em combustão espontaneamente quando em contato com o ar (CSB, 2010). A explosão ocorrida na *AL Solutions* provavelmente iniciou quando partículas foram inflamadas no misturador no momento em que o mesmo estava processando o zircônio. Faíscas produzidas pelo contato metal-metal entre as lâminas do misturador e a parede lateral podem ter inflamado o zircônio (Figura 48) (CSB, 2010).

Figura 48 - Sequência de eventos que resultaram na explosão de pó na planta da AL Solutions. 1) Utilização de um misturador para processamento do zircônio. 2) As lâminas do misturador atingem a parede de lateral, o que pode ter gerado faíscas. 3) As faíscas causam a ignição do pó de zircônio. 4) A explosão inicial dispersou no ar outros pós presentes na planta causando explosão secundária.
Fonte: CSB (2010)

As investigações realizadas pela CSB no interior do galpão da *AL Solutions*, após a explosão, revelaram indicações visuais claras de que as lâminas do misturador se chocavam com a parede lateral do mesmo (Figura 49). Também foram examinados o teto e as paredes adjacentes ao misturador, onde foram encontradas evidencias visuais de combustão de uma nuvem de pó sendo projetada para cima, em direção ao teto, como visto na Figura 50.

Os funcionários da *AL Solutions* já haviam observado que as lâminas do misturador estavam atingindo a parede lateral alguns dias antes da explosão. Para resolver este problema, os funcionários da manutenção ajustaram as lâminas, aumentando o espaço entre elas e a parede, mas esta ação não solucionou permanentemente o problema do contato metal/metal. No dia em que ocorreu a explosão, um operador solicitou à equipe de manutenção a substituição de uma lâmina desgastada do misturador. A substituição foi realizada reaproveitando uma lâmina de um misturador antigo. Toda a manutenção realizada no misturador que estava em produção era sempre direcionada para resolver, temporariamente, o problema causado pelo atrito entre as lâminas do misturador e as paredes (CSB, 2010).

Figura 49 - Escoreamento, destacado em amarelo, e estufamento da parede lateral do misturador da AL Solutions. Fonte: CSB (2010).

Figura 50 - Misturador, parede adjacente e teto do AL Solutions após a explosão.
Fonte. CSB (2010)

Segundo a CSB, no momento da explosão, o misturador provavelmente continha uma quantidade substancial de zircônio. Após o acidente, a tampa do misturador, que deveria estar na posição fechada durante a produção, foi encontrada aberta. A explosão que se originou da geração de faíscas do contato metal/metal das lâminas do misturador com as paredes, além de inflamar o zircônio contido no equipamento, também inflamou, posteriormente, tambores e vasos de zircônio e titânio que se encontravam destampados em vários pontos do galpão de produção, propagando o incêndio (CBS, 2010).

5.2.4. Prevenção de acidentes na *AL Solutions*

Segundo a investigação realizada pela CSB (2010), os empregados da *AL Solutions* tinham ciência que o pó dos metais processados na empresa eram combustíveis, e que faíscas poderiam ser fontes de ignição suficientes para causar um incêndio. Em 2007, a empresa contratou um laboratório para realizar testes de queima em amostras de sucata de zircônio e titânio. Os testes indicaram que as sucatas poderiam propagar a combustão, possuindo uma taxa de queima suficientemente alta para serem consideradas como inflamáveis.

A *AL Solutions* possuía um manual de segurança onde eram listados vários requisitos quanto ao armazenamento e manuseio do titânio e do zircônio, entretanto os investigadores descobriram que a gerência não fazia com que os funcionários

cumprissem estes requisitos (CBS, 2010). A antiga proprietária da empresa (*Jamegy, Inc.*), e a própria *AL Solutions*, projetaram e instalaram equipamentos de produção com tampas, que deveriam permanecer fechadas sempre que possível, para evitar dispersão do pó. Contudo, a administração da *AL Solutions* não obrigava os funcionários a manterem as tampas dos equipamentos fechadas durante a produção, e tambores de armazenamento dos metais eram também regularmente deixados abertos na área de produção. Todo esse material deveria ser mantido em um depósito separado, porém os empregados mantinham estes tambores na área de produção, mesmo sem estarem em uso, como observado na Figura 51 (CBS, 2010).

Figura 51 - Tambores de particulados de zircônio e titânio próximos ao misturador da AL Solutions.
Fonte: CSB (2010)

A *AL Solutions* possuía alguns procedimentos de segurança para remoção de pó e controle dos riscos de fogo e explosão, dentre eles (CBS, 2010):

- Só era permitido fumar em uma área externa da planta.

- O equipamento elétrico presente na área de produção foi projetado para reduzir a possibilidade de explosão.

- Os motores também foram projetados do modo a não serem fontes de ignição.

- Os equipamentos eram limpos regularmente com água com o objetivo de eliminar o pó oriundo dos equipamentos de processo.

- Todos os equipamentos, paredes e pisos eram lavados em intervalos regulares com mangueiras disponíveis no galpão de produção.

- Os operadores eram instruídos a limpar suas áreas de trabalho e os equipamentos que operavam ao final de cada turno de trabalho, principalmente quando notava-se qualquer acúmulo de metal ou quando a carga de metal de um equipamento era alterada por outra.

- Os trabalhadores também lavavam o pó de metal do chão, direcionando para uma calha que percorria todo o chão da área de produção. Esta calha também era limpa semanalmente.

- Em caso de incêndio com os metais processados na planta, o manual de segurança orientava os operadores a evacuar o local, alertar a administração e acionar os bombeiros.

- O plano de emergência da *AL Solutions* recomendava que os empregados evitassem combater incêndios causados por metais com extintores de incêndio, mas os operadores eram autorizados a combater incêndios de outra natureza. A empresa não possuía extintores próprios para combate de incêndio causado por metais, portanto a companhia instruía seu pessoal a deixar o metal queimar e esperar pelo corpo de bombeiros.

De acordo com o estudo realizado pela CSB (2010), a empresa não possuía um sistema coletor para remoção dos pós de zircônio e titânio gerados durante o processamento, como recomendado por padrões industriais norte americanos para o manejo seguro de pós combustíveis metálicos. Ao invés disso, a *AL Solutions* se baseava no uso da água como único método, mantendo o pó úmido e evitando o acúmulo do mesmo nos equipamentos e superfícies planas (CBS, 2010).

Antes do acidente de 2010, a *AL Solutions* já havia passado por dois acidentes com vítimas fatais. De 1993 até o acidente de 2010, o corpo de bombeiros de *New Cumberland* já havia sido chamado para combater, pelo menos, sete eventos de incêndio na empresa. Em 1995, um empregado ficou ferido e outro foi morto durante uma explosão ocorrida na planta. Um vazamento em um tanque de propano, em contato com uma fonte de ignição desconhecida, causou o incêndio. Em 1996, um

incêndio ocorrido no misturador destruiu o equipamento e uma prensa localizada próxima. O incêndio foi causado por uma das pás do misturador, que quebrou-se, se friccionando com o equipamento. Não houve vítimas nem feridos nesta ocasião. Em 2006, um supervisor foi fatalmente ferido enquanto realizava a limpeza do interior do tanque do moinho, quando o metal residual presente no equipamento entrou em ignição. Os investigadores da CSB descobriram, através de entrevistas realizadas com os funcionários, que muitos outros incêndios ocorreram na área de produção sem que os bombeiros precisassem ser alertados (CBS, 2010).

Como exposto no relatório da CSB, as operações da *AL Solutions* não estavam alinhadas com as instruções da NFPA. Se a empresa tivesse seguido voluntariamente a NFPA 484, ou se suas disposições tivessem sido tornadas compulsórias pelo departamento de bombeiros de West Virginia, autoridade com jurisdição na área onde a empresa estava localizada, ou pela OSHA, o incidente poderia ter sido evitado, ou suas consequências minimizadas. Além disso, desde 2006, a CSB recomenda que a OSHA desenvolva um padrão geral para indústrias que trabalham com pós combustíveis, tendo como base as normas 484 e 654 (CSB, 2010). Apesar das sucessivas recomendações feitas pela CSB, e da ocorrência de diversos acidentes fatais, a OSHA ainda não emitiu um padrão para operação com pós combustíveis (COLONA, 2015).

5.2.5. Recomendações da Norma Técnica Brasileira de prevenção contra incêndios e explosões aplicadas à *AL Solutions*

A *AL Solutions* não possuía um controle efetivo de incêndio e explosão, conforme descrito no item 4.8 da NBR 16385, que diz que “A instalação que manuseia, processa e armazena partículas sólidas combustíveis deve ser projetada, construída e equipada com equipamentos e dispositivos que possam combater e controlar incêndio, bem como prevenir o potencial de explosão, inclusive proteções. Estes meios de controle e combate devem limitar o nível de danos, de modo a permitir a continuidade da produção e a operação segura das instalações”. A instrução dada aos funcionários era para que, em caso de incêndio, não combater as chamadas e esperar o corpo de bombeiros chegar.

De acordo com um o item 5.2.4 da NBR 16385, a atenuação da propagação do incêndio e da explosão é alcançada quando, entre outros itens, os sistemas de processamento de particulados prevenirem a propagação do evento, de um processo para outro processo adjacente, ou para o interior da edificação. O misturador da *AL Solutions* não possuía sistema de prevenção de propagação de incêndio ou de explosão, o que poderia ter evitado ou minimizado a explosão ocorrida. A *AL Solutions* também não possuía, no seu misturador, sistema de prevenção dos efeitos de uma explosão. Segundo o item 5.2.5 da NBR 16385, a prevenção dos efeitos da explosão é alcançada quando as deflagrações não produzem, entre outros itens, a extensão da frente de chama fora do compartimento ou do equipamento, exceto nos casos intencionalmente ventilados para lugar seguro.

De acordo com o relatório emitido pela CSB, a *AL Solutions* não fornecia manutenção adequada aos misturados de titânio e zircônio, utilizando para reparos peças já usadas. A empresa aparentava não reconhecer o risco de explosão que este equipamento poderia causar. Segundo a NBR 16385, item 5.3.2, todo duto, transportador fechado, silo, depósito fechado, ciclone, filtros ou outros vasos contendo um pó combustível fechado em quantidade suficiente ou com condições de suportar a propagação de uma frente de chama devem ser considerados risco de explosão na situação de falha do equipamento, entre outras.

De acordo com o relatório da CSB a respeito da explosão ocorrida na *AL Solutions*, fica claro que a empresa não possuía um sistema de alivio de explosão na área de processamento dos pós de zircônio e titânio. A falta deste sistema de alívio faria com que a empresa ficasse em desacordo com o item 6.4.1 da NBR 16385, a qual prevê que todo ambiente construído contendo pó com risco de explosão deve ser dotado de sistema de alívio de deflagração direcionado para uma localização externa segura.

O item 7.23 da NBR 16385 trata dos misturadores. Neste item está previsto que que os misturadores devem ser projetados para controlar o lançamento de pó, exceto pela área de alimentação, que deve ser protegida por uma coifa de aspiração de pó ou por um duto conectado a um separador de ar-pó, para evitar a formação de nuvem de pó no local e, além disso, sempre que existir risco de explosão ou incêndio, a proteção

deve ser prevista. Apesar da *AL Solutions* prever a existência do risco de uma explosão na operação dos misturados, e solicitar que a tampa dos mesmos se mantivesse fechada durante a utilização dos mesmos, os funcionários não executavam tal ação.

No que se refere à limpeza da *AL Solutions*, a empresa utilizava água para a remoção dos pós residuais da produção e aparentava seguir a frequência descrita no item 8.2 da NBR 16385 que descreve que, entre outros itens, o procedimento de limpeza deve incluir requisitos específicos para contemplar a limpeza exclusiva e imediata para derramamentos pontuais ou o acúmulo extra de curto prazo, para permitir a eliminação da massa derramada ou acumulada. A limpeza praticada pela *AL Solutions* provavelmente evitou explosões secundárias em função do pó depositado na área de trabalho – como ocorreu no caso da *Imperial Sugar*.

Os funcionários da *AL Solutions* mantinham os tambores de armazenamento de metais na área de produção, apesar de existir um manual de segurança da fábrica que proibia essa prática (CSB, 2010). Essa ação dos funcionários da *AL Solutions* estaria em desacordo com item 6.2.1 da NBR 16385, que afirma que áreas nas quais os pós combustíveis são produzidos, processados, manuseados ou coletados, de tal forma que o acúmulo de pó combustível em superfícies expostas ou escondidas, externamente ao equipamento ou recipientes, exceda os limites determinados nesta norma, devem ser destacadas de forma segregada ou separada de outras ocupações, para minimizar os danos a partir de um incêndio ou explosão.

6. Conclusões e sugestões

Através da realização deste trabalho foi possível confirmar a importância de se adotar, nas indústrias que manuseiam partículas sólidas combustíveis, a cultura de prevenção contra explosões com o auxílio, no caso do Brasil, da NBR 16385. Medidas preventivas devem ser sempre a primeira linha de defesa contra todos os tipos de acidente.

Medidas simples como a realização de limpeza prontamente ao derramamento do pó nas unidades industriais podem prevenir perdas tanto de vidas quanto materiais.

As medidas de segurança utilizadas para prevenção de acidentes nas indústrias que manuseiam partículas sólidas combustíveis devem ser amplamente divulgadas entre os funcionários da empresa e não ficarem somente documentadas em procedimentos e normas de segurança, pois "*Empresas não têm memória – somente as pessoas*" (KLETZ, 1993). Portanto, faz-se necessário a realização de treinamentos aos funcionários de indústrias que trabalham com pós para a difusão do conhecimento quanto aos perigos associados à manipulação desse material.

No Brasil não existe órgão público dedicado a investigação dos acidentes ocorridos em indústrias químicas, e muito se perde em conhecimento de prevenção de futuros eventos desta natureza. As fábricas, de maneira geral, não reconhecem os perigos causados pelo manuseio e processamento de pó e, como triste tradição nacional, as medidas de segurança somente são adotadas quando ocorrem eventos que acabam por ceifar vidas ou causam grande prejuízo material.

Como sugestões para trabalhos futuros recomenda-se a criação de um histórico nacional dos incidentes causados por incêndio ou explosão de pós combustíveis com o objetivo de se mapear os eventos característicos do país, assim como mitigar seus efeitos. Em paralelo recomenda-se também estudos de análise de riscos, de acordo com o item 4.2 da NBR 16385, da indústria cuja a tipologia seja de maior frequência.

Bibliografia

ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Dust explosions - Cases, causes, consequences, and control. **Journal of Hazardous Materials**, v. 140, p. 7-44, Fevereiro 2007.

AL Solutions, **About *AL Solutions***, 2015. Disponível em: <http://www.alsolutionsinc.com/content/corporate.asp>. Acesso em: 01 de maio 2015.

AMYOTTE, P. **An Introduction to Dust Explosions**. I. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

AMYOTTE, P. R. Some myths and realities about dust explosions. **Process Safety and Environmental Protection**, Halifax, v. 92, n. 4, p. 292-299, Julho 2014.

AMYOTTE, P. R.; CHIPPETT, S.; PEGG, M. J. Effects of Turbulence on Dusts Explosions. **Progress in Energy and Combustion Science**, 1989. 293-310.

AMYOTTE, P. R.; ECKHOFF, R. K. Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview. **Journal of Chemical Health and Safety**, v. 17, n. 1ª, p. 15-28, Janeiro 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistemas de Proteção Contra Explosão**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 6. 2007. (NBR ISO 6184-1).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistemas de Proteção e Proteção contra Explosão - Fabricação, processamento e manuseio de partículas sólidas combustíveis - Requisistos**. ABNT. Rio de Janeiro, 2015. (NBR 16385).

BENDETTO, A. D. et al. Modelling the effect of particle size on dust explosions. **Chemical Engineerin Science**, v. 65, n. 2, p. 772-779, Janeiro 2010.

BENEDETTO, A. D.; SARLI, V. D.; RUSSO, P. On the determination of the minimum ignition temperature for dust/air mixtures. **Chemmical Engineering Transactions**, v. 19, p. 189-194, 2010.

BJERKETVEDT, D.; BAKKE, J. R.; WINGERDEN, K. V. Gas Explosion Handbook. **Journal of Hazardous Materials**, Bergen, v. 52, n. 1, p. 1-150, Janeiro 1997.

CASHDOLLAR, K. L. Overview of dust explosibility characteristics. **Journal of Loss Prevention in the process industries**, 2000. 183-199.

CASHDOLLAR, K. L.; HERTZBERG, M. **Industrial Dust Explosions**. 1ª. ed. Pittsburgh: ASTM special techinical publication, 1986.

CHATRATHI, K.; GOING, J. Dust deflagration extinction. **Process Safety Progress**, v. 19, p. 146-153, 2000.

CESANA, C.; SIWEK, R. **Manual**. Disponível em: <http://www.kuhner.com/tl_files/kuhner/product/safety/PDF/B000_071.pdf>. Acesso em 25 de agosto 2016.

COLONA, Guy. Credible Risk. **NFPA Journal**, local, 2 março 2015. Industrial + Storage Occupancies. Disponível em: <http://www.nfpa.org/newsandpublications/nfpa-journal/2015/march-april-2015/features/dust>. Acesso em: 12 maio 2015.

CROWL, D. A. **Understanding Explosions**. New York: CCPS Concept book, 2003.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Chemical Process Safety:** Fundamentals with Applications. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

CSB. *AL Solutions*, Inc., New Cumberland, WV. Metal Dust Explosion and Fire. Case Study, 2010.

CSB. *Sugar Dust Explosion and Fire - Imperial Sugar Company*, Port Wentworth. Investigation Report, 2009.

CSB. Combustible Dust Hazard Study. **Investigation Report**, 2006

EBADAT, V. Dust explosion hazard assessment. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 23, n. 1, p. 907-912, Maio 2010.

ECKHOFF, R. K. **Explosion Hazards in the Process Industries**. 2. ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2016.

ECKHOFF, R. K. **Dust Explosions in the Process Industries**. 3. ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2003.

ECKHOFF, R. K. Differences and similarities of gas and dust explosions: a critical evaluation of the European 'ATEX' directives in relation to dusts. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2006. 553-560.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5th. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GRIFFITH, W. C. Dust Explosions. **Annual Review of Fluid Mechanics**, 1978. 93-105.

HARMANNY, A. Sugar dust explosions. **International Sugar Journal**, v. 108, p. 582-589, 2006.

HASSAN, J. et al. A model to asses dust explosion ocurrence probability. **Journal of Hazardous Materials**, n. 268, p. 140-149, Janeiro 2014.

ISO (2016, Setembro). Standards: http://www.iso.org/iso/home/standards.htm

KLETZ, T. **Lessons from disaster**. 1ª. ed.IChemE, 1993.

LEES, F. P. **Loss Prevention in the Process Industries**. 2ª. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.

MARTIN, R. J.; REZA, A.; ANDERSON, L. W. What is an explosion? A case history of an investigation for the insurance industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, California, v. 13, p. 491-497, 24 November 2000.

MORAES, G. Sistema de Gestão de Riscos - Princípios e Diretrizes. 1 edição. Rio de Janeiro: Gerenciamento Verde Editora, 2010.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 921: **Guide for Fire and Explosion Investigations**, USA, 2014.

NFPA. **Guide for Fire and Explosion Investigations**. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. USA. 2014.

PANTONY, M. F. et al. **Hazards XVI:** Analysing the past, planning the future. Manchester: [s.n.], v. I, 2001.

PROUST, C. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Cracow, v. 19, n. 2ª, p. 104-120, Março 2006.

RAMOS, T. I. M. **Application of Risk Assessment Techniques to an Industrial Plant**. Universidade Técnica de Lisboa. [S.l.], p. 45. 2010. Dissertação (Mestre em Engenharia Química).

RANGEL, E. **As Normas Brasileiras sobre Instalações Elétricas em Atmosferas Explosivas**. In: III ESW Brasil – Seminário Internacional de Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho. Rio de Janeiro, Anais, IEEE, 2007.

RUSSO, P.; BENEDETTO, A. D. Review of a Dust Explosion Modeling. **Chemical Engineering Transactions**, Roma, v. 31, p. 955-960, 2013.

SAFETY MANAGEMENT SERVICES. Disponível em: <http://www.smsenergetics.com/testing/sensitivity-testing/dust-explosibility/>. Acesso em: 2 de setembro 2016

SHI, J.; Xinguang, L.; Ping, Z.; Radandt, S. **Dust Explosion Simulations in a Filter Using DESC**. Proceedings of the 8th International Conference on Measurement and Control of Granular Materials. Shenyang: ISBN 978-7-81102-737-2. 2009. p. 353-357.

SILVA, W. C. L. **Blast – Efeitos da Onda de Choque no Ser Humano e nas Estruturas**. 2007. 107f. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SILVA, J. **Modelagem CFD de explosões de pós em silos.** 2012. 121f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SOBRAL, E. **Blog Emily Sobral**, 30 Julho 2016. Disponivel em: <http://segurancaocupacionales.com.br/ha-um-ano-a-nbr-16385-esta-em-vigor-gracas-ao-comite-cee-80-da-abnt/>.

THEIMER, O. F., **Cause and prevention of dust explosions in grain elevators and flourmills**, Powder Technol. 8 (1973) 137 - 147.

VIJAYARAGHAVAN, G**. Impact assessment, modelling, and control of dust explosions in chemical process industries**, MTech Thesis, Department of Chemical Engineering, Coimbatore Institute of Technology, 2004.