

# COMBUSTÃO ESPONTÂNEA: ENTENDENDO OS MECANISMOS DE REAÇÃO E A SUA RELAÇÃO COM A DINÂMICA DE INCÊNDIO

Marcos Leandro Marques<sup>1</sup>

Vanderlei Vanderlino Vidal<sup>2</sup>

## RESUMO

O presente artigo busca referencial para subsidiar fonte de pesquisa à atividade investigativa em incêndios que possam considerar a combustão espontânea como uma das hipóteses válidas como evento causal de um incêndio. Para conhecer tal fenômeno foi realizada pesquisa em normas internacionais, livros, artigos científicos e teses. O objetivo principal é compreender o processo químico e/ou biológico que dá origem à autoignição. Para isso, serão discutidos os mecanismos de reação, correlacionando-os com a dinâmica do incêndio e a investigação das características dos sinistros decorrentes da ignição espontânea. Assim, é imprescindível que o perito saiba reconhecer os requisitos mínimos para ocorrer o fenômeno da combustão espontânea, tal como umidade, permeabilidade, porosidade, oxigenação do meio, temperatura, massa crítica, disposição geométrica, bem como os materiais susceptíveis, de acordo com as características físico-químicas e sua relação com a dinâmica de incêndio, identificando pontos cruciais que irão corroborar ou descartar a hipótese de ignição espontânea.

**Palavras-chave:** Combustão Espontânea. Dinâmica. Incêndio.

## 1 INTRODUÇÃO

A combustão espontânea, também conhecida como ignição espontânea ou autoignição, é um fenômeno bastante peculiar e incomum, entretanto como a exclusão de hipóteses em uma perícia de incêndio é tão importante quanto a determinação da causa do sinistro, cabe ao

---

<sup>1</sup> 1º Tenente Bombeiro Militar. Perito em Incêndio e Explosão. Graduado em Engenharia Química pela UNISUL. [mlmarques@cbm.sc.gov.br](mailto:mlmarques@cbm.sc.gov.br)

<sup>2</sup> Tenente Coronel Bombeiros Militar. Perito em Incêndio e Explosão. Graduado em Administração pela UFSC. Pós-graduado em Gestão Pública pela ESAG-UDESC. [vanderlino@cbm.sc.gov.br](mailto:vanderlino@cbm.sc.gov.br)

perito a compreensão dos mecanismos de reação que possibilitam a ocorrência desse fenômeno e em quais as circunstâncias ela deve ser considerada como uma hipótese válida.

Dessa forma, os processos químicos e biológicos, associados com as circunstâncias que proporcionam a validação da hipótese de combustão espontânea serão os norteadores dessa pesquisa, de forma que proporcionem fundamentação teórica para subsidiar investigações de incêndio acerca do fenômeno da combustão espontânea.

O principal objetivo deste trabalho é entender o processo químico e/ou biológico que dá origem à combustão espontânea, bem como compreender os mecanismos que proporcionam essas reações, relacionando com a dinâmica do incêndio e as características dos sinistros decorrentes da ignição espontânea.

A metodologia utilizada para explorar e analisar questões referentes ao fenômeno da combustão espontânea, aborda mecanismos de reação, relações com a dinâmica de incêndio e a investigação das características da autoignição. Quanto ao método de abordagem, o estudo utiliza o hipotético-dedutivo, pois trabalha a lacuna que existe na Corporação acerca da investigação do tema, pela qual formula hipóteses e, pelo processo dedutivo analisa o fenômeno abrangendo a hipótese. Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada de forma que gera conhecimento para aplicação prática em investigações de incêndios relacionados com materiais susceptíveis ao autoaquecimento. (LAKATOS; MARCONI, 2005)

## **2 COMBUSTÃO ESPONTÂNEA**

É o fenômeno decorrente do aumento de temperatura de forma espontânea (autoaquecimento) de determinados materiais até o seu ponto de ignição, sem ter contato com nenhum agente ígneo ou qualquer outro material que forneça energia calorífica, tais como fagulha, centelha, chama aberta, brasa, superfície aquecida, entre outros. (NFPA 921, 2011)

A combustão espontânea pode ser resultado de processos biológicos e/ou reações químicas exotérmicas nas quais o material é a fonte de energia que origina condições para a ignição e queima. O conceito chave na ignição por autoaquecimento é a habilidade do material dissipar o calor gerado por reações exotérmicas internas. Se o calor gerado internamente pelas reações não puder ser dissipado para as proximidades, o material aumentará sua temperatura de tal maneira que a taxa de reação irá proporcionar o início de uma queima lenta. (LENTINI, 2013)

Variáveis importantes neste fenômeno incluem a temperatura ambiente, o tamanho da pilha de materiais, concentrações de oxigênio e umidade, porosidade do meio e a cinética das reações exotérmicas. Com o aumento da temperatura ambiente, haverá o aumento da taxa de reação e a cinética também é alterada exponencialmente com a elevação da temperatura do meio. Com o incremento do tamanho de pilhas de materiais, a capacidade de dissipar calor para o ambiente decresce. O oxigênio é o agente oxidante utilizado na decomposição térmica dos materiais susceptíveis ao autoaquecimento e também é utilizado na degradação biológica, que necessita de índices de umidade ideais para os micro-organismos. (NFPA 921, 2011)

## 2.1 MECANISMO DE REAÇÃO

A combustão espontânea, decorrente do autoaquecimento gerado pelo material, deverá possuir uma taxa de geração de calor suficiente para aumentar a temperatura até seu ponto de autoignição. Esse fenômeno é resultado de reações químicas e/ou biológicas exotérmicas que ocorrem espontaneamente em alguns materiais e em algumas circunstâncias. (NFPA 921, 2011)

Como o processo de combustão é uma reação de oxidação, o agente redutor será o material susceptível a esse tipo de reação. Tem-se que a oxidação geralmente é uma reação exotérmica e que após a temperatura de ignição a combustão torna-se autossustentável. Não obstante, no fenômeno de autoaquecimento de materiais orgânicos podem coexistir o processo biológico em temperaturas de até 80°C, seguido do processo químico de oxidação e pirólise. (DRYSDALE, 2002)

Na reação exotérmica de degradação biológica da matéria orgânica, primeiramente existe um processo de decomposição aeróbico, onde o oxigênio presente é consumido e liberado como produto dióxido de carbono e água com uma taxa de calor liberado acentuada. Se essa reação exaurir o oxigênio, é iniciado o processo anaeróbico em que micro-organismos e bactérias efetuam a digestão de compostos orgânicos para gerar gás metano e dióxido de carbono com uma taxa de calor liberado em alguns casos até cerca de vinte vezes menor que na reação aeróbica. (MOQBEL, 2009)

Sabe-se também que micro-organismos e bactérias presentes no meio reagente podem reduzir a energia de ativação e estimular o início de uma reação química exotérmica, agindo portanto como catalisadores do processo de autoaquecimento e conseqüentemente da combustão espontânea por queima lenta do material, principalmente se houver níveis de

oxigênio adequados para quebra de compostos orgânicos complexos através do processo biológico aeróbico, que gera muito mais calor do que a reação por meio anaeróbico. Além disso, a ausência de agente oxidante no ambiente impediria o início do processo químico de oxidação. (MOQBEL, 2009)

Apesar do processo químico de oxidação assemelhar-se ao processo biológico aeróbico no que se refere as partes de reagentes e produtos (dióxido de carbono e água), o consumo de oxigênio é cerca de duas vezes maior e a taxa de geração de calor é superior ao processo de degradação biológica. (MOQBEL, 2009)

A reação química de oxidação é a principal forma de degradação do material combustível nas faixas de temperatura entre (70-190°C), diretamente associadas à presença de oxigênio no ambiente. Sob altas temperaturas, a pirólise torna-se o principal motivador da decomposição dos materiais combustíveis, elevando ainda mais a temperatura com a grande liberação de energia. (DRYSDALE, 2002)

### **2.1.1 Autoaquecimento**

A evolução do calor nem sempre é resultado de reações de oxidação, mas podem ser decorrentes também de várias outras reações químicas, como por exemplo polimerização, onde líquidos reagem para formar sólidos. Geralmente o autoaquecimento e a posterior combustão espontânea acontecem em materiais orgânicos, tais como óleos e gorduras animais e vegetais, por esses materiais conterem ácidos graxos poli-insaturados. Tais ácidos graxos reagem com o oxigênio para gerar calor. Moléculas insaturadas contém ligações duplas ou triplas entre os carbonos, as quais são muito reativas. (QUINTIERE, 1998)

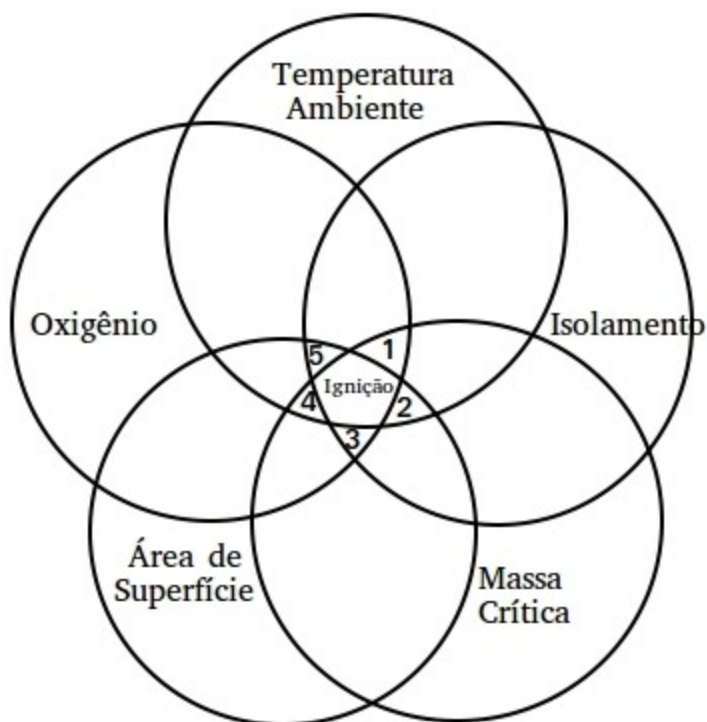
A combustão espontânea ocorre segundo algumas particularidades. Primeiro, o material deve ter a característica de sofrer autoaquecimento, bem como ser submetido a condições onde o fenômeno seja estimulado. Segundo, o calor gerado pelo autoaquecimento deve ser superior ao calor perdido para o ambiente. O fluxo de calor aumenta a temperatura de tal modo que as moléculas do combustível se desestabilizam. Dessa forma, o material será submetido ao aumento da temperatura interna na ordem de algumas centenas de graus Celsius. Finalmente, o fluxo de calor precisa ser autossustentável para que a queima lenta iniciada consiga manter uma frente de propagação, visto que se não houver essa característica haverá somente uma pequena área carbonizada. (DRYSDALE, 2002)

O fluxo de calor é proveniente de uma instabilidade quando o calor gerado excede o calor perdido no interior do material. É a diferença entre energia química (reações exotérmicas) e calor perdido para o ambiente. O calor gerado tem grande chance de superar o calor perdido na maioria das partes isoladas do combustível, ou seja, no centro. É normalmente onde as maiores temperaturas são encontradas. O isolamento do combustível depende diretamente da distância do centro da porção de material combustível até sua fronteira com o ambiente externo. Durante o autoaquecimento, a temperatura central é normalmente mais alta que as temperaturas das bordas. (NFPA 921, 2011)

O autoaquecimento para ignição espontânea requer porosidade, permeabilidade e materiais oxidáveis. O combustível deve estar em brasa e não pode fundir, visto que as qualidades de porosidade e permeabilidade serão perdidas e o autoaquecimento será inibido. A estrutura molecular deve permitir que a queima lenta do material combustível forme um tipo de carvão rígido, comportamento típico de materiais susceptíveis à autoignição. O sólido pode inicialmente servir como um substrato inerte, como no caso de trapos com óleo saturado, ou o substrato também pode agir como combustível. O mais comum substrato sujeito ao autoaquecimento são os sólidos orgânicos derivados de plantas, tais como tecidos de algodão, madeiras e seus derivados, produtos agrícolas e carvão. (DRYSDALE, 2002)

A tendência de autoaquecimento é dependente do tamanho e forma do acondicionamento do combustível e das condições ambientais. Esta tendência não é exclusivamente uma propriedade do material. Então, uma avaliação do potencial de autoaquecimento de materiais é incompleta sem considerar as particularidades do tamanho e forma do acondicionamento e das condições ambientais. Não obstante, pode-se avaliar quais materiais não são susceptíveis ao fenômeno. Para um dado volume, pequenas superfícies, tais como esferas e cubos, promovem mais autoaquecimento do que grandes áreas de superfície, tal como uma lâmina do mesmo material. A pequena área de superfície externa reduz o calor perdido, bem como isola o interior das partes externas do volume de combustível. Por exemplo, uma pilha de trapos com óleo está muito mais sujeita a autoaquecer do que os mesmos trapos estendidos em um varal. A figura 1 apresenta as condições requeridas para que ocorra a combustão espontânea, de forma que se não houver entre elas a associação adequada, ou mesmo que uma das condições não exista, não haverá possibilidade de considerar a hipótese de ignição espontânea. (DRYSDALE, 2002)

Figura 1 – Interações requeridas para a combustão espontânea



Fonte: adaptado da NFPA 921 (2011, tradução nossa).

A temperatura inicial de acondicionamento do material combustível pode ser um fator crucial para o fenômeno de ignição espontânea. As vezes isto é encontrado em indústrias de secagem de subprodutos de plantas, tais como derivados de madeira e produtos agrícolas e secagem de tecidos oleosos nas secagens de roupas. Se porções dos materiais combustíveis estão dispostas em forma simétrica suficientemente grande e quente, elas podem iniciar o fluxo de calor e ignição. Se o material é seco para um grau de umidade abaixo do equilíbrio, parte da geração de calor interno resulta em calor latente da concentração de umidade – oposto de resfriamento por evaporação. (NFPA 921, 2011)

O autoaquecimento e a consequente queima lenta na parte interna de uma pilha de materiais podem não ser visíveis até que a frente de propagação atinja a superfície. Indicadores visuais de autoaquecimento podem ser uma porção de umidade sobre a superfície da pilha resultante da condensação de água ou de outros produtos de reações. Outros indicadores são a deposição de fuligem dentro da pilha de material, que muitas vezes não é perceptível ou então um odor característico de mofado, quando o material à granel está acondicionado em ambientes fechados. (DRYSDALE, 2002)

Um material combustível dentro de uma área isolada como um recipiente limitante pode inibir o autoaquecimento por causa da eliminação de uma condição necessária, a permeabilidade, a qual permite difusão de oxigênio dentro do sólido. Sem o suprimento de oxigênio, a oxidação e a geração de calor são inibidas a menos que exista um agente oxidante dentro do material. O uso de recipientes ou barreiras de vapor tem sido utilizadas com sucesso para diminuir o risco de autoaquecimento. Não obstante, ainda deve-se considerar a quantidade de agente oxidante presente no recipiente e as propriedades físicas e integridade do recipiente ou barreira para que o autoaquecimento seja evitado. Para avaliar o potencial de autoaquecimento do material deve-se investigar as particularidades do mesmo em seu local de armazenamento. (DEHAAN, 2007)

A umidade do ambiente é um dos fatores chave para o autoaquecimento. Materiais higroscópicos irão potencializar a ação da umidade no meio de reação, pois com a absorção da água na presença do sólido combustível, há maior troca de calor por difusão, acelerando a taxa de reação de oxidação do meio adjacente. A umidade também é essencial para que os micro-organismos possam realizar a atividade metabólica de decomposição de materiais orgânicos, gerando calor e catabolizando os processos bioquímicos de degradação de compostos orgânicos complexos. (MOQBEL, 2009)

## 2.2 MATERIAIS SUSCEPTÍVEIS AO FENÔMENO

Segundo a NFPA 921 (2011) as formas mais comuns de autoaquecimento e autoignição encontrada por investigadores de incêndio são:

- a) Polimerização de ácidos graxos (gordura animal, óleos de cozinha) em materiais celulósicos (madeira, tecido e papel);
- b) Oxidação de materiais carbonáceos (carvão vegetal e mineral);
- c) Oxidação induzida biologicamente (fardos de feno, adubo, etc.);
- d) Oxidação induzida termicamente de materiais lignocelulósicos (normalmente fibra de madeira e tecido);
- e) Reações de polimerização (plástico, borracha, adesivos e partículas de tinta)

Certos elementos, particularmente fósforo branco, sódio, potássio e alguns metais fragmentados, tais como zircônio podem entrar em ignição quando expostos ao ar. Materiais que sofrem combustão espontânea sob exposição ao ar são conhecidos como pirofóricos. (NFPA 921, 2011)

O autoaquecimento e a combustão espontânea de óleos contendo principalmente compostos saturados, tais como óleo de motor ou lubrificante, ocorrem somente sob elevadas condições de temperatura. Hidrocarbonetos saturados possuem ligações simples entre carbonos, as quais são muito menos reativas que nos óleos insaturados, típicos de óleos vegetais. (NOON, 2001)

Certos materiais inorgânicos, como por exemplo metais em pó, podem sofrer oxidação rápida, autoaquecimento e combustão espontânea formando como consequência óxidos metálicos, logicamente que sob condições apropriadas à interação desses compostos. (NFPA 921, 2011)

Material	Tendência à combustão espontânea	Método usual de Armazenamento	Precauções para evitar combustão espontânea	Observações
Carvão Vegetal	Alta	Sacos, granel	Manter seco. Fornecer ventilação.	Carvão de madeira de lei deve ser cuidadosamente preparado. Evitar molhar e subsequentemente secar.
Grãos secos com teor de óleo	Moderada	Granel	Manter o teor de umidade entre 7-10% e abaixo de 38°C antes do armazenamento.	Muito perigoso se o teor de umidade baixar de 5%.
Farinha de peixe	Alta	Sacos, granel	Manter o teor de umidade entre 6-12%. Evitar exposição a temperaturas elevadas.	Perigoso se completamente seca ou se empacotado acima de 38°C.
Borracha espuma	Moderada	Separar almofadas de borracha espuma de peças de vestuário que irão ser secas em equipamentos de secagem. Se materiais contendo borracha espuma foram secos artificialmente, eles devem ser resfriados antes de empilhar ou empacotar.		Pode continuar aquecendo espontaneamente depois de sujeito a secagem forçada ou outras fontes de calor. Secagem natural não causa combustão espontânea.
Grãos (vários tipos)	Leve	Sacos, granel	Evitar teor de umidade extremo	Podem autoaquecer quando úmidos e quentes.
Feno	Moderada	Sacos, granel	Manter seco e frio.	Feno úmido e armazenado imprópriamente é quase certo aquecer em dias quentes. Fardos de feno raramente atingem autoignição.
Óleo de linhaça	Alta	Tanques, latas, vidros	Evitar contato com recipientes com panos, algodão ou outros materiais	Tecidos impregnados com esse óleo são extremamente perigosos. Evitar pilhas, etc. Armazenar em



			combustíveis fibrosos.	recipientes fechados, de preferência metálicos
Adubo	Moderada	Granel	Evitar os níveis máximos inferiores e superiores de umidade. Ventilar as pilhas.	Evitar o armazenamento ou carregamento não ventilado do adubo.
Panos com óleo	Alta	Fardos	Evitar armazenamento em ambientes abertos.	Perigoso se molhado com óleo
Panos (trapos)	Variável	Fardos	Evitar contaminação com óleos. Evitar carbonização. Manter frio e seco.	Depende do uso prévio. Parcialmente queimado ou carbonizado pode ser perigoso
Serragem	Possível	Granel	Evitar contato com óleo, calor e umidade	Parcialmente queimada ou carbonizada pode ser perigosa
Resíduos de lã	Moderada	Granel, fardos	Manter frio e ventilado ou armazenado em recipientes fechados. Evitar alta umidade	Possuem óleo de tecelagem que são responsáveis pelo autoaquecimento, bem como quando molhados

Fonte: adaptado de DRYSDALE (2002, tradução nossa).

Outro local em que pode existir um incêndio decorrente de autoaquecimento são os aterros, que por serem a forma mais viável e econômica de disposição de resíduos sólidos nas cidades, dispõem de uma grande variedade de processos químicos e biológicos que podem provocar combustão espontânea se o ambiente oferecer os meios adequados para este fenômeno. (MOQBEL, 2009)

### 2.3 RELAÇÃO COM A DINÂMICA DE INCÊNDIO

Um fator que caracteriza a evolução do fenômeno do autoaquecimento é que com o aumento da temperatura a taxa de reação também é aumentada, provocando dessa forma uma velocidade de reação maior e ganho de energia térmica conseqüentemente maior. O comportamento da curva temperatura por tempo de um processo de combustão espontânea apresenta aspectos exponenciais, ou seja, a velocidade de reação de um composto a 100°C é cerca de 16 vezes maior que a 60°C, demonstrando que a cada 10°C de aumento na temperatura do meio, a taxa de reação dobra de valor. (RYNK, 2000)

O fenômeno da combustão espontânea pode ser potencializado pela ação de agentes oxidantes no material combustível. Isso deve-se ao fato de que essas substâncias químicas mesmo não sendo combustíveis, podem aumentar rapidamente a taxa de queima de outros

compostos ou resultar na combustão espontânea quando combinadas com outras substâncias. Muitos desses oxidantes são encontrados somente em áreas industriais, mas em produtos de limpeza de piscina, tais como hipoclorito de cálcio e sais de dicloroisocianúrico ou ácido tricloroisocianúrico (cloro estabilizado) serão submetidos ao aquecimento espontâneo ou à combustão espontânea quando contaminados com certos materiais orgânicos, particularmente substâncias hipergólicas ou outros agentes oxidantes. Uma vez iniciado o incêndio, o oxidante sofre uma reação de decomposição térmica, que apesar de não ser tecnicamente uma combustão, envolve grande quantidade de luz e calor, podendo tornar-se bastante violenta. (NFPA 921, 2011)

A regra geral da combustão espontânea é que a quantidade de material necessário para realizar o autoaquecimento é inversamente proporcional à reatividade do material, mas o tempo necessário é diretamente proporcional. Óleos insaturados podem provocar autoignição em poucas horas com volumes entre 25-50mL. Carvão ativado pode autoaquecer com poucos quilos ao longo de algumas horas, mas o carvão utilizado para churrascos, embora ainda existam estudos a respeito, só poderá autoaquecer se for uma massa de mais de 20Kg ou que a temperatura do carvão esteja acima de 100°C. Feno e gramíneas com 100Kg ou mais requerem poucas semanas para sofrer ignição espontânea, enquanto carvão mineral e grãos à granel não sofrerão combustão espontânea a menos que existam muitas toneladas de material ao decorrer de semanas até alguns meses, ou sob a ação de algum contaminante que atue como um catalisador da reação de oxidação facilitando a decomposição térmica do substrato. (DEHAAN, 2007)

Feno e outros compostos de biomassa que são juntados em temperatura ambiente podem iniciar autoaquecimento com atividade biológica. Se o teor de umidade do meio estiver adequado (12-21%) ao processo fermentativo do material orgânico submetido à atividade microbiana (fungos e bactérias) a temperatura alcançará de 70°C a 80°C. Neste ponto os micro-organismos morrem ou tornam-se inativos, e a atividade biológica pode ser suplantada pela oxidação, e ocorrerá fluxo de calor seguido de ignição do material. Geralmente os materiais resultantes da compostagem que sofrem combustão espontânea entram em ignição em faixas de temperatura entre 150-200°C. (RYNK, 2000)

Madeira, bem como muitos outros materiais celulósicos estão sujeitos ao autoaquecimento quando expostos a elevadas temperaturas, mesmo abaixo de sua temperatura de ignição. Entretanto, a temperatura na qual a autoignição da madeira ocorrerá não é uma propriedade intrínseca do material. Esta característica depende de alguns fatores tais quais

natureza da exposição ao calor, tipo de espécie, forma de acondicionamento e geometria do material. Para um aquecimento de curto prazo (menos que um dia), a madeira requer uma temperatura mínima de aproximadamente 250°C para sofrer autoignição, embora este valor aumente com a elevação do fluxo de calor. Para madeira sujeita a longo prazo de aquecimento, sob baixas temperaturas, características exotérmicas devido ao autoaquecimento são progressivamente importantes. Fatores como a natureza da exposição ao calor, o tipo de espécie da madeira e a geometria são decisivos para a ocorrência da combustão espontânea. (DRYSDALE, 2002)

Contaminantes na madeira e em outros compostos celulósicos são conhecidos por ter um efeito sobre a decomposição térmica e a oxidação. Os contaminantes identificados incluem ácidos graxos, óleos vegetais, ferro, óxidos de ferro, sulfatos de ferro, cobalto, cobre, magnésio, carbonato de chumbo, carbonato de potássio, acetato de chumbo, acetato de sódio, e pentóxido de vanádio. (NFPA 921, 2011)

Os óleos – que possuem a função química de triacilglicerídeos – dispõem de diversos tipos de formulações de acordo com os ácidos graxos que compõem suas moléculas, não sendo possível estabelecer uma temperatura padrão de autoignição para um mesmo tipo de óleo. Essa característica deve-se ao fato de que quanto mais ligações duplas ou triplas o ácido graxo dispuser, mais reativo e sujeito a sofrer oxidação ele será e conseqüentemente susceptível a sofrer autoaquecimento. Por exemplo, o ácido graxo oleico possui somente uma ligação dupla em sua cadeia carbônica e é menos reativo que o ácido linoleico que dispõe de duas ligações insaturadas, que por sua vez é menos instável que o ácido linolênico, que é triplamente insaturado. (DEHAAN, 2007)

Existem estudos para investigar a capacidade do carvão vegetal, mesmo em embalagens comerciais (< 9 Kg), de sofrer combustão espontânea em temperatura ambiente. Um objeto de estudo é o comportamento deste material sob o efeito de umidade seguido de evaporação da água. No entanto, testes de laboratório tem mostrado que embalagens de tamanhos comerciais não se aproximam da autoignição, nem mesmo quando expostos a temperaturas não usuais, como dentro de um carro fechado sob o sol. O carvão não tem grande tendência de autoaquecimento como outros materiais, tais quais feno e serragem, mesmo depois de molhados. (NFPA 921, 2011)

### **2.3.1 Investigação das Características**

Para investigar as características do processo de combustão espontânea em um incêndio deve-se primeiro compreender que o mecanismo de autoignição está diretamente relacionado ao comportamento de incêndios com baixa oferta de oxigênio, só que nesse caso no início do incêndio. A característica principal desse cenário inicial de queima lenta (sem chamas) é a baixa concentração de oxigênio, o que produz conseqüentemente maior volume de monóxido de carbono (CO) em relação ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), pelo local proporcionar predominantemente a combustão incompleta. (LENTINI, 2013)

Apesar de todos os mecanismos de autoignição iniciarem com queima lenta após um processo de autoaquecimento, não há generalidades ou aplicações largamente utilizadas como padrão de temperatura de ignição dos sólidos combustíveis sujeitos ao fenômeno. Para um determinado depósito com materiais específicos, há uma temperatura ambiente crítica sobre a qual é esperada a combustão espontânea. Para uma superfície de madeira aquecida por radiação, há uma temperatura de superfície específica sobre a qual existirá queima lenta. Entretanto, essas temperaturas de ignição são aplicáveis somente para condições sob a qual elas são determinadas experimentalmente. Elas não são generalistas ou amplamente aplicáveis. (NFPA 921, 2011)

Se iniciado um processo de queima lenta num ponto central de um determinado material, considera-se o tempo requerido para a frente de combustão atingir a superfície do material proporcional à profundidade de disposição do mesmo. Aumentando-se o teor de umidade e a densidade do acondicionamento, o tempo de penetração da frente de queima será maior. A densidade do acondicionamento tem sua influência sobre a taxa de propagação devido à penetração de oxigênio até a área de reação submetida ao processo exotérmico. Entretanto deve-se considerar que o isolamento causado pela maior densidade do material irá reduzir o calor perdido para o ambiente externo, aumentando a temperatura interna. (DRYSDALE, 2002)

Os óleos e gorduras possuem origem vegetal, animal ou até mesmo microbiana. Quanto maior for o número de insaturações da cadeia carbônica formada a partir da condensação do glicerol com ácidos carboxílicos, maior será a capacidade do triéster sofrer polimerização térmica. O perito deve estar ciente de que essa reação de oxidação típica de ácidos graxos insaturados não ocorre facilmente, sendo necessário aquecimento acima de 200°C, ou então o espalhamento do composto sobre uma superfície combustível tal como algodão ou tecido, permitindo uma área superficial de contato maior e se, em condições adequadas de isolamento, quantidade de substrato e fornecimento de comburente, poderão

ocasionar combustão espontânea a partir da temperatura ambiente. Nesses casos há experimentos que demonstram que tecido com óleo, mesmo após lavados (o óleo é hidrofóbico) e guardados a 93°C atingem temperatura de até 575°C após cerca de 5 horas, entrando em autoignição. Os óleos lubrificantes, que são hidrocarbonetos, não estão sujeitos à combustão espontânea. (DEHAAN, 2007)

Em celeiros e silos destinados ao armazenamento de feno, adubos, grãos, gramíneas, bagaço, dentre outros produtos de origem orgânica, o investigador deve considerar sempre a hipótese de ignição espontânea. Para que o fenômeno seja considerado válido, todos os requisitos necessários para o autoaquecimento devem ser atendidos. A umidade, por exemplo, deve estar na proporção adequada para que os micro-organismos possam efetuar a degradação do substrato. Se o material estiver muito seco não haverá fermentação e isolamento e se houver umidade demais, a difusão de oxigênio para a reação aeróbica será comprometida. Além disso, a temperatura ambiente deve estar mais alta que 20°C. Outra característica da combustão espontânea nesses locais é que ela dificilmente ocorre em menos de 10 dias, sendo que o tempo médio da autoignição do material é de 5 a 10 semanas. (DEHAAN, 2007)

Em casos de incêndios em aterros, o perito pode ser induzido a ligar a causa do incêndio ao gás metano proveniente da ação de micro-organismos consumindo matéria orgânica. Não obstante, deve-se salientar o alto ponto de ignição do material (500°C), além de considerar a faixa de inflamabilidade do metano, o que inviabiliza a combustão em ambiente com baixa oferta de oxigênio, como é o caso do interior de um aterro. A combustão espontânea, geralmente iniciada com pequenas concentrações de oxigênio, e conseqüentemente com o processo de queima lenta, está mais facilmente adaptada a esses ambientes. Entretanto, não pode-se desconsiderar que após o início do incêndio, que o mesmo poderá ter sua intensidade potencializada pelo gás metano presente no local. (MOQBEL, 2009)

### **3 CONCLUSÃO**

A pesquisa em questão objetivou a obtenção de subsídios para a atividade investigativa ou pericial no que tange ao conhecimento do processo químico e/ou biológico que dá origem à combustão espontânea.

Através do entendimento dos mecanismos de reações químicas e biológicas, percebe-se a relação com a dinâmica do incêndio e as características dos sinistros decorrentes da ignição espontânea, como por exemplo que o fenômeno geralmente está associado com o depósito de grandes quantidades de material e origina-se no interior do volume armazenado, onde as condições são mais favoráveis ao autoaquecimento.

Na investigação do fenômeno de autoignição o perito ou investigador deve considerar primeiramente a estrutura química e as condições físicas do material, como por exemplo a granulometria, pois quanto menor o tamanho do grão, mais rápido irá reagir para produzir calor. Outra característica física importante no processo de autoaquecimento é a umidade, que se estiver fora da faixa ideal, pode dificultar a difusão de oxigênio e temperatura e também a ação de micro-organismos na decomposição orgânica. Da mesma forma, a estrutura química do material vai determinar se o mesmo é susceptível à decomposição térmica e oxidação.

Assim, para que a hipótese da combustão espontânea seja considerada válida em uma investigação de incêndio devem coexistir simultaneamente oxigênio em concentrações adequadas, isolamento suficiente para não permitir perda excessiva de temperatura e também não exaurir o comburente, temperatura ambiente ideal (baixas temperaturas dificultam a autoignição), massa crítica e área superficial que permita a reação, mas que não favoreça a troca térmica entre o meio de reação e o ambiente externo.

Outro fator importante do mecanismo de reação em combustão espontânea é que apesar de existir somente um mecanismo químico de ignição espontânea em alguns casos, em outros podem coexistir um processo biológico e logo após um processo químico, já que os micro-organismos que decompõem a matéria orgânica até atingir temperaturas de cerca de 80°C não suportam a temperatura de autoignição dos materiais orgânicos que muitas vezes superam faixas de 200°C, ou seja, a combustão (oxidação) e posteriormente a pirólise do material suplantam o processo biológico que serve como um catalisador da reação química de oxidação.

Dessa forma, fica evidente que o assunto ora tratado não é facilmente exaurido apenas com pesquisas hipotético-dedutivas, restando sugestões de novos trabalhos acerca do fenômeno. O tema é bastante amplo e requer ensaios para os diversos materiais susceptíveis à combustão espontânea para identificação de curvas de autoaquecimento, com a implementação das variáveis de fornecimento de oxigênio em concentrações distintas, bem como umidade, massa crítica, permeabilidade, porosidade e temperatura inicial.

Finalmente cabe destacar que apesar de ser bastante tentador concluir pela combustão espontânea em casos de incêndios com causas desconhecidas, tal método não é correto se utilizado isoladamente. Se o investigador não constatar os requisitos mínimos necessários para a ocorrência do autoaquecimento, bem como evidências que corroboram com a referida hipótese, a conclusão do laudo deve ser indeterminada.

## REFERÊNCIAS

DEHAAN, John D. **Kirk's fire investigation – 6th ed.** New Jersey. Pearson Prentice Hall, 2007.

DRYSDALE, Dougal. **An introduction to fire dynamics.** 2. ed. San Francisco. Wiley: 2002.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica.** Porto Alegre: Atlas, 2005.

LENTINI, John L. **Scientific protocols for fire investigation.** EUA. Taylor & Francis Group. 2013.

MOQBEL, Shadi Y. **Characterizing spontaneous fires in landfills:** tese de doutorado. Universidade da Florida. Orlando. 2009.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 921:** guide for fire and explosion investigations. EUA. 2011.

NOON, Randall K. **Forensic engineering investigation.** Boca Raton. CRC Press, 2001.

QUINTIERE, James G. **Principles of fire behavior.** EUA. Delmar Publishers, 1998.

RYNK, R. **Fires at composting facilities: causes and conditions.** BioCycle Journal of Composting and Recycling. January: 54. 2000. Disponível em: <[http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex10721/\\$file/086-9.pdf?OpenElement](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex10721/$file/086-9.pdf?OpenElement)> acesso: 30 out 2015.