

**ANÁLISE DE INCÊNDIOS EM SECADORES DE GRÃOS:
INVESTIGAÇÃO DE CAUSAS E ESTRATÉGIAS DE
PREVENÇÃO PARA RETROALIMENTAÇÃO DE NORMAS DE
SEGURANÇA**

*Luís Eduardo Zarpellon*¹

<https://orcid.org/0009-0007-5122-6957>

*Daniel Gleidson do Nascimento*²

<https://orcid.org/0009-0005-7979-7159>

*Josué Soares da Silva Neto*³

<https://orcid.org/0009-0009-0394-0640>

*Karolyne Alice de Castro*⁴

<https://orcid.org/0009-0006-8798-6459>

*Moacyr Fiares Pereira Junior*⁵

<https://orcid.org/0009-0007-7078-1876>

*Tatiana Vivas da Silva*⁶

<https://orcid.org/0009-0002-2501-3230>

RESUMO

Nas últimas décadas, o Brasil se consolidou como um dos maiores produtores de grãos do mundo. Para garantir a qualidade durante o armazenamento e o processamento, os grãos passam por secagem em equipamentos específicos, operando em altas temperaturas. Esse cenário, somado ao uso de materiais combustíveis eleva o risco de incêndios que geram perdas e prejuízos, configurando um gargalo tecnológico. O método científico da investigação de incêndios é baseado no teste de hipóteses e visa retroalimentar os serviços de segurança contra incêndio. Nesse contexto, é fundamental que o investigador conheça o funcionamento dos equipamentos analisados para formular e testar hipóteses de forma eficaz. Este estudo teve como objetivo identificar e esclarecer os principais fatores causadores de incêndios em secadores de grãos, além de analisar o comportamento de materiais presentes no processo de secagem. Foram identificados seis fatores principais: excesso de impurezas, operação incorreta da fornalha, negligência na limpeza, fagulhas no ar de secagem, falta de nível de produto e instalação inadequada. Impurezas como sabugo e cascas de milho apresentaram menor faixa de ignição que os grãos. Pré-limpeza dos grãos e limpeza periódica da coluna contribuem na prevenção de incêndios.

Palavras-chave: Incêndios; Secadores de grãos; Investigação; Normas de Segurança; Retroalimentação.

¹Major do Corpo de Bombeiros Militar do Paraná, Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Especialista em Perícia de Incêndios e Explosões (CBMES).

²Tenente-Coronel do Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Norte, Especialista em Perícia de Incêndios e Explosões (CBMES).

³Capitão do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais, Especialista em Perícia de Incêndios e Explosões (CBMES).

⁴Capitã do Corpo de Bombeiros Militar do Paraná, Especialista em Perícia de Incêndios e Explosões (CBMES).

⁵Major do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro, Especialista em Perícia de Incêndios e Explosões (CBMES).

⁶Tenente-Coronel do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro, Especialista em Perícia de Incêndios e Explosões.

ANALYSIS OF FIRES IN GRAIN DRYERS: INVESTIGATION OF CAUSES AND PREVENTION STRATEGIES FOR FEEDBACK INTO SAFETY STANDARDS

ABSTRACT

In recent decades, Brazil has become one of the world's largest grain producers. To ensure quality during storage and processing, grains are dried using specific equipment operating at high temperatures. This scenario, combined with the presence of combustible materials, increases the risk of fires, leading to losses and financial damage, and thus represents a technological bottleneck. The scientific method of fire investigation is based on hypothesis testing and aims to provide feedback to fire safety services. In this context, it is essential that the fire investigator understands the operation of the inspected equipment in order to formulate and test hypotheses effectively. This study aims to identify and clarify the main factors responsible for fires in grain dryers, as well as to analyze the behavior of materials involved in the drying process. Six main factors were identified: excess impurities, improper furnace operation, lack of systematic cleaning, presence of sparks in the drying air flow, absence of product level, and inadequate installation. Impurities such as corn cobs and husks had lower ignition ranges compared to corn grains. Preventive measures such as proper grain pre-cleaning, regular cleaning of the drying column, and furnace adjustment proved effective in reducing fire risk.

Keywords: Fires; Grain Dryers; Investigation; Safety Standards; Feedback.

Artigo Recebido em 26/05/2024

Aceito em 23/06/2025

Publicado em 02/07/2025

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a produção de grãos no Brasil experimentou um crescimento substancial. Entre 2004 e 2023, a produção nacional passou de 114,6 milhões de toneladas para mais de 322,8 milhões de toneladas (CONAB, 2024). O país consolidou-se como um dos quatro maiores produtores de grãos do mundo, sendo capaz de atender à demanda interna, além de exportar o excedente, contribuindo para a segurança alimentar de diversas nações (Faostat, 2021).

Com o objetivo de garantir a qualidade física e química dos grãos até seu processamento final, os grãos são submetidos a processos de beneficiamento e armazenagem, realizados em equipamentos específicos para cada etapa. Este processo ocorre em unidades conhecidas como Unidades de Beneficiamento e Armazenamento de Grãos (UBAG).

O beneficiamento dos grãos visa reduzir o teor de impurezas e minimizar a presença de umidade até níveis controlados, prevenindo condições ambientais favoráveis à proliferação de insetos e bactérias durante o armazenamento. O excesso de umidade também diminui o valor econômico dos grãos e favorece a decomposição da matéria orgânica por meio de um processo exotérmico, que resulta no autoaquecimento do produto (Xie, 2020).

A fase pós-colheita de manejo dos grãos envolve uma série de riscos ocupacionais para os operadores. Tais riscos incluem trabalho em altura e em espaços confinados, exposição a ruídos, poeiras e calor. Além desses, os riscos de incêndio e explosão são inerentes à atividade (Bellochio, 2022). O ambiente das unidades de beneficiamento e armazenagem é caracterizado por fatores que aumentam a propensão a incêndios, como fontes de calor, materiais altamente inflamáveis e condições ambientais adversas que desgastam equipamentos e instalações (Leppälä, 2016).

Os incêndios nessas unidades, na maioria dos casos, ocorrem durante a fase de beneficiamento, especialmente na secagem dos grãos. Esta etapa é realizada em secadores de grãos que operam a altas temperaturas. Predominantemente, os modelos de secadores utilizados no Brasil operam com base na transferência direta de calor entre fornalhas e leitos de secagem. Assim, os produtos resultantes da queima de combustíveis sólidos utilizados como fonte de energia permanecem presentes no fluido de secagem, representando um risco significativo de incêndios (Babic, 2020).

Os incêndios em secadores de grãos, devido às suas características de propagação e às alternativas limitadas para o combate ao fogo, geram grandes desperdícios de produtos e prejuízos financeiros consideráveis. De maneira geral, incêndios em UBAG causam danos significativos às infraestruturas, perda de estoque e interrupções operacionais, resultando em custos elevados de reparo, perda de receita, atrasos na cadeia de suprimentos e possíveis eventos em cascata que podem levar a acidentes mais graves. Além dos impactos imediatos, existem custos indiretos, como o aumento dos prêmios de seguro, perda de clientes e riscos à segurança dos trabalhadores (CSB, 2009; Tamascelli, 2024).

Como outras biomassas naturais, como madeira e carvão, os grãos podem gerar tanto incêndios de queima lenta quanto incêndios com chamas vivas. A queima lenta é um tipo de combustão sem chamas, com temperaturas mais baixas e mais persistente. Se não forem adotadas medidas adequadas de combate ao incêndio, esse processo pode evoluir facilmente para um incêndio com chamas vivas, especialmente em condições ambientais favoráveis. Conforme ilustrado na Figura 1, os incêndios com chamas vivas são intensos, liberam calor rapidamente e se espalham pelo menos cem vezes mais rápido quando comparados à queima lenta (Xie, 2020).

Figura 1 - Incêndio em secador de grãos



Fonte: Acervo dos autores (2022).

Devido às características dos secadores de grãos, torna-se difícil detectar esses incêndios ainda em sua fase latente. Normalmente, os incêndios se iniciam em partes ocultas dos equipamentos, não visíveis aos operadores. A implementação de métodos para detecção precoce é fundamental para a prevenção (PERSSON, 2013).

2. PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVOS

A investigação das causas desses incêndios contribui para evitar novas ocorrências, reduzir danos materiais e proteger vidas e patrimônios. Além disso, minimiza os impactos ambientais adversos, economiza custos relacionados à recuperação pós-incêndio e garante a continuidade do processo produtivo. Contudo, é importante considerar a fundamentação utilizada pelos peritos na produção de laudos e pesquisas, dada a especificidade do tema.

O objetivo deste estudo é realizar uma pesquisa bibliográfica sobre o funcionamento dos secadores de grãos, destacando os riscos de incêndio envolvidos no processo. A pesquisa visa fornecer subsídios para a perícia de incêndio nesses equipamentos, considerando a necessidade de formular e testar hipóteses com base no método científico estabelecido para esse tipo de investigação, como exemplificado na norma americana NFPA 921 - Guide for Fire and Explosion Investigations.

Ademais, a perícia de incêndio em unidades de beneficiamento e armazenamento de grãos pode fornecer dados cruciais para avaliar a eficácia das normas de segurança contra incêndio existentes, retroalimentando o sistema normativo. Para tanto, é essencial que os peritos compreendam o funcionamento dos secadores de grãos e os riscos de incêndio envolvidos no processo.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Funcionamento dos secadores

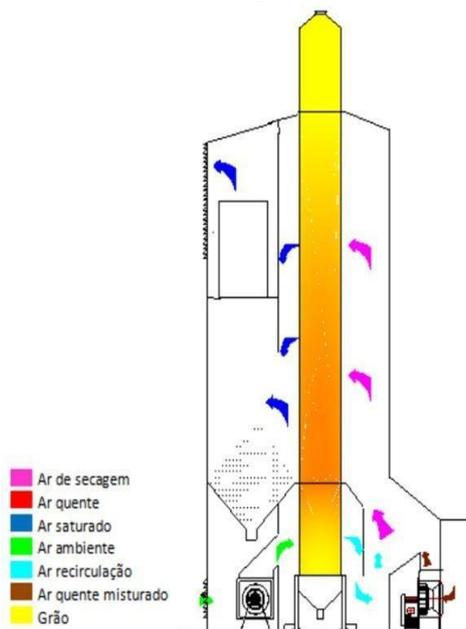
A maioria dos secadores atualmente utilizados em processos industriais de secagem no Brasil são modelos de alta temperatura com fluxo misto.

Possuem princípio de funcionamento com sistema de transferência direta de calor. Os gases aquecidos provenientes da queima de lenha ou cavaco da fornalha são direcionados para a coluna de secagem, onde fazem contato direto com os grãos.

Este sistema de transferência de calor pode variar entre fabricantes quanto ao sentido em que as correntes de ar permeiam os grãos. As principais diferenças entre os modelos são as formas de recirculação e reaproveitamento de ar, a existência ou não de sistema de resfriamento de grãos, além da adoção ou não de sistema de filtragem de partículas do ar eliminado ao ambiente externo (Silva *et al*, 2008).

O sistema apresentado na Figura 2 representa o secador da marca Kepler Weber, modelo Khronos R. Nele o ar de secagem proveniente da fornalha é direcionado diretamente para permear os grãos na parte superior da coluna de secagem. Na parte inferior da coluna ocorre o resfriamento através da ventilação com ar ambiente. O ar de recirculação, que foi utilizado para o resfriamento, é então misturado com o ar de secagem e por fim direcionado à coluna de secagem na parte superior. Por fim ocorre a filtragem de partículas do ar saturado, e posteriormente sua exaustão para o ambiente externo.

Figura 2 - Sistema de secagem com resfriamento.

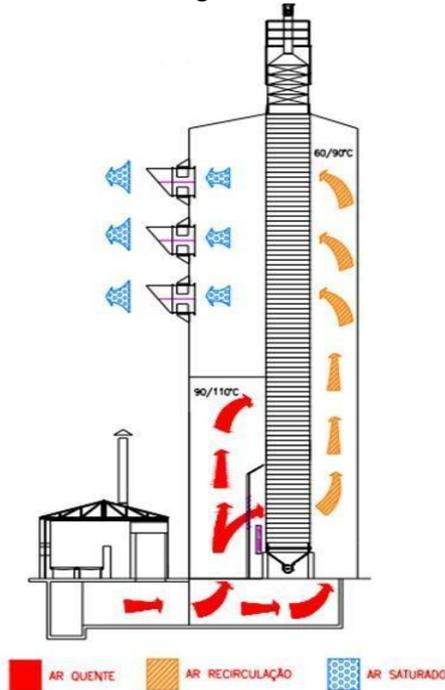


Fonte: Kepler Weber (2014).

Na Figura 3 é representado o funcionamento do secador da marca COMIL, modelo CM-DR. O ar quente proveniente da fornalha é direcionado primeiramente para a parte inferior da coluna de secagem. Parte deste ar aquecido permeia a massa de grãos enquanto outra porção é direcionada através de uma câmara subterrânea para o lado oposto da coluna de grãos. Deste lado é misturado ao ar de recirculação e canalizado à parte superior da

coluna de secagem onde novamente permeia a massa de grãos. Posteriormente é eliminado à atmosfera em forma de ar saturado. Portanto, nesta configuração de equipamento não há o resfriamento da massa de grãos.

Figura 3 -Sistema de secagem sem resfriamento.



Fonte: COMIL (2011).

3.2 Causas de incêndios em secadores de grãos

Devido às características de trabalho em altas temperaturas, aliado ao processamento de materiais combustíveis, o processo de secagem de grãos produz uma combinação de fatores que oferece elevado risco de incêndio aos equipamentos secadores.

Os fatores que podem causar incêndios variam, sendo os principais deles:

3.2.1 Grãos com excesso de impureza

O principal fator desencadeador de incêndios são as impurezas encontradas na massa de grãos. Estes resíduos são oriundos do processo de colheita e podem permanecer misturados à massa de grãos mesmo após os processos de limpeza.

As impurezas são caracterizadas por materiais vegetais pertencentes à cultura. São classificadas como colmos, cascas, caules, vagens, hastes, pecíolos, sabugos, palha, raízes e folhas (SENAR, 2017), conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 -Impurezas de milho.

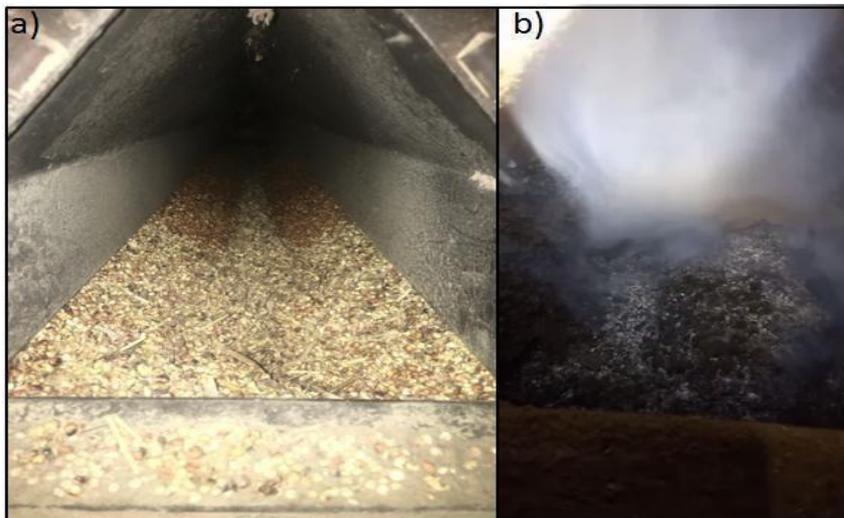


Fonte: Acervo dos autores (2019).

Por possuírem formas e tamanhos diversos dos grãos, não se deslocam na mesma velocidade dentro da coluna de secagem. Desta forma, geram ninhos de resíduos nas partes superiores do secador e podem se sobreaquecer desencadeando o processo de combustão.

A Figura 5 apresenta no quadro a), impurezas de grãos de sorgo acumuladas na superfície de uma passagem de ar na coluna de secagem de um secador de grãos. O quadro b) mostra um princípio de incêndio iniciado nas impurezas dos grãos de sorgo.

Figura 5: Princípio de incêndio em impurezas de grãos de sorgo.



Fonte: Acervo do autores (2023).

3.2.2 Operação incorreta da fornalha

As fornalhas que geram a energia de secagem nos secadores usam, em sua maioria, lenha como combustível e possuem entradas de ar para alimentação da combustão. Caso as passagens sejam fechadas, com objetivo de redução do consumo de lenha, ocorrerá a redução da vazão de ar de secagem e a acentuação da combustão incompleta do combustível, que é caracterizada pela liberação de resíduos de queima capazes de continuar reagindo com o ar (DRYSDALE, 1999).

Desta forma, fagulhas podem ser arrastadas para o interior do secador e, ao encontrarem impurezas ou grãos sobreaquecidos podem fazê-los entrar em combustão.

Ainda, a elevação da temperatura de secagem acima dos níveis recomendados é erroneamente realizada para se aumentar a capacidade de secagem. Além de prejudicar a qualidade final dos grãos, este erro de

operação potencializa o sobreaquecimento do produto e contribui para a ocorrência dos princípios de incêndios (COMIL, 2011).

Outro fator importante na operação das fornalhas é a constância no processo de abastecimento de combustível, garantindo que não haja escassez ou excesso de lenha. Desta forma previne-se a elevação excessiva da temperatura de secagem e a geração de fagulhas durante reabastecimentos instáveis.

A Tabela 1 apresenta as temperaturas de operação de secadores conforme os grãos a serem processados.

Tabela 1 - Temperaturas de operação de secadores.

Produto	Temperatura de secagem (°C)
Soja	110
Milho	110
Trigo	100
Aveia	70
Arroz	60

Fonte: COMIL (2011).

3.2.3 Negligência na limpeza sistemática

A Figura 6 mostra resíduos do processo de secagem acumulados em uma das câmaras de ar de um secador. Juntamente com as impurezas oriundas do processo de colheita que se acumulam na torre de secagem, estes materiais quando sobreaquecidos são potenciais combustíveis propagadores de incêndios.

Para minimizar o risco de incêndios se recomenda que a limpeza da torre de secagem seja feita no máximo a cada três dias. Já as câmaras de ar devem receber manutenção diariamente (COMIL, 2011).

Figura 6: a) Cascas de grão de milho em câmara de passagem de ar, b) Cascas de grão de milho.



Fonte: Acervo dos autores (2019).

3.2.4 Presença de fagulhas no ar de secagem

Devido ao sistema de transferência direta de calor da fornalha para a coluna de secagem pode ocorrer a passagem de resíduos da queima até a massa de grãos, como fagulhas e fuligem por exemplo. Estes materiais em contato com impurezas ou grãos sobreaquecidos podem desencadear incêndios no corpo de secagem.

As partículas incandescentes possuem facilidade de causar incêndios em combustíveis sólidos de baixa densidade ou propensos a combustão lenta, como é o caso das impurezas encontradas nos secadores (Babrauskas, 2003).

Dentre as principais causas de geração de fagulhas estão os combustíveis de má qualidade. Neste caso pode haver o desprendimento de gases ou particulados sólidos que se inflamam e podem alcançar a massa de grãos.

Aberturas de ar desreguladas e até mesmo rachaduras na parede da fornalha contribuem para a aceleração do processo de combustão da lenha e corroboram para a geração de fagulhas (COMIL, 2011).

A Figura 7 mostra um secador de grãos com sistema de transferência de calor direta entre a fornalha e a coluna de secagem.

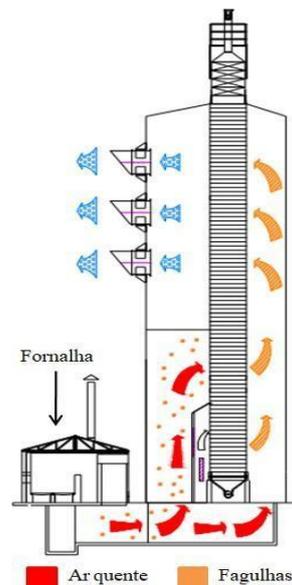


Figura 7 – Transferência direta de calor.

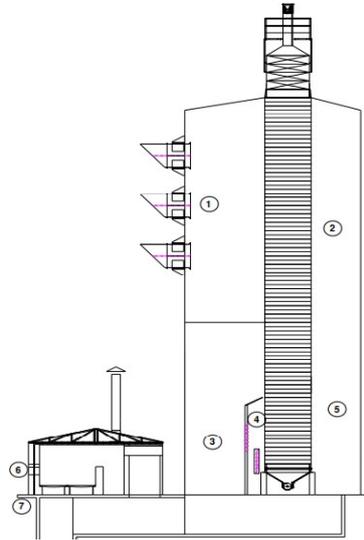
Fonte: Adaptado de COMIL (2011).

3.2.5 Falta de nível de produto

A correta utilização dos secadores exige que sua operação seja realizada sempre com a torre de secagem cheia de grãos. Para tanto, é recomendada a utilização de sensores indicadores de nível instalados na parte superior do equipamento, onde ocorre a entrada dos grãos (COMIL, 2011).

Quando os níveis de grãos estão abaixo do recomendado se formam passagens de ar através da torre de secagem. O ar quente atravessa o equipamento sem passar pela massa de grãos. As passagens de ar falsas desestabilizam os pontos de pressão de ar do secador, conforme apresentado na Figura 8, fazendo com que a velocidade do fluxo de ar aumente e arraste consigo fagulhas oriundas da fornalha.

Figura 8: Pontos de pressão do secador.

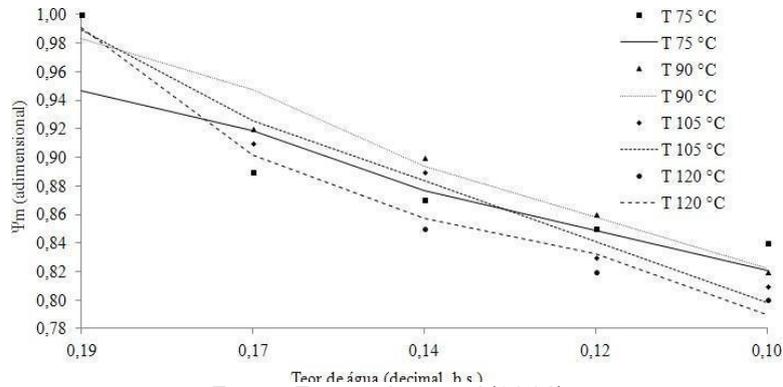


Fonte: COMIL (2011).

A falta de produto na torre de secagem pode ocorrer por imperícia na operação ou pela contração volumétrica da massa de grãos durante a secagem.

Durante o processo de secagem a desidratação dos grãos causa mudanças de geometria e redução em suas dimensões. As temperaturas de secagem são fatores determinantes de influência na contração volumétrica. A Figura 9 apresenta os valores da contração volumétrica em função da umidade inicial de grãos de soja. Nesta situação houve contração volumétrica de 20,2% no intervalo de secagem de 0,19 (b.s) até 0,11(b.s) (Fernandes *et al*, 2014).

Figura 9: Dados experimentais de contração volumétrica de grãos de soja.



Fonte: Fernandes *et al* (2014)

Conforme demonstrado, a contração volumétrica dos grãos é inerente ao processo de secagem. Desta forma é possível haver a falta de nível de produto durante a operação, contribuindo para a ocorrência de incêndios nos secadores.

3.2.6 Condições inadequadas de instalação

Os secadores de grãos devem possuir equipamentos acessórios que podem ser instalados como medidas preventivas de incêndios. Fatores como a indicação incorreta de temperatura podem contribuir para princípios de incêndios como ilustrado na Figura 10, haja vista o sobreaquecimento das impurezas e da massa de grãos (COMIL, 2011).

Figura 10: Incêndio avançado em secador de grãos.



Fonte: Acervo dos autores (2023)

4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ENCONTRADOS NO PROCESSO DE SECAGEM FRENTE AS CAUSAS DE INCÊNDIOS

Nesta etapa foi realizada a coleta de amostras de grãos e resíduos de milho encontrados em colunas de secagem de secadores de grãos. A coleta dos materiais foi realizada nas seguintes unidades de beneficiamento de grãos: Unidade I - Toledo, PR. Unidade II - Toledo, PR. Unidade III - Cascavel, PR. Conforme ilustrado na Tabela 2, os materiais coletados e submetidos a ensaios foram os seguintes:

Tabela 2 - Materiais submetidos a ensaios.

Material	Unidade I	Unidade II	Unidade III
Grão de milho			x
Casca de grão de milho	x	x	
Sabugo de milho	x		

As amostras foram separadas em porções e colocadas em cadinhos, conforme ilustrado na Figura 11. Após permanecerem em estufa a 105 °C por um período de vinte e quatro horas para redução de umidade. Depois de retiradas da estufa, as amostras foram depositadas em um dessecador para resfriamento e armazenamento.

Figura 11 - Amostras de casca de grão de milho



Posteriormente foram coletadas porções menores das amostras e realizados ensaios para observação de comportamento individual a altas temperaturas no Laboratório de Saneamento da UTFPR, campus Toledo-PR, e Laboratório de Inovações Tecnológicas da UNIOESTE, campus Toledo-PR, com objetivo de identificar a faixa de temperatura em que ocorre a autoignição das amostras.

Para a observação do comportamento das amostras a altas temperaturas foi utilizado o método determinado pela EN, com referência na

NF T 20-036 – Determinação da temperatura relativa de inflamabilidade espontânea de sólidos.

Conforme este método um cubo de malha de arame de aço inoxidável, com aberturas de 0,045 mm e, com dimensões de 20 x 20 x 20 mm, foi preenchido com porções das amostras a serem testadas. O cubo foi então suspenso através de um suporte no interior de um forno MUFLA à temperatura ambiente e com ventilação natural. Um termopar tipo K foi colocado no centro do cubo, com objetivo de registrar o comportamento da temperatura da amostra e, outro termopar entre o cubo e a parede do forno, com objetivo de registrar a temperatura do forno, conforme ilustrado na Figura 12. Seguindo a metodologia, a temperatura do forno foi regulada para atingir a temperatura máxima de 400 °C, onde se encerrou a coleta de dados.

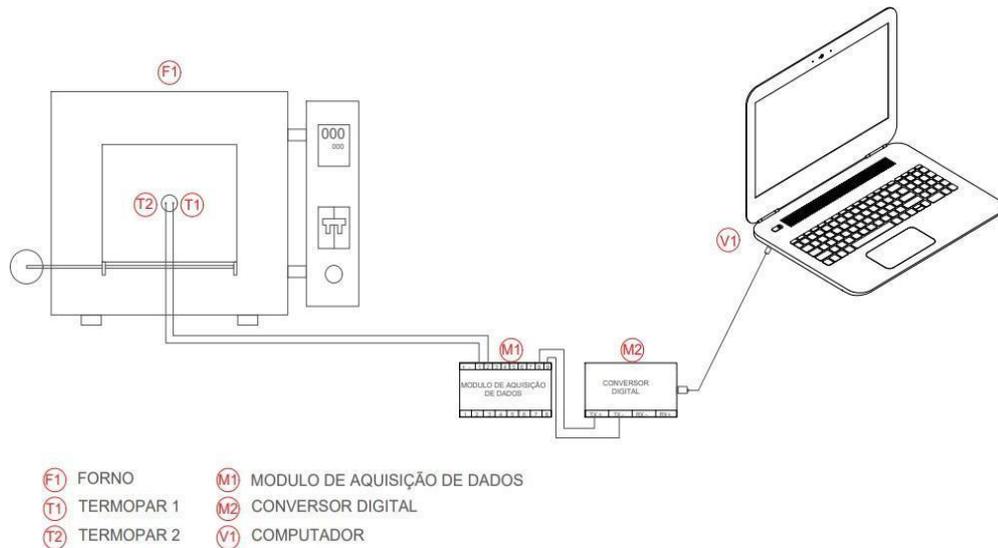
Figura 12 -Amostra de resíduo no interior do forno



Durante as baterias de testes, as temperaturas do forno e da amostra foram registradas através de um módulo de aquisição e registro de dados, marca Novus, modelo FieldLogger, com oito entradas analógicas, duas saídas a relé e oito portas digitais de entrada ou saída. O módulo de aquisição de dados foi conectado a um computador para acompanhamento dos resultados

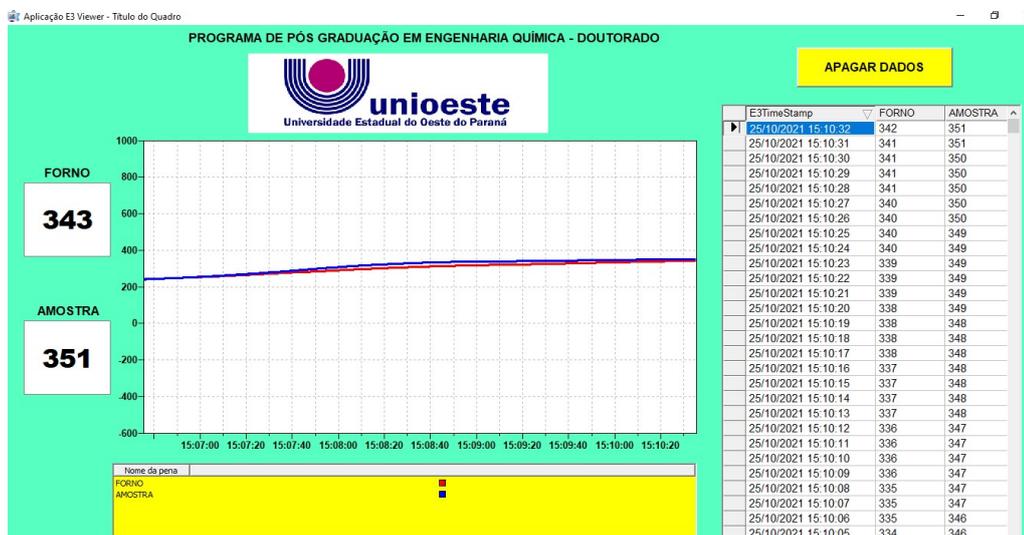
através do software Elipse, versão E3 Server, Studio, Viewer, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Sistema de coleta de dados.



O software foi programado para fazer leituras de temperatura nos termopares com intervalos de um segundo, conforme exemplificado na Figura 14.

Figura 14 -Interface software Elipse E3 Viewer 34.



Os resultados obtidos foram confrontados com as temperaturas de operação dos secadores de grãos, com a finalidade de identificar a origem da fonte de calor causadora dos incêndios.

4.1 Resultados dos ensaios de comportamento de materiais encontrados no processo de secagem frente as causas de incêndios

A Tabela 3 apresenta os dados referentes ao ensaio para verificação do comportamento a altas temperaturas realizado com casca de grão de milho coletados na Unidade I.

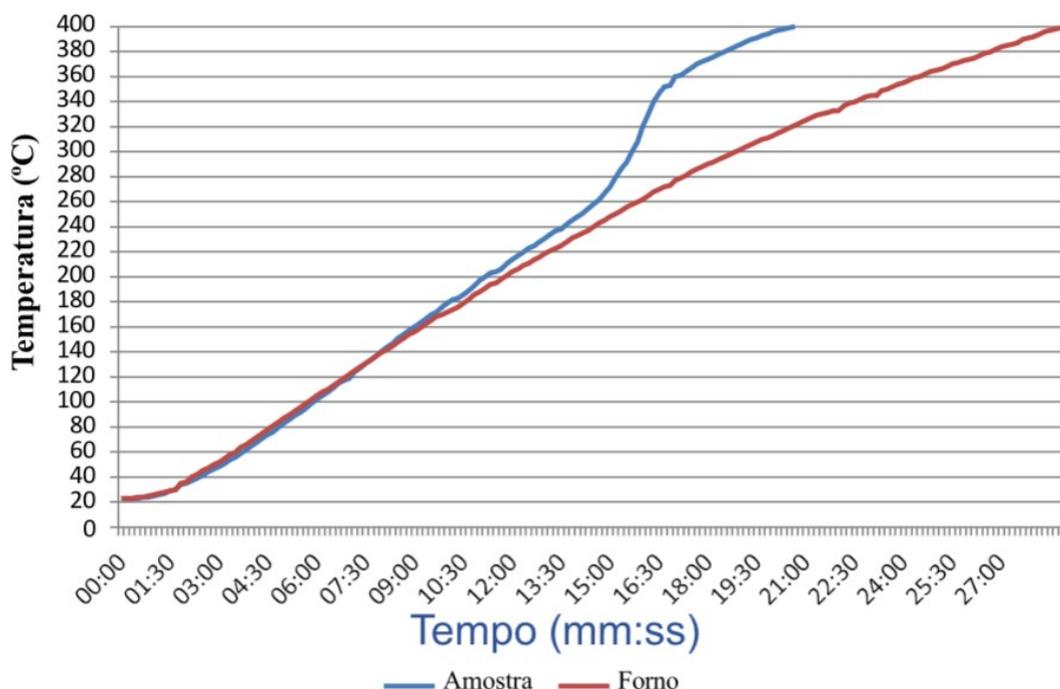
Tabela 3 – Teste 1 – Casca de grão de milho.

Amostra	Local de coleta	Data do teste	Hora do teste	Temperatura ambiente (°C)	Massa da amostra (g)
Casca de grão de milho	Unidade I	20/08/2021	9:30h	23	0,906

Conforme apresentado na Figura 15 as temperaturas do forno e da amostra permaneceram similares até a faixa compreendida entre 145 °C, no

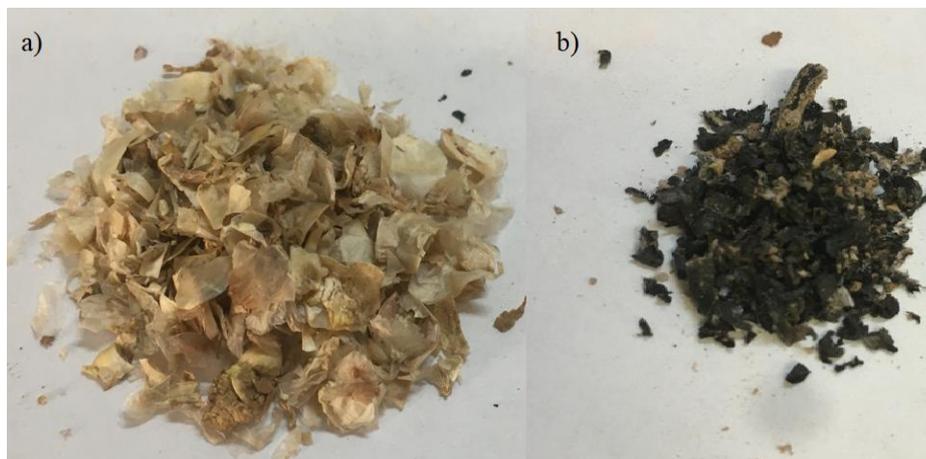
instante de 8'20". No intervalo subsequente até 14'40", a temperatura da amostra aumentou a uma razão de aquecimento de 18,1 °C/min, até atingir 262 °C, enquanto a temperatura do forno aumentou com razão de aquecimento de 15,2 °C/min, atingindo 243 °C. Após o instante 14'40", onde a faixa de temperatura estava em 260 °C, a temperatura da amostra aumentou a uma razão de aquecimento de 48,7 °C/min, atingindo 340 °C no instante 16'20". No mesmo período, a razão de aquecimento do forno foi de 15,6 °C/min.

Figura 15 - Teste 1 – Casca de grão de milho.



A Figura 16 apresenta em a), a amostra de casca de grão de milho antes da realização do teste e em b) após a realização do teste realizado no dia 20/08/2021. Na imagem b) se verifica a presença de carvão e cinzas na amostra.

Figura 16: a) Casca de grão de milho antes do teste,
b) Casca de grão de milho após teste



A Tabela 4 apresenta os dados referentes ao ensaio para verificação do comportamento a altas temperaturas realizado com casca de grão de milho coletados na Unidade II.

Tabela 4 – Teste 2 – Casca de grão de milho.

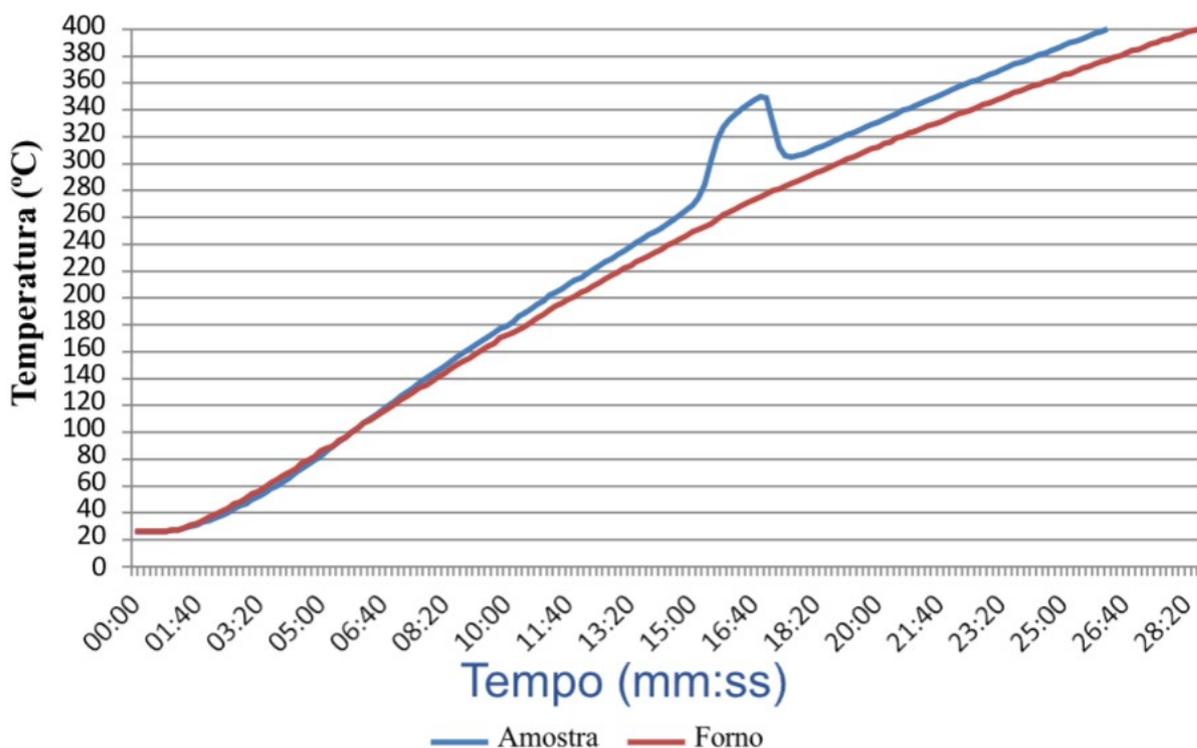
Amostra	Local de coleta	Data do teste	Hora do teste	Temperatura ambiente(°C)	Massa da amostra(g)
Casca	Unidade II	24/08/2021	14:18h	26	0,148

Da mesma forma que no teste 1, o comportamento da amostra de casca de grão de milho coletada na Unidade II se apresentou similar. A Figura 17 mostra que até a faixa entre 135 °C, no instante 7'50" as temperaturas do forno e da amostra permaneceram similares. No intervalo de tempo entre 7'50" e 14'40" a razão de aquecimento da amostra foi de 17,6 °C/min, atingindo 262 °C. Para o mesmo período o forno apresentou uma razão de aquecimento de 14,6 °C/min, atingindo 244 °C.

No intervalo entre 14'40" e 16'00" a amostra variou de 262 °C até 333 °C, com razão de aquecimento de 53,4 °C/min, enquanto a temperatura do

forno passou de 244 °C para 264 °C, com razão de aquecimento de 15,0 °C/min.

Figura 17: Teste 2 – Casca de grão de milho.



A Tabela 5 apresenta os dados referentes ao ensaio para verificação do comportamento a altas temperaturas realizado com grãos de milho coletados na Unidade III.

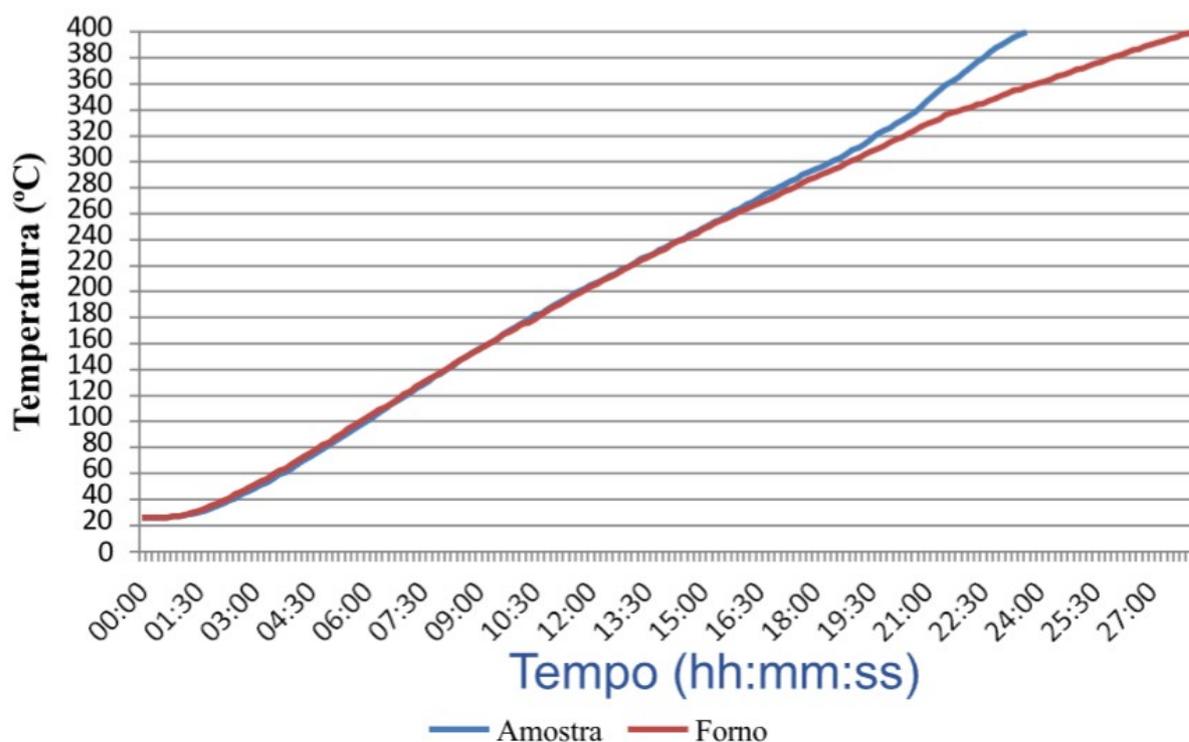
Tabela 5 – Teste 3 – Grão de milho.

Amostra	Local de coleta	Data do teste	Hora do teste	Temperatura ambiente (°C)	Massa da amostra (g)
Grão de Milho	Unidade III	25/08/2021	14:35h	26	3,0167

A Figura 18 apresenta os resultados do ensaio realizado com grãos de milho. Desde o início até o instante 16'40" não houve variação significativa entre a temperatura da amostra e do forno, permanecendo ambas similares até

270 °C. No intervalo entre 16'40" e 20'50" a temperatura da amostra passou a aumentar gradativamente em relação a temperatura do forno. Entre o instante de 20'50" e 23'40" a temperatura da amostra passou a aumentar com uma razão de aquecimento de 20,7 °C/min, até atingir 400 °C.No mesmo intervalo de tempo a temperatura do forno aumentou com uma razão de aquecimento de 11,1 °C/min atingindo 358 °C.

Figura 18: Teste 3 – Grão de milho.



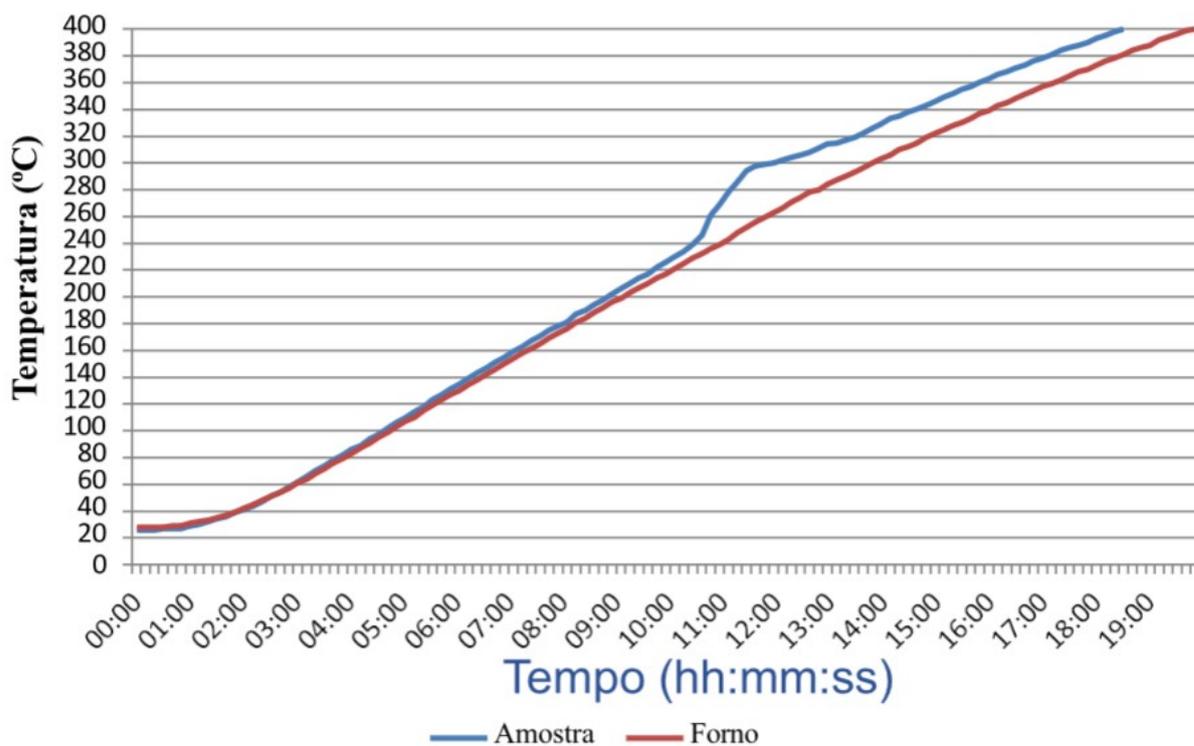
A Tabela 6 apresenta os dados referentes ao ensaio para verificação do comportamento a altas temperaturas realizado com sabugos de milho coletados na Unidade I.

Tabela 6 – Teste 4 – Sabugo.

Amostra	Local de coleta	Data do teste	Hora do teste	Temperatura ambiente(°C)	Massa da amostra(g)
Sabugo	Unidade I	06/09/2021	09:45h	26	0,615

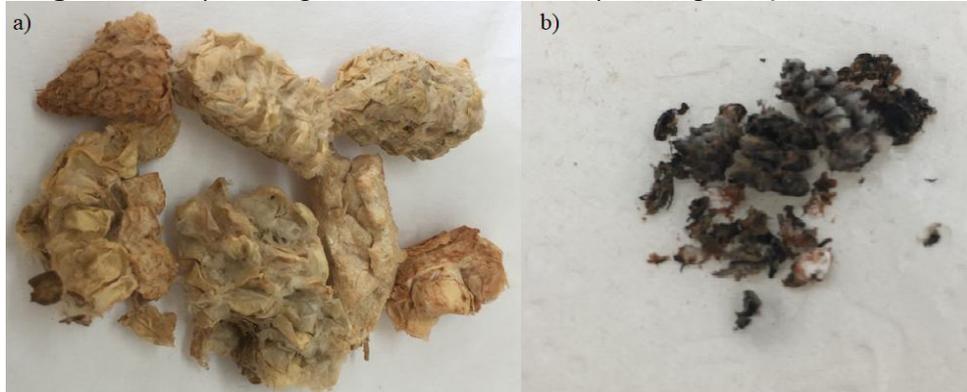
A Figura 19 mostra que as temperaturas de forno e amostra permaneceram similares até 150 °C, no instante 6'50". No intervalo seguinte, de 6'50" até 10'20" a temperatura da amostra ficou em média 7 °C acima da temperatura do forno. No instante 10'20", quando a temperatura da amostra era de 240 °C a razão de aquecimento atingiu 55 °C/min, alcançando 294 °C no instante e 11'20". Para o mesmo período a temperatura do forno aumentou com razão de aquecimento de 23 °C/min, atingindo 252 °C.

Figura 19 -Teste 4 – Sabugo.



A Figura 20 apresenta em *a*), a amostra de sabugos de milho antes da realização do teste e em *b*) após a realização do teste realizado no dia 06/09/2021. Na imagem *b*) se verifica grande presença de cinzas na amostra.

Figura 20: a) Sabugos antes do teste, b) Sabugos após teste.



A Figura 21, capturada durante o teste 4, apresenta a amostra de sabugo de milho no interior do forno, onde é possível observar a presença de brasas. Para esta situação a temperatura indicada para a amostra era de 270 °C e, do forno de 257 °C.

Figura 21: Sabugo em combustão latente durante ensaio.



A Tabela 7 apresenta o quadro de resumo dos resultados dos testes realizados para as condições específicas.

Tabela 7 – Quadro resumo de testes.

Teste	Material	Faixas de início de variação de temperaturas (°C)	Faixas de variação repentinas de temperaturas (°C)
1	Casca de grão de milho	145	240 - 260
2	Casca de grão de milho	135	260 - 270
3	Grão de milho	270	-
4	Sabugo de milho	150	240 - 260

As faixas de início de variação de temperaturas são caracterizadas pelo aumento da temperatura da amostra em relação à temperatura do forno. Witkowski (2016) explica que a presença de reações exotérmicas entre os vapores liberados pelo sólido e o oxigênio presente no ar resultam na liberação de calor e aumentam a temperatura do material gradualmente.

As faixas de variação repentinas de temperaturas foram caracterizadas pelo aumento abrupto da temperatura da amostra em relação à temperatura do forno. Durante esta fase foi observada a presença de brasas nas amostras, tipificando uma combustão latente, ou seja, sem a presença de chamas vivas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa identificou e analisou os principais fatores que contribuem para a ocorrência de incêndios em secadores de grãos. Foram apontadas como causas predominantes: o excesso de impurezas nos grãos, a operação inadequada da fornalha, a negligência na limpeza sistemática da coluna de secagem, a presença de fagulhas no ar de secagem, a ausência de controle do nível de produto e condições inadequadas de instalação dos equipamentos.

Os ensaios pesquisados para avaliar o comportamento térmico das amostras evidenciaram que as faixas de variação entre a temperatura das amostras e a do forno situaram-se entre 135 °C e 150 °C. Considerando que a temperatura padrão de secagem do milho é de 110 °C, conclui-se que, para que ocorra a combustão dos materiais, é necessário que haja falhas operacionais, como a presença de fagulhas ou a operação incorreta da fornalha, que elevam a temperatura além do limite seguro.

As amostras de cascas e sabugos de milho apresentaram faixas de início de variação térmica mais baixas em comparação aos grãos inteiros, demonstrando maior suscetibilidade à ignição. Nos ensaios pesquisados, essas impurezas registraram variações repentinas de temperatura na faixa de 240 °C a 270 °C. Observou-se, ainda, que a presença de "ninhos" de impurezas na massa de grãos favorece significativamente o surgimento de focos de incêndio na coluna de secagem.

Dessa forma, conclui-se que a adoção de medidas preventivas — como a regulagem adequada da fornalha, a limpeza periódica da coluna de secagem e a pré-limpeza eficiente dos grãos — é essencial para a mitigação dos riscos de incêndio. Ressalta-se que tais práticas devem ser previstas em normativas específicas que regulem a operação dos secadores de grãos.

Por fim, destaca-se que este estudo fornece subsídios relevantes para a atividade pericial em incêndios, especialmente no que tange à formulação e teste de hipóteses sobre as causas desses eventos. Recomenda-se a continuidade de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de dispositivos de detecção e alerta baseados em sistemas sensoriais específicos, bem como à consolidação de boas práticas operacionais voltadas à prevenção de incêndios em unidades de secagem de grãos.

REFERÊNCIAS

BABIC, M.; BABIC, L. Advantages and disadvantages of direct and indirect drying of mercantile grain and seeds. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 2020, vol. 24, iss. 2, pp. 81-84.

BABRAUSKAS, V. *Ignition Handbook*, Fire Science Publishers/Society of Fire Protection Engineers, Issaquah, WA (2003).

BELLOCHIO, S. D. C.; CORADI, P. C.; MARAN, V.; SANTOS, M. A.; SILVEIRA, L. W.; TEODORO, P. E. Towards a software architecture to manage occupational safety at grain handling and storage facilities. *Scientific reports*, 2022-02, Vol. 12 (1), p.2612-2612, Article 2612.

COMIL SILOS E SECADORES. Manual de operação e manutenção: Secadores de coluna COMIL. Versão 06/2011. Cascavel, PR, 2011. 40 p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v.8, safra 2020/21, n. 12 décimo segundo levantamento, setembro. 2021.

CSB - Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2009). Investigation Report: Combustible Dust Hazard Study. Disponível em: https://www.csb.gov/assets/1/20/imperial_sugar_report_final_updated.pdf?13902

DRYSDALE, D. *An Introduction to Fire Dynamics*, 2ª edição, EUA: John Wiley & Sons, 1999.

FAOSTAT. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso: 15/09/2021.

FERNANDES, C.H.P, CORADI, P.C., HELMICH, J.C. (2014). Contração volumétrica de grãos de soja submetidas à secagem com diferentes temperaturas. XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014. Campo Grande - MS, Brasil.

LEPPÄLÄ, J. (2016). *Systematic Risk Management on Farms*. Doctoral Dissertation. Department of Industrial Engineering and Management. Aalto University Publication Series 17/2016. Espoo, Finland.

PERSSON, H. Silo Fires - Fire
extinguishingandpreventiveandpreparatorymeasures. Swedish Civil
Contingencies Agency (MSB). July 2013. 122 p.

SENAR. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. Grãos: classificação de soja e milho. / Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. – Brasília: SENAR, 2017. 152 p.; il.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L.. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa : Aprenda Fácil, 2008.

TAMASCELLI, N.; SCARPONI, G. E.; AMIM, T.; SAJID, Z.; PALTRINIERI, N.; KHAN, F.; COZZANI, V. A neural network approach to predict the time to failure of atmospheric tank exposed to external fire. Reliability Engineering and System Safety 245 (2024).

XIE. Q.; GAO. M.; HUANG. X. Fire risk and behavior of rice during the convective drying process. Fire Safety Journal, 115 (2020) 103013.