



COMBUSTÃO ESPONTÂNEA: ESTUDO DO AUTO AQUECIMENTO DO CARVÃO MINERAL COMO FATOR GERADOR DE INCÊNDIOS

Greison Rocha Bitencourt

Cadete do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Perito em Incêndio e Explosão pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, bacharel em Ciências Biológicas pela Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), com especialização em Gestão Pública e Políticas Sociais pelo centro educacional Dom Bosco Email: greison@cbm.sc.gov.br

Bruno Souza de Albuquerque

1º Tenente do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Perito em incêndio e explosão, bacharel em engenharia química pela Universidade do Sul de Santa Catarina, com especialização em gestão de eventos críticos pelo Centro de Ensino Bombeiro Militar. E-mail: b.albuquerque@cbm.sc.gov.br

RESUMO

O processo de autoaquecimento e combustão espontânea do carvão mineral pode gerar incêndios de grandes proporções. Ocorrem reações químicas e bioquímicas importantes que determinam a combustão desse material estudado. Os objetivos estabelecidos foram identificar os principais fatores que determinam a combustão espontânea do carvão mineral e como prevenir a ocorrência de incêndios nesse material. Foi realizada uma pesquisa aplicada e de abordagem qualitativa. A obtenção dos dados tem caráter exploratório. Além de ser uma pesquisa classificada como bibliográfica. A combustão espontânea do carvão mineral é ditetamente relacionada a fatores como: inclinação lateral do estoque, ventilação, grau de segregação das partículas e umidade. Já no que tange a prevenção da ocorrência desse fenômeno, apontou-se a aplicação de gel retardante, selamento do silo de armazenamento com membrana a prova de água e fogo com o objetivo de vedar o material para evitar canal de ar e, por fim, o monitoramento constante, como forma eficiente de inibir ou diminuir os efeitos do autoaquecimento e combustão espontânea do carvão mineral. Portanto, tendo em vista a importância da combustão espontânea do carvão mineral e os fatores que a determinam torna-se indispensável estabelecer planos de prevenção e novas pesquisas nessa área a fim de aprimorar os conhecimentos nessa problemática.

Palavras-chave: Carvão mineral. Auto aquecimento. Combustão espontânea.

1 INTRODUÇÃO

A combustão espontânea é um processo que gera muitos incêndios difíceis de controlar, sendo um dos casos o que acontece no carvão mineral. O carvão é uma rocha sedimentar combustível que pode ser encontrada em diferentes estados de conservação. Ele é formado a partir de produtos que têm carbono em sua composição, como os vegetais superiores e que ao longo do tempo sofreram transformações físico-químicas devido à ação de microorganismos e agentes geológicos. Essa transformação de matéria vegetal para mineral proporciona uma constituição heterogênea e grande variação em suas propriedades. Uma das principais características do carvão mineral é seu elevado poder de queima, sendo por esse motivo extraído em larga e escala e empregado em diversas atividades (VILELA, 1991).

Dentro desse panorama, no Brasil - em 2007, por exemplo -, as reservas de carvão mineral economicamente aproveitáveis, somaram cerca de 6,6 bilhões de toneladas. O país possui, ainda, cerca de 17 bilhões de toneladas



desse mineral praticamente inexplorados (SIECESC, 2019). As principais ocorrências de carvão mineral localizam-se na região sul do país: Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina. Quando se avalia o estado de Santa Catarina, percebe-se que toda sua produção está concentrada no sul desse estado, na região de Criciúma. Nesses locais, a extração do mineral acontece há anos e é fator preponderante da economia da região (BELOLLI, 2002).

A exploração do carvão catarinense desenvolve-se na Região Sul do Estado, onde importantes centros de mineração se firmaram nos municípios de Lauro Müller, Urussanga, Siderópolis, Treviso, Criciúma, Forquilha, Içara, Morro da Fumaça e Maracajá. Essa produção é transportada por rodovias e também por ferrovia que liga os principais pontos de extração ao porto de escoamento de Imbituba (BELOLLI, 2002). O carvão mineral da região sul de Santa Catarina contém pirita (FeS). Essa pirita oxida-se e libera calor, o qual não se dissipa com facilidade e conseqüentemente eleva a temperatura, aumentando também a velocidade da reação. A temperatura sobe até atingir o ponto de ignição (435° C), ponto em que ocorre a combustão espontânea do carvão mineral (HUTNY et al, 2003).

Frente a essa problemática, considerando a relevante importância econômica e social que o carvão mineral tem para a população catarinense, torna-se indispensável estudar os fatores que determinam a combustão espontânea desse mineral. Isso porque incêndios têm ocorrido em depósitos de carvão desde que começou a ser estocado pelo homem. Dessa forma, apontar os fatores geradores desse fenômeno pode ser determinante na atividade de prevenção, culminando em procedimentos e normatizações que considerem essas características e, com isso, preservar vidas e patrimônio.

Além disso, vale ressaltar que alguns autores já abordaram o tema combustão espontânea no Brasil, inclusive no CBMSC. Marques (2015) tratou sobre a combustão espontânea de forma geral e suas principais características. Já Albuquerque (2019) tratou especificamente sobre combustão espontânea do algodão, relatando os principais fatores que a determinam, além de procedimentos para evitá-la.

Todavia, a literatura nacional é esparsa no que se refere à combustão espontânea do carvão mineral salvo algumas poucas menções, como Vilela (1991). Esses autores tratam brevemente das características do que chamam de "carvão metalúrgico", termo empregado na indústria que utiliza esse material para queima, mas não citam os principais fatores determinantes desse processo. Desse modo, torna-se indispensável estudar esse fenômeno para dar suporte aos peritos responsáveis por investigar e elucidar incêndios envolvendo o carvão mineral.

Com isso, esse artigo busca servir de embasamento teórico para melhor entender os mecanismos da combustão espontânea do carvão mineral. Considerando o exposto e suas implicações, este artigo tem por objetivo identificar os principais fatores que determinam a combustão espontânea do carvão mineral e de que maneiras podem ser gerenciados, de modo a prevenir sua ocorrência.



2 COMBUSTÃO ESPONTÂNEA

Esse processo é intrínseco de alguns materiais e acontece sobretudo por conta do aumento da temperatura que faz com que o ponto de ignição seja atingido sem qualquer outro fator ígnio. Geralmente esse tipo de reação acontece de forma lenta, muitas vezes levando dias para ser percebida. O material aquecido libera energia decorrente da reação, caso o material, por suas características, não consiga liberar esse calor de forma eficiente, a temperatura aumenta lentamente elevando a velocidade da reação de oxidação, o que pode fazer com que se atinja o ponto de ignição do material. Esse processo pode ser biológico e/ou decorrente de reações químicas (MARQUES, 2015).

A combustão espontânea por degradação bioquímica acontece porque alguns microorganismos têm a capacidade de diminuir a energia de ativação das reações (energia necessária para que a reação ocorra), funcionando como catalisadores. Isso faz com que a reação aconteça a temperaturas mais baixas. Esse processo de degradação da matéria orgânica pode ocorrer de forma aeróbia ou anaeróbia, dependendo da disponibilidade de oxigênio. A degradação aeróbia tem como produtos o dióxido de carbono, água e a liberação de calor em quantidade maior que a anaeróbia, que tem como produto também o metano. O desprendimento de calor decorrente desse processo não é característico somente de reações de oxidação, pode acontecer em diversas outras reações químicas como a polimerização, que ocorre com maior frequência em materiais orgânicos por conta de ácidos graxos polinsaturados. Quando essas gorduras reagem com oxigênio também há liberação de calor (ALBUQUERQUE, 2019).

Quando acontece por reações químicas elas são exotérmicas e a liberação de calor será o próprio responsável por superaquecer o sistema (autoaquecimento). Esse calor resultante da reação exotérmica tem que ser liberado, caso isso não ocorra o material aumentará sua temperatura de tal maneira que a taxa de reação irá proporcionar o início de uma queima lenta. Esse fato pode acontecer em decorrência da grande quantidade de material sobreposto sem que permita a liberação total do calor, fazendo com que o calor que seria liberado aqueça o próprio material da vizinhança. Caso a temperatura ambiente também esteja elevada, a ocorrência de uma combustão espontânea se torna ainda mais provável. Em uma faixa de temperatura entre (70-190°C), acontecem predominantemente reações de oxidação e isso está diretamente ligado a disponibilidade de oxigênio no ambiente. A pirólise é o principal processo de decomposição de materiais combustíveis sob altas temperaturas, o que eleva a temperatura do sistema liberando grande quantidade de energia (MOQBEL, 2009).

2.1 METODOLOGIA

Esta pesquisa é de natureza aplicada e de abordagem qualitativa, pela forma que gera conhecimento para aplicação prática em investigações de incêndios relacionados com o carvão mineral. A obtenção dos dados tem



caráter exploratório. Este estudo se reveste do método de abordagem hipotético-dedutivo, pois trabalha a lacuna que existe na Corporação acerca da investigação do tema, pela qual formula hipóteses (LAKATOS; MARCONI, 2003). Por fim, a presente pesquisa é classificada como bibliográfica, uma vez que foi produzida com base em materiais já publicados, com ênfase em livros e artigos científicos (GIL, 2002).

2.1.1 Método de coleta de dados

Como fonte de informação, além dos artigos que tratavam da combustão espontânea de forma genérica, Marques (2015) e Albuquerque (2019), foram selecionados artigos da base de dados Scielo que fazem referência ao tema “combustão espontânea do carvão” e também “auto aquecimento do carvão”. Foi possível avaliá-los da seguinte forma: no artigo “*Risk and mitigation of self-heating and spontaneous combustion in underground coal storage*” foram retiradas informações genéricas sobre auto aquecimento do carvão. Já em “*Theoretical analysis of coal stockpile self-heating*” observa-se informações acerca da combustão espontânea do carvão mineral, e nos artigos “*Low-temperature oxidation of coal*” e “*Prediction of coal mine goaf self-heating with fluid dynamics in porous media*”, foi possível entender os fatores que determinam a combustão espontânea do carvão mineral.

a) Procedimento:

O desenvolvimento foi estruturado da seguinte forma: combustão espontânea em linhas gerais. Após isso, descreveu-se a combustão espontânea do carvão mineral e suas características. Discorreu-se sobre os fatores que determinam a combustão espontânea do carvão mineral. Por fim, foi exposto formas de prevenir a ocorrência de incêndios em estocagens subterrâneas de carvão mineral como tópico final, tudo com base nos artigos selecionados previamente.

Discorreu-se sobre o autoaquecimento como fator determinante no processo de autocombustão, agrupando as informações em categorias que determinam o processo de aquecimento espontâneo do carvão.

2.2 AUTOAQUECIMENTO

As reações de polimerização também liberam grande quantidade de calor, bem como as de oxidação. Essa reação química acontece porque óleos, gorduras animais e vegetais reagem com oxigênio para gerar calor. Isso ocorre devido a alta reatividade das moléculas que constituem esses compostos, que são formadas por ligações duplas e triplas entre carbonos. A consequência disso é o autoaquecimento e posterior combustão espontânea. Para que essa combustão aconteça se fazem necessárias algumas condições: a começar pelas características do material, que deve permitir que o autoaquecimento aconteça; a segunda condição é trivial ao processo de combustão espontânea e fator preponderante para que o autoaquecimento se processe: o calor gerado



tem que ser superior ao dissipado no sistema; por fim, é necessário ter um fluxo de calor suficiente para que a queima lenta se mantenha constante (MOQBEL, 2009).

No centro do material depositado existe a maior possibilidade de acontecer o autoaquecimento, pois existe grande probabilidade de o calor gerado ultrapassar o calor liberado. Esse fluxo de calor determina os extratos de temperatura no interior do material. Isso faz com que a taxa de calor trocado com o ambiente seja maior nas extremidades e menor no meio. A depender das características do material, pode nem acontecer a troca de calor. Assim, quando se fala de isolamento do material combustível deve se considerar a porção central até as extremidades do material, as quais fazem fronteira com o ambiente (MOQBEL, 2009).

Além desse fator determinante, para que o autoaquecimento aconteça se fazem necessários outros pré requisitos: porosidade, permeabilidade e materiais oxidáveis. Porosidade e permeabilidade são variáveis que influenciam na disponibilidade de oxigênio no interior do material. Materiais particulados com granulometria baixa ou grãos pequenos, podem deixar o empilhamento do composto mais compactado, prejudicando a porosidade e permeabilidade. Nesse sentido, o combustível ainda precisa estar em brasa e não pode fundir, visto que a porosidade e permeabilidade perdem efetividade e prejudicam o autoaquecimento (NFPA, 2011).

Outros fatores que influenciam no autoaquecimento são: tamanho do material, forma de acondicionamento e as condições ambientais. Sabe-se que existem materiais que não são suscetíveis a esse fenômeno. Por exemplo, componentes com pequena superfície, esferas e cubos conseguem fomentar mais o autoaquecimento quando comparados a grandes superfícies como placas do mesmo material combustível. O processo acontece porque uma pequena área de superfície externa reduz o calor perdido, bem como isola o interior das partes externas do volume de combustível. Para exemplificar pode-se afirmar que um empilhamento de tecido embebido com combustível terá maior possibilidade de combustão espontânea quando comparado a mesma quantidade de tecido estendida (NFPA, 2011)

Outro fator é a temperatura inicial do acondicionamento, que vai depender diretamente da temperatura ambiente. A disposição de materiais iguais colocados de forma simétrica em seu armazenamento pode gerar um fluxo de calor suficiente para que ocorra a ignição dele. A simetria faz com que haja uma taxa quase linear de troca de calor, gerando lentamente a energia necessária para o início do fenômeno (MOQBEL, 2009).

A identificação visual do fenômeno de autoaquecimento é difícil de ser determinada. Geralmente quando isso acontece, o material já apresenta temperatura elevada ou até mesmo já está queimando. Isso porque o autoaquecimento e a consequente queima lenta na parte interna de um empilhamento podem não ser visíveis até que a frente de propagação atinja a superfície. Justamente porque a parte central, do "miolo", é aquecida e se propaga para as extremidades. Na parte de fora da pilha de material observa-se uma porção de umidade sobre a superfície da pilha resultante da condensação de água ou de outros produtos de reações. Outra possibilidade é



a formação de fuligem dentro do material, que é ruim de se determinar se não for remexido para essa identificação. A outra forma é perceber um odor característico desse processo, algo que é bem similar ao cheiro de mofo de material mantido em ambiente fechado (NFPA, 2011).

A permeabilidade do material é a característica pela qual acontece a difusão de oxigênio dentro do sólido. Sem o suprimento de oxigênio, a oxidação e a geração de calor são inibidas, por isso o uso de recipientes ou barreiras de vapor tem sido utilizadas com sucesso para diminuir o risco de autoaquecimento. Mesmo assim, pode acontecer o autoaquecimento decorrente da existência de agente oxidante dentro do material, e nem mesmo a falta de permeabilidade suficiente conseguirá evitar isso. Dessa forma, deve-se considerar a quantidade de agente oxidante presente no recipiente, as propriedades físicas e integridade do recipiente ou barreira para que o autoaquecimento seja evitado. Esses fatores são fundamentais na determinação do autoaquecimento e, assim, devem ser monitorados e avaliados constantemente com o fito de se evitar o aumento demasiado da temperatura (NFPA, 2011).

Ainda, um outro fator deve ser considerado na determinação do autoaquecimento do carvão: a umidade. Essa característica decorre sobretudo de materiais que absorvem a umidade do ar com facilidade, isso faz com que no meio da reação aconteça a oxidação com velocidade maior, pois a troca de calor em meio úmido vai se processar por difusão. Quando se fala da decomposição de matéria orgânica então, a umidade é fator preponderante para catabolizar os processos bioquímicos de degradação de compostos orgânicos complexos (MARQUES, 2015).

O autoaquecimento tem um comportamento peculiar, o aumento da temperatura provocado por variados fatores conduz a um aumento na velocidade da reação e com isso a energia térmica aumenta. O aumento da velocidade da reação em função da temperatura é exponencial. Essa reação pode ser potencializada por agentes oxidantes no material, isso porque algumas substâncias funcionam como catalisadores, aumentando a velocidade da reação sem participar da mesma, resultando em combustão espontânea (MARQUES, 2015).

2.3 FATORES DETERMINANTES PARA COMBUSTÃO ESPONTÂNEA DO CARVÃO MINERAL

Ainda que a maioria das pesquisas relatem que a oxidação da matéria orgânica é o principal fator causador da combustão espontânea, existem tantos outros fatores que podem determinar a ocorrência e até a velocidade com que esse fenômeno vai acontecer. Isso interessa diretamente as empresas que operam com esse tipo de produto e, sobretudo, para bombeiros no atendimento a eventuais casos de incêndios decorrentes desse fenômeno. Os principais fatores avaliados são: ventilação, tamanho de segregação da partícula, umidade e inclinação lateral do estoque (HOOMAN; MAAS, 2014).



2.3.1 A influência da inclinação lateral do estoques

O vento desempenha um papel de extrema importância para o autoaquecimento de estoques de carvão mineral. Os incêndios acontecem quando, por exemplo, em uma pilha de estocagem com baixo grau de compactação no lado do barlavento, lado de onde sopra o vento. Nesse caso, os pontos quentes se desenvolvem em pontos próximos a superfície. Além disso, quando o carvão de uma pilhagem está bem compactado para utilização, o fogo acontece na região de maior declividade. Para dirimir especificamente esse problema, a estocagem não deve ser tão íngreme. O grau de inclinação do estoque influencia o surgimento de incêndio uma vez que em pilhas de carvão com inclinação maior, haverá maior superfície de contato que apresenta maior resistência ao fluxo de ar, dessa forma, o ar penetra com maior facilidade no estoque. Esse vento que entra no interior da estocagem fornece o oxigênio necessário à combustão (HOOMAN; MAAS, 2014).

Srinivasan Krishnaswamy. et al, (1996) em experimentos comparou duas estocagens com graus de inclinação diferentes, uma com 34 graus e outra com 14 graus. A pilhagem com inclinação de 34° teve problema com fogo quando comparada a de 14°, para o mesmo período analisado. A de 14° foi considerada segura por um período de 2 anos. Em caso de estoques com declividade menos acentuadas, 14° por exemplo, a força motriz de pressão induzida pelo vento para o fluxo convectivo é menor em comparação a declividades maiores, 34°. Para esses dois casos de declividade testados, a inclinação de 34 apresenta uma força motriz do fluxo convectivo do carvão três vezes maior em comparação a 14°. O resultado disso é uma maior disponibilidade de oxigênio para a reação, aumentando, conseqüentemente, a temperatura interna.

Um dos fatores determinantes nesse processo é a convecção. Esse fenômeno é o principal responsável pelo fluxo de ar no interior da pilhagem, e pode ser forçada ou natural. A natural acontece quando a pilha, que se encontra quente, cria um movimento de ar no interior, o ar quente sobe e por diferença de pressão o ar fresco de fora da pilha entra, fomentando a reação de oxidação. A convecção forçada acontece por conta do vento que “empurra” o ar quente que por si só já tende a subir e ocupar as camadas superiores. A combinação das duas aumenta a corrente convectiva do estoque (LIANG; WANG, 2017).

2.3.2 Influência da ventilação

A ventilação é fator preponderante para o autoaquecimento dos estoques de carvão. O carvão por si só possui uma boa propriedade isolante e o ar, por sua vez, uma pequena capacidade de aquecimento. A transferência de calor dentro do estoque, portanto, depende de fatores externos, como o vento. Por essas razões, faz-se necessário vazões de ar muito grandes para remover o calor de uma pilhagem de carvão mineral aquecida. Desse modo, vale ressaltar que os estoques de carvão são seguros nos dois extremos de circulação de ar: ausência e abundância. Os modelos matemáticos e experimentais de



Srinivasan Krishnaswamy. et al, (1996) mostraram que a compactação de uma pilhagem para restringir a disponibilidade de ar se mostrou mais eficiente na prevenção de incêndios do que tentar aumentar o grau de ventilação. Além disso, observou-se que quando há qualquer perturbação em estocagem bem compactadas que eram seguras anteriormente, essas passam a apresentar risco potencial.

Nos experimentos de Srinivasan Krishnaswamy. et al, (1996) testou-se a condição de vento soprando unidirecionalmente em direção a uma pilhagem de carvão. O ponto quente máximo do gradiente de temperatura, por influência do vento incidente, deslocou-se para face jusante. Porém, quando se aumenta muito o fluxo de ventilação incidindo sobre a pilha ocorre a dissipação da energia térmica, equilibrando a temperatura a valores seguros. Outro teste é com vento bidirecional incidindo na pilhagem. Esse tipo de situação leva ao deslocamento da parte quente, bolsão aquecido, para partes mais altas da estocagem, o que leva ao potencial risco de combustão espontânea.

2.3.3 Tamanho da segregação das partículas

O tamanho dos grãos de carvão também interfere na possibilidade de gerar combustão espontânea, esse fator aliado aos outros já mencionados ajuda a formar a condição perfeita para a ocorrência desse fenômeno. Tanto unidades grandes de carvão quanto pequenas podem ser armazenadas com segurança, só que elas devem ser separadas umas das outras, pois quando se mistura partes grossas com finas existe maior chances de ocorrer autoaquecimento. Existe perigo também quando se tem uma pilhagem segura e se adiciona uma nova pilha de carvão na pilha resistida. Os incêndios podem ocorrer no ponto de contato entre essas duas pilhas de carvão (LIANG; WANG, 2017).

O tamanho das partículas é um dos principais fatores que afetam a disponibilidade de oxigênio no interior da pilha de carvão, e determina também a taxa da reação. Os modelos de ensaio mostram que quando se reduz o tamanho dos grãos possibilita-se menor autoaquecimento. O motivo é que, com grãos menores, oferece-se maior resistência para a entrada de oxigênio por deixar menos espaços de entrada do ar. Deve-se lembrar que os extremos de disponibilidade de oxigênio acabam sendo mais seguros, pouca disponibilidade de oxigênio, ou muita. Todavia, a situação mediana deve ser evitada e o tamanho de segregação do carvão é trivial para isso. É possível que o tamanho menor de grãos permita atingir esse ponto seguro e deixa o empilhamento distante da situação perigosa com ventilação mediana. Grãos maiores, por sua vez, podem deixar a estocagem mais exposta as variações do tempo, se houver vento e disponibilidade de oxigênio suficiente no ambiente a pilha será segura, mas se as condições mudarem para pouco vento e fornecimento de oxigênio, o ponto de perigo pode ser alcançado (LIANG; WANG, 2017).

Ao se dobrar o tamanho das partículas o resultado foi que o incêndio aconteceu com maior facilidade. Embora tamanhos maiores de partículas possa levar a incêndios em estoques mais rapidamente do que partículas menores,



um estoque de partículas maiores pega fogo mais lentamente por causa da redução na taxa de reação global. O efeito de tamanho de partícula na permeabilidade do leito é, portanto, visto como sendo mais importante que seu efeito nas taxas de reação (LIANG; WANG, 2017).

2.3.4 Efeito da umidade

A umidade pode influenciar em pilhas de carvão por meio do balanço energético, que deve incluir mecanismos de evaporação e condensação induzida pela migração de umidade. Percebe-se que o equilíbrio de umidade entre o carvão e a fase gasosa que circula no interior da pilha de carvão eliminou a umidade, ainda que lentamente. Os cálculos do modelo proposto por Srinivasan Krishnaswamy, et al, (1996) mostra que a presença de umidade in situ no estoque serve apenas para atrasar o aparecimento de temperaturas descontroladas, sugerindo que as perspectivas de armazenamento de longo prazo nas pilhas somente são influenciadas pela umidade na questão do tempo. Em outras palavras, independentemente do teor de umidade, se a estocagem é intrinsecamente segura, o estoque permanecerá seguro, enquanto uma pilha não segura, digamos, devido ao tamanho da partícula ou aos efeitos da inclinação lateral, permanecerá inseguro.

2.3.5 Formas de prevenir a ocorrência de incêndios em estocagens subterrâneas de carvão mineral

Muito embora o autoaquecimento e a combustão espontânea de carvão sejam um desafio nas minas e locais de armazenamento, existem métodos conhecidos para mitigar esse problema. O armazenamento fechado é o mais seguro, existindo uma tendência e preferência por esse tipo de estocagem. As vantagens de uma instalação de armazenamento subterrâneo fechada em comparação com estoques abertos acima do solo incluem operações automatizadas de menor custo, menor quantidade de poeira, ruído e perda de calor, além de possibilitar entrada de ar controlada na abertura que gera um menor risco de incêndio (SIPILÄ, et al. 2012).

SIPILÄ, et al. (2012) observou as instalações de armazenamento subterrâneo de Salmisaari, na Finlândia, e pode acompanhar a melhoria das condições preventivas a incêndios naquele local. Uma das situações que se observou foi a importância de extrair carvão aquecido em estoque, tão logo seja identificado o sobreaquecimento e selar os possíveis vazamentos de ar da instalação do armazenamento. Uma instalação de armazenamento fechada pode ser mais fácil de selar, mas pode fornecer menos resfriamento do que estoques abertos se o fluxo de ar for apenas através de vazamentos ou outros canais do leito de carvão. O aumento do tempo de armazenamento em até seis meses também parece aumentar o risco de autoaquecimento, por isso a instalação de Salmisaari é normalmente esvaziada uma vez um ano de acordo com o plano de utilização.

Existem três recomendações básicas para tornar o armazenamento subterrâneo de carvão mineral mais seguros: a primeira dessas ações é aplicar



gel retardador de fogo na parte superior das camadas de carvão para impedir o fluxo de ar através do leito do estoque. Essa foi a ação tomada na usina Tiefstack (Rosner e Röpell, 2011) e foi muito efetiva. Esse gel re-tardadores de fogo também foram usados com sucesso para evitar autoaquecimento e incêndios em silos de carvão na Alemanha. Uma camada de gel sobre o carvão armazenado pode vedá-lo em grande parte para impedir a entrada de ar através do leito de carvão e evitar a auto-ignição e a necessidade de purga de nitrogênio (HOOMAN; MAAS, 2014).

A segunda ação é selar o teto do silo com membrana à prova de água e fogo para proteger as superfícies do leito de carvão da formação do canal de ar no interior estruturas de aço que gera corrosão por gotejamento de água. Já a terceira ação é facilitar a purga de nitrogênio nas pilhas de material para proteger a estrutura e pessoas do impacto de possíveis incêndios locais ou explosões. Para extinguir incêndios nos silos de Salmisaari, o sistema atual pode aplicar purga de nitrogênio. As desvantagens desse sistema está no seu custo relativamente elevado, o tempo para efetuar o procedimento, além de ser proibida presença de pessoas na instalação de armazenamento por cerca de dois dias durante o extinção do ciclo de trabalho (SIPILÄ, et al. 2012).

Todavia, apesar desses pontos citados foi observado que logo após o procedimento houve no máximo pequenos incêndios de combustão lenta, que são facilmente combatidos usando água de mangueiras de incêndio de instalações de sistemas preventivos. Para esse fim, a água tem a vantagem de ser imediatamente disponível e não requer ventilação demorada ou limite acesso de pessoal à instalação. No entanto, a água é apenas adequada para extinguir incêndios próximos à superfície, como os de correias transportadoras contendo carvão ou nas camadas superiores dos silos (SIPILÄ, et al. 2012).

Ainda dentro do campo de prevenção de incêndios decorrentes do autoaquecimento do carvão mineral não se pode deixar de falar do monitoramento das condições ambientais da estocagem, já uma terceira ação mencionada no parágrafo acima. Isso inclui adotar o princípio de melhoria significativa na gestão da instalação de armazenamento. Identificar as condições perigosas a partir de parâmetros bem definidos é o primeiro passo para tomada de decisões consciente e eficiente. Um exemplo disso seria controlar a temperatura da estocagem com o uso de câmeras térmicas e tomar medidas rápidas de reação a situações de temperaturas acima dos padrões seguros (SIPILÄ, et al. 2012).

3 CONCLUSÃO

A combustão espontânea do carvão mineral envolve processos químicos que determinam o autoaquecimento desse material. Existem poucos trabalhos no Brasil que tratam sobre esse fenômeno especificamente. Desse modo, pode-se apontar o cunho social da temática uma vez que Santa Catarina é um dos principais produtores dessa matéria prima. Entender e descrever os elementos envolvidos nesse processo é trivial e contribui científico e



socialmente. Os objetivos estabelecidos foram identificar os principais fatores que determinam a combustão espontânea do carvão mineral. Ao longo do trabalho foi apontado e discorrido sobre esses fatores relevantes para a combustão do material citado, quais sejam: inclinação lateral do estoque, ventilação, grau de segregação das partículas e umidade. Já no que tange o segundo objetivo, relatar de que maneiras podem ser gerenciados, de modo a prevenir sua ocorrência, citou-se sobre a aplicação de gel retardante, selar o silo de armazenamento com membrana a prova de água e fogo com o objetivo de vedar o material para evitar canal de ar e, por fim, o monitoramento constante. Sugere-se que trabalhos futuros estudem o transporte de carvão mineral em Santa Catarina e suas particularidades. Outra possibilidade é o monitoramento que existe para prevenção da combustão espontânea do carvão mineral nas empresas mineradoras.



REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Bruno Souza de; BASÍLIO, Rodrigo Gonçalves. Combustão Espontânea: estudo da fermentação do algodão como fator gerador de incêndios em indústrias têxteis. Florianópolis, 2019.

BELOLLI, MÁRIO et al. **História do Carvão de Santa Catarina**/ Mário Belolli, Joice Quadros, Ayser Guidi. Criciúma: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, 2002.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4a Ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HOOMAN, K. MAAS, U. Theoretical analysis of coal stockpile self-heating. **Fire Safety**

Journal. v. 67, p. 107-112, July 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.05.011>>. Acessado em: 06 de dez. 2019

HUTNY, W.P.; GIROUX, L.; MACPHEE, J.A; PRICE, J.T., Evaluation and Selection of Coals for Blast Furnace Injection, CANMET Energy Technology Centre/Natural Resources Canada, 2003.

KRISHNASWAMY, Srinivasan. et al. Low-temperature oxidation of coal. Modelling spontaneous in coal stockpiles. **Elsevier Science**. v. 75, p. 353-362, July 1996.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de metodologia científica. São Paulo: Atlas, 2003.

LIANG, Yuntao. WANG, Shugang. Prediction of coal mine goaf self-heating with fluid dynamics in porous media. **Fire Safety Journal** . v. 87, p. 49-56, January 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.12.002>>. Acessado em: 06 de dez. 2019.

MARQUES, Marcos Leandro; VIDAL, Vanderlei Vanderlino. Combustão Espontânea: entendendo os mecanismos de reação e a sua relação com a dinâmica do incêndio. Florianópolis, 2015.

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

Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina, SIECESC. Disponível em:



http://www.siecesc.com.br/pdf/dados_estatisticos_ano_2017.pdf. Acesso em: 05/11/2019.

SIPIILÄ, Juha. et al. Spontaneous combustion in underground coal storage. **Journal of loss Prevention in the Process Industries**. v. 25, n. 3, p. 617-622, May 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.01.006>>. Acessado em: 06 de dez. 2019

VILELA, A. C. F. – Carvão Metalúrgico para Siderurgia – Modulo “Carvão: origem, formação, mineração, beneficiamento e produção” - Curso ABM, 1991.