

# **MECÂNICA DA EXPLOSÃO EM ÁREAS CLASSIFICADAS COM IGNIÇÃO POR ATRITO**

## **1. INTRODUÇÃO**

A Mecânica da Explosão em Áreas Classificadas quando a ignição ocorre devido ao Atrito entre Superfícies. Neste capítulo, exploraremos os fatores envolvidos nesse processo e as medidas de prevenção e mitigação que podem ser adotadas para garantir a segurança dos trabalhadores e das instalações.

Em áreas classificadas, onde há a presença de substâncias inflamáveis, compreender a mecânica da explosão é essencial para evitar incidentes graves. Uma explosão ocorre quando ocorre uma rápida liberação de energia em um espaço confinado, resultando em uma onda de choque e uma súbita expansão de gases. A ignição é o fator desencadeante para a explosão, e o atrito entre superfícies pode desempenhar um papel significativo nesse processo.

Neste capítulo, nos concentraremos especificamente na ignição por atrito. Quando duas superfícies estão em contato e há movimento relativo entre elas, ocorre a transferência de energia na forma de calor devido à fricção gerada. Em áreas classificadas, onde há a presença de substâncias inflamáveis, a geração de calor proveniente do atrito pode ser suficiente para elevar a temperatura do ambiente a um nível capaz de iniciar uma reação de combustão.

Para uma compreensão completa, exploraremos os fatores envolvidos no processo de ignição por atrito, como o coeficiente de atrito, a velocidade e pressão de contato, e o tempo de exposição. Além disso, discutiremos as medidas de prevenção e mitigação que podem ser adotadas para reduzir o risco de explosões nessas situações.

Ao longo deste capítulo, forneceremos informações detalhadas sobre esses tópicos, incluindo exemplos práticos e passo a passo para uma melhor compreensão. Nosso objetivo é capacitar você a identificar os riscos associados ao atrito em áreas classificadas e implementar medidas adequadas para garantir a segurança de todos os envolvidos.

## **2. A IMPORTÂNCIA DO ATRITO COMO FONTE DE IGNIÇÃO**

O atrito entre duas superfícies é um fenômeno que ocorre quando há resistência ao movimento relativo entre elas. Durante o atrito, parte da energia mecânica é convertida em calor devido à fricção gerada. Em áreas classificadas, onde há presença de hidrocarbonetos inflamáveis, é essencial entender a relação entre o atrito e o potencial de ignição.

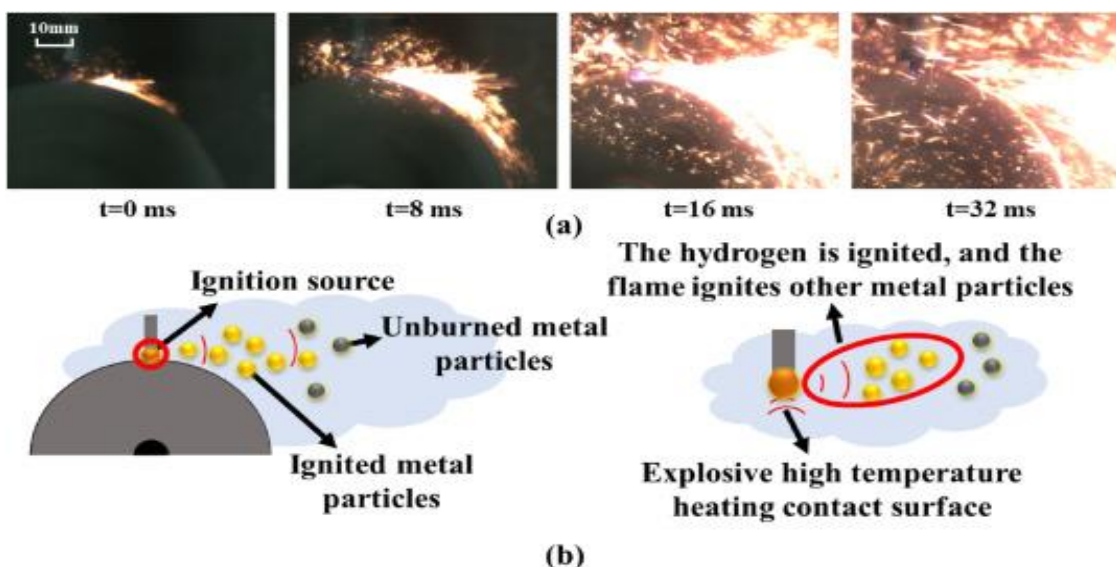
Para uma análise mais precisa, é importante considerar os coeficientes de atrito dos materiais envolvidos. O coeficiente de atrito é uma medida da resistência ao movimento relativo entre duas superfícies em contato. Quanto maior o coeficiente de atrito, maior é a força necessária para superar a resistência ao movimento.

Aqui está uma tabela com os coeficientes de atrito estático ( $\mu_s$ ) de alguns materiais comuns encontrados em instalações dentro de áreas classificadas:

Material	Coefficiente de Atrito Estático ( $\mu_s$ )
Aço sobre aço	0,74
Aço sobre concreto	0,60 - 0,85
Aço sobre madeira seca	0,50 - 0,80
Aço sobre borracha seca	0,62
Aço sobre gelo	0,03
Aço sobre graxa	0,10 - 0,15
Aço sobre óleo lubrificante	0,10
Aço sobre vidro	0,94
Aço sobre plástico	0,30 - 0,60

É importante lembrar que esses valores são apenas uma referência geral e podem variar dependendo das condições específicas da superfície, como rugosidade, umidade e presença de contaminantes.

Ao realizar projetos, operações ou manutenção em instalações dentro de áreas classificadas, é crucial considerar esses coeficientes de atrito para avaliar o risco de geração excessiva de calor e a possibilidade de ignição. Medidas adequadas de prevenção e mitigação devem ser implementadas com base nessas informações.



### 3. FATORES QUE INFLUENCIAM A OCORRÊNCIA DA IGNIÇÃO POR ATRITO

**3.1. Coeficiente de atrito:** O coeficiente de atrito é um fator importante na geração de calor durante o atrito entre superfícies. Materiais com coeficientes de atrito mais altos têm maior probabilidade de gerar calor suficiente para causar a ignição em áreas classificadas. Por exemplo, se duas superfícies com um coeficiente de atrito alto, como metal e metal, estão em contato e há movimento relativo entre elas, a quantidade de calor gerada será maior em comparação com superfícies com coeficientes de atrito mais baixos, como metal e plástico.

**3.2. Pressão de contato:** A pressão de contato entre as superfícies é outro fator que influencia a geração de calor por atrito. Aumentos na pressão de contato podem resultar em maior geração de calor e, conseqüentemente, maior risco de ignição. Por exemplo, se as superfícies estão sujeitas a uma pressão de contato mais alta devido a cargas aplicadas ou forças externas, a quantidade de calor gerada durante o atrito será maior. Isso se deve ao aumento da área de contato e à maior força de atrito envolvida.

**3.3. Velocidade de deslizamento:** A velocidade de deslizamento entre as superfícies também desempenha um papel crucial na geração de calor e no risco de ignição. Quanto maior a velocidade de deslizamento, maior será a geração de calor durante o atrito. Isso ocorre porque a energia cinética transformada em energia térmica é diretamente proporcional à velocidade de deslizamento. Portanto, se as superfícies estiverem se movendo rapidamente uma em relação à outra, haverá um aumento significativo na geração de calor e, conseqüentemente, no risco de ignição em áreas classificadas.

Esses fatores - coeficiente de atrito, pressão de contato e velocidade de deslizamento - são fundamentais para compreender o risco de ignição por atrito em áreas classificadas. É importante considerar esses fatores ao analisar e avaliar a segurança de instalações e processos em ambientes onde há substâncias inflamáveis presentes.

### 4. PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO DA IGNIÇÃO POR ATRITO

**Seleção de materiais:** A seleção adequada dos materiais em áreas classificadas é crucial para reduzir o risco de geração excessiva de calor devido ao atrito. Utilizar materiais com coeficientes de atrito adequados e compatíveis entre si pode ajudar a minimizar a quantidade de calor gerado durante o atrito. Por exemplo, se houver a necessidade de duas superfícies em contato no ambiente classificado, escolher materiais com coeficientes de atrito mais baixos pode reduzir o risco de ignição.

**Lubrificação:** A aplicação de lubrificantes adequados entre as superfícies em contato é uma medida eficaz para reduzir o atrito e, conseqüentemente, o risco de ignição por atrito. Os lubrificantes formam uma camada protetora entre as superfícies, reduzindo o

coeficiente de atrito e minimizando o calor gerado durante o movimento relativo. É importante escolher lubrificantes compatíveis com os materiais envolvidos e considerar as condições ambientais para garantir sua eficácia.

**Monitoramento da temperatura:** Realizar um monitoramento contínuo da temperatura nas áreas com potencial de atrito é uma medida preventiva importante. Isso pode ser feito por meio de sensores de temperatura instalados em locais críticos. O monitoramento permite identificar situações de risco iminente, em que a temperatura está aumentando perigosamente devido ao atrito. Dessa forma, ações corretivas podem ser tomadas antes que ocorra uma ignição.

**Treinamento e conscientização:** Fornecer treinamento adequado aos trabalhadores é essencial para garantir a segurança em áreas classificadas. É importante que eles estejam cientes dos riscos associados à ignição por atrito e compreendam a importância das medidas preventivas. O treinamento deve abordar tópicos como a seleção adequada de materiais, a correta aplicação de lubrificantes e a necessidade de monitorar a temperatura. Além disso, os trabalhadores devem ser instruídos sobre as ações a serem tomadas em caso de detecção de aumento de temperatura ou risco iminente de ignição.

Essas medidas de prevenção e mitigação da ignição por atrito são fundamentais para garantir a segurança em áreas classificadas. Ao adotar essas medidas, é possível reduzir significativamente o risco de explosões e proteger tanto os trabalhadores quanto as instalações.

## 5. NORMAS DE REFERÊNCIA

Existem várias normas e procedimentos relevantes para a prevenção de explosões em áreas classificadas.

Alguns exemplos incluem:

- **Norma ABNT NBR IEC 60079-32-1:** Essa norma especifica os requisitos para a prevenção de explosões por ignição de materiais combustíveis em contato com equipamentos elétricos em áreas classificadas.
- **Norma NFPA 70:** Essa norma do National Fire Protection Association (NFPA) amplamente utilizada para garantir a segurança das instalações elétricas. Ela estabelece requisitos mínimos para o projeto, instalação, inspeção e manutenção de equipamentos elétricos em edifícios, estruturas e instalações.
- **Norma NFPA 652:** Essa norma do National Fire Protection Association (NFPA) fornece orientações gerais para a segurança do pó combustível, incluindo medidas de prevenção de explosões em áreas classificadas.

- **Norma IEC 60079-10:** Essa norma fornece requisitos para a seleção e instalação de equipamentos elétricos em atmosferas explosivas.
- **Norma IEC 60079-0:** Essa norma estabelece os requisitos gerais para equipamentos elétricos utilizados em atmosferas explosivas, incluindo áreas classificadas com presença de hidrocarbonetos.
- **Norma API PSD 2214:** Essa norma do American Petroleum Institute (API) estabelece orientação sobre as propriedades de ignição por centelha de ferramentas manuais utilizadas em áreas classificadas.
- **Norma OSHA 29 CFR 1910.120:** Essa norma estabelece diretrizes para a segurança e saúde ocupacional em áreas classificadas.

Essas normas fornecem orientações específicas sobre seleção de equipamentos, projetos de instalações elétricas, requisitos de manutenção e outros aspectos relacionados à prevenção de explosões em áreas classificadas. É importante consultar e seguir as normas adequadas para garantir a conformidade e a segurança.

## 6. DETALHAMENTO QUÍMICO

Para compreender melhor a mecânica da explosão em áreas classificadas com ignição por atrito, é importante considerar as propriedades químicas dos hidrocarbonetos inflamáveis envolvidos.

O conhecimento dessas propriedades químicas é fundamental para entender como a ignição por atrito pode ocorrer em áreas classificadas e para tomar medidas adequadas de prevenção.

Alguns aspectos relevantes incluem:

**6.1. Ponto de Fulgor:** O ponto de fulgor é uma propriedade importante a ser considerada ao lidar com hidrocarbonetos inflamáveis. Ele representa a temperatura mínima na qual um líquido libera vapor suficiente para formar uma mistura inflamável em contato com uma fonte de ignição, como o atrito. É uma medida crucial para determinar o risco de ignição por atrito, pois indica a facilidade com que o líquido pode gerar vapores inflamáveis. Quanto mais baixo o ponto de fulgor, maior é o risco de ignição por atrito.

### Medida do ponto de fulgor

O ponto de fulgor é medido usando um aparelho chamado vaso fechado. O líquido a ser testado é colocado no vaso e aquecido lentamente. Uma chama é então introduzida no vaso. Se o líquido liberar vapor suficiente para inflamar a chama, o ponto de fulgor é registrado como a temperatura na qual isso ocorre.

## Classificação de líquidos inflamáveis por ponto de fulgor

Os líquidos inflamáveis são classificados por seu ponto de fulgor de acordo com a norma NFPA 30:

- **Classe I:** Líquidos com ponto de fulgor abaixo de 60 °C (140 °F).
- **Classe II:** Líquidos com ponto de fulgor entre 60 e 93 °C (140 e 200 °F).
- **Classe III:** Líquidos com ponto de fulgor acima de 93 °C (200 °F).

### Risco de ignição por atrito

O risco de ignição por atrito aumenta à medida que o ponto de fulgor do líquido diminui. Líquidos com pontos de fulgor muito baixos, como a gasolina, são altamente inflamáveis e podem ser facilmente ignidos por atrito.

**Por exemplo**, um hidrocarboneto com um ponto de fulgor baixo, como a gasolina, apresenta um risco mais elevado de ignição durante o atrito em comparação com um hidrocarboneto com um ponto de fulgor mais alto, como o óleo diesel.

**6.2. Energia de Ativação:** A energia de ativação é uma propriedade importante de uma reação química. Ela representa a quantidade mínima de energia necessária para iniciar a reação. A energia de ativação é determinada pela natureza das substâncias envolvidas na reação e pelas condições ambientais.

No caso da ignição por atrito, a energia de ativação pode ser fornecida pelo calor gerado durante o atrito entre as superfícies. O calor gerado pelo atrito pode quebrar as ligações químicas das moléculas do hidrocarboneto inflamável, formando radicais livres. Os radicais livres são moléculas ou átomos que têm um ou mais elétrons desemparelhados. Os radicais livres são altamente reativos e podem iniciar reações químicas, incluindo a combustão.

### Energia de ativação e ignição por atrito

A energia de ativação é uma propriedade importante de uma reação química. Ela representa a quantidade mínima de energia necessária para iniciar a reação. A energia de ativação é determinada pela natureza das substâncias envolvidas na reação e pelas condições ambientais.

No caso da ignição por atrito, a energia de ativação pode ser fornecida pelo calor gerado durante o atrito entre as superfícies. O calor gerado pelo atrito pode quebrar as ligações químicas das moléculas do hidrocarboneto inflamável, formando radicais livres. Os radicais livres são moléculas ou átomos que têm um ou mais elétrons desemparelhados. Os radicais livres são altamente reativos e podem iniciar reações químicas, incluindo a combustão.

## Como a energia de ativação afeta a ignição por atrito

Quanto menor a energia de ativação do hidrocarboneto inflamável, mais fácil será para o calor gerado pelo atrito quebrar as ligações químicas das moléculas e formar radicais livres. Isso significa que hidrocarbonetos inflamáveis com energias de ativação mais baixas são mais propensos a serem ignitos por atrito.

Por exemplo, a gasolina tem uma energia de ativação de 11,2 kcal/mol, enquanto o óleo diesel tem uma energia de ativação de 42,8 kcal/mol. Isso significa que é mais fácil para o calor gerado pelo atrito quebrar as ligações químicas das moléculas de gasolina do que das moléculas de óleo diesel.

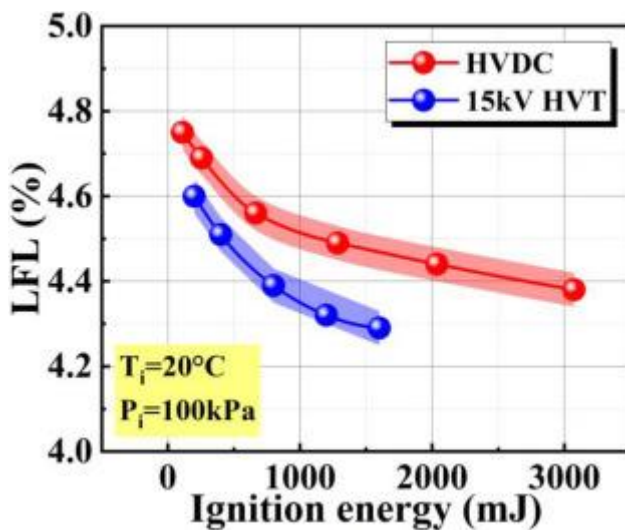
### Planilha de Energia de Ativação de alguns produtos petroquímicos

<b>Produto</b>	<b>Energia de ativação (kcal/mol)</b>
Gasolina	11,2
Óleo diesel	42,8
Querosene	28,5
Nafta	22,4
Benzeno	12,4
Tolueno	14,3
Xileno	14,2
Metanol	11,0
Etanol	11,6
Acetona	18,7
Acetileno	52,0
Cloro	29,2
Flúor	37,0
Nitrogênio	23,3
Oxigênio	29,4
Enxofre	26,0
Fósforo	31,0

A energia de ativação pode variar dependendo das condições específicas, como temperatura, pressão e presença de catalisadores. Além disso, os valores de energia de ativação podem ser influenciados pela presença de outros componentes em uma mistura.

No entanto, é importante entender que a energia de ativação representa a quantidade mínima de energia necessária para iniciar uma reação química, como a combustão de um hidrocarboneto inflamável. Geralmente, hidrocarbonetos mais leves, como metano e etano, possuem energias de ativação relativamente baixas, tornando-os mais suscetíveis à ignição. Por outro lado, hidrocarbonetos mais pesados, como óleo diesel e querosene, podem exigir energias de ativação mais altas para iniciar a reação de combustão.

Lembre-se de que a energia de ativação é apenas um dos fatores a serem considerados na avaliação do risco de ignição por atrito. É essencial seguir as boas práticas de segurança, como evitar o contato de superfícies inflamáveis, utilizar lubrificantes adequados e monitorar a temperatura para garantir a segurança em áreas classificadas.



### Exemplos de ignição por atrito

A ignição por atrito pode ocorrer em uma variedade de situações, incluindo:

- **Rotação de peças**

Quando peças são rotativas, elas podem entrar em contato umas com as outras e gerar calor. Se o calor for suficiente, ele pode quebrar as ligações químicas das moléculas de um hidrocarboneto inflamável presente nas superfícies das peças, formando radicais livres. Os radicais livres podem então iniciar uma reação de combustão.

- **Impacto entre peças**

Quando peças são impactadas umas contra as outras, elas também podem gerar calor. O calor gerado pelo impacto pode ser suficiente para quebrar as ligações químicas das moléculas de um hidrocarboneto inflamável presente nas superfícies das peças, formando radicais livres. Os radicais livres podem então iniciar uma reação de combustão.

- **Atrito entre superfícies deslizantes**

Quando superfícies deslizam umas sobre as outras, elas podem gerar calor. O calor gerado pelo atrito pode ser suficiente para quebrar as ligações químicas das moléculas de um hidrocarboneto inflamável presente nas superfícies das peças, formando radicais livres. Os radicais livres podem então iniciar uma reação de combustão.

**6.3. Limites de inflamabilidade:** Os limites de inflamabilidade são outra propriedade a ser considerada. Eles referem-se às concentrações mínimas e máximas de um hidrocarboneto no ar que podem resultar em uma mistura explosiva. Esses limites são expressos em percentagem de volume. A concentração abaixo do limite inferior de inflamabilidade não é suficiente para sustentar a combustão, enquanto acima do limite superior de inflamabilidade a mistura é muito rica em hidrocarbonetos para que ocorra a combustão. Conhecer esses limites é essencial para evitar operar em condições de risco de explosão.

**Por exemplo,** se a concentração de um hidrocarboneto inflamável estiver dentro dos limites de inflamabilidade e houver atrito, a mistura pode se tornar explosiva, resultando em uma ignição por atrito.

A seguir a Tabela com os limites de inflamabilidade dos principais Hidrocarbonetos e produtos Petroquímicos. É importante lembrar que esses valores podem variar dependendo das condições ambientais, como temperatura e pressão. Essa tabela fornece uma referência dos limites de inflamabilidade dos principais hidrocarbonetos e produtos petroquímicos, mas é essencial consultar as fichas de segurança dos produtos específicos para obter informações precisas e atualizadas.

<b>Hidrocarboneto / Produto Petroquímico</b>	<b>Limite Inferior de Inflamabilidade (%)</b>	<b>Limite Superior de Inflamabilidade (%)</b>
Metano	5	15
Etano	3	12
Propano	2.1	9.5
Butano	1.9	8.5
Pentano	1.5	7.8
Hexano	1.2	7.3
Heptano	1.0	7.0
Octano	0.9	6.7
Benzeno	1.2	7.8
Tolueno	1.2	7.1
Xilenos	0.9	7.1
Metanol	6	36

<b>Hidrocarboneto / Produto Petroquímico</b>	<b>Limite Inferior de Inflamabilidade (%)</b>	<b>Limite Superior de Inflamabilidade (%)</b>
Etanol	3.3	19
Acetona	2.6	12.8
Éter de petróleo	1.9	8.5
Gasolina	1.4	7.6
Querosene	0.7	5.0
Óleo Diesel	0.6	5.0
Gás natural	4	14
GLP (gás de cozinha)	1.5	9.5

Esses aspectos - ponto de fulgor, limites de inflamabilidade e energia de ativação - são fundamentais para compreender a mecânica da explosão em áreas classificadas com ignição por atrito. Ao considerar essas propriedades químicas dos hidrocarbonetos inflamáveis envolvidos, é possível avaliar o risco de explosão e implementar medidas de segurança adequadas.

O processo de ignição por atrito começa quando o atrito entre duas superfícies gera calor. O calor gerado pode ser suficiente para elevar a temperatura da atmosfera explosiva até o seu ponto de ignição. Quando a temperatura da atmosfera explosiva atinge o seu ponto de ignição, a reação química de combustão é iniciada.

A reação química de combustão de uma atmosfera explosiva é uma reação exotérmica, o que significa que libera calor. O calor liberado pela reação química acelera a reação, o que pode levar a uma explosão.

A explosão é uma liberação repentina de energia que pode causar danos materiais e humanos significativos. A explosão pode ser acompanhada por um incêndio, que pode causar ainda mais danos.

#### **6.4. Detalhamento Químico da Ignição por Atrito**

A ignição por atrito pode ser dividido em duas etapas principais:

##### **6.4.1. Formação de Radicais Livres**

A primeira etapa da ignição por atrito é a formação de radicais livres. Os radicais livres são moléculas ou átomos que têm um ou mais elétrons desemparelhados. Os radicais livres são altamente reativos e podem iniciar reações químicas.

A formação de radicais livres pode ocorrer por uma variedade de mecanismos, incluindo:

**1. Quebra Térmica:** A quebra térmica é um processo químico no qual uma molécula é rompida em duas ou mais moléculas menores, ou radicais livres. A quebra térmica pode ser causada por uma variedade de fatores, incluindo calor, radiação ou eletricidade.

No contexto da ignição por atrito, a quebra térmica é um mecanismo importante para a formação de radicais livres. Os radicais livres são moléculas ou átomos que têm um ou mais elétrons desemparelhados. Os radicais livres são altamente reativos e podem iniciar reações químicas.

A quebra térmica pode ocorrer quando o calor gerado pelo atrito é suficiente para romper os laços químicos de uma molécula. O calor gerado pelo atrito pode ser alto, dependendo da velocidade e da intensidade do atrito.

O processo de quebra térmica pode ser dividido em duas etapas:

- **Aquecimento:** O calor gerado pelo atrito faz com que a energia cinética das moléculas aumente.
- **Ruptura do laço químico:** Quando a energia cinética de uma molécula é alta o suficiente, ela pode romper um laço químico, formando dois radicais livres.

O tipo de molécula que é quebrada pela quebra térmica depende da natureza da atmosfera explosiva. Em áreas petroquímicas, as atmosferas explosivas são geralmente compostas por hidrocarbonetos. Os hidrocarbonetos são moléculas orgânicas que contêm átomos de carbono e hidrogênio.

A quebra térmica de hidrocarbonetos pode produzir uma variedade de radicais livres, incluindo:

- **Radical hidroxila (OH)**
- **Radical alquil (R)**
- **Radical carbeno (C)**

Os radicais livres formados pela quebra térmica podem iniciar reações químicas, incluindo a combustão.

A velocidade da quebra térmica depende de uma série de fatores, incluindo:

- **A natureza da molécula:** A natureza da molécula afetará a energia necessária para romper os laços químicos.
- **A temperatura:** A temperatura afetará a energia cinética das moléculas.
- **A pressão:** A pressão afetará a força dos laços químicos.

A quebra térmica é um mecanismo importante para a ignição por atrito em áreas classificadas ou petroquímicas. A compreensão do processo de quebra térmica é importante para a prevenção de explosões.

**2. Reação de Oxidação-Redução:** Uma reação de oxidação-redução, também conhecida como reação redox, é uma reação química na qual um átomo ou molécula perde elétrons (oxidação) e outro átomo ou molécula ganha elétrons (redução).

Na oxidação, um átomo ou molécula perde um ou mais elétrons, tornando-se mais positivo. Na redução, um átomo ou molécula ganha um ou mais elétrons, tornando-se mais negativo.

As reações de oxidação-redução são importantes em uma variedade de processos químicos, incluindo a combustão, a corrosão e a eletrólise.

No contexto da ignição por atrito, a reação de oxidação-redução é um mecanismo importante para a formação de radicais livres. Os radicais livres são moléculas ou átomos que têm um ou mais elétrons desemparelhados. Os radicais livres são altamente reativos e podem iniciar reações químicas.

A reação de oxidação-redução pode ser causada pelo atrito entre duas superfícies que têm diferentes potenciais de oxidação-redução. O potencial de oxidação-redução é uma medida da tendência de um átomo ou molécula de perder ou ganhar elétrons.

Quando duas superfícies com diferentes potenciais de oxidação-redução entram em atrito, os elétrons podem ser transferidos de uma superfície para outra. Essa transferência de elétrons pode causar a formação de radicais livres.

O tipo de radical livre que é formado pela reação de oxidação-redução depende dos materiais das superfícies que estão em atrito. Em áreas petroquímicas, as superfícies geralmente são feitas de metais ou hidrocarbonetos.

A reação de oxidação-redução entre metais e hidrocarbonetos pode produzir uma variedade de radicais livres, incluindo:

- **Radical hidroxila (OH)**
- **Radical alquil (R)**
- **Radical carbeno (C)**

Os radicais livres formados pela reação de oxidação-redução podem iniciar reações químicas, incluindo a combustão.

A velocidade da reação de oxidação-redução depende de uma série de fatores, incluindo:

- **A natureza dos materiais:** A natureza dos materiais afetará o potencial de oxidação-redução.
- **A velocidade e a intensidade do atrito:** A velocidade e a intensidade do atrito afetarão a quantidade de elétrons que são transferidos.

A reação de oxidação-redução é um mecanismo importante para a ignição por atrito em áreas classificadas ou petroquímicas. A compreensão do processo de reação de oxidação-redução é importante para a prevenção de explosões.

Aqui estão alguns exemplos de como a reação de oxidação-redução pode causar a ignição por atrito em áreas petroquímicas:

- **Um trabalhador usa uma chave de fenda para apertar um parafuso em uma tubulação de aço. O atrito entre a chave de fenda e a tubulação pode causar a transferência de elétrons do aço para o hidrocarboneto na tubulação. Os radicais livres formados pela reação de oxidação-redução podem iniciar a combustão do hidrocarboneto.**
- **Um caminhão-tanque de hidrocarbonetos colide com outro veículo. O atrito entre os dois veículos pode causar a transferência de elétrons do metal dos veículos para o hidrocarboneto no caminhão-tanque. Os radicais livres formados pela reação de oxidação-redução podem iniciar a combustão do hidrocarboneto**

**3. Efeito Triboquímico:** O efeito triboquímico é um fenômeno químico que ocorre quando duas superfícies entram em atrito. O atrito pode causar a formação de radicais livres, que são moléculas ou átomos que têm um ou mais elétrons desemparelhados. Os radicais livres são altamente reativos e podem iniciar reações químicas, incluindo a combustão.

O efeito triboquímico é um mecanismo importante para a ignição por atrito em áreas classificadas ou petroquímicas. Em áreas petroquímicas, as superfícies geralmente são feitas de metais ou hidrocarbonetos. O atrito entre essas superfícies pode causar a formação de radicais livres, que podem iniciar a combustão de uma atmosfera explosiva.

O efeito triboquímico pode ser dividido em duas etapas:

- **Formação de radicais livres:** O atrito pode causar a quebra de moléculas, formando radicais livres.
- **Reação dos radicais livres:** Os radicais livres podem reagir com outros átomos ou moléculas, iniciando reações químicas.

A formação de radicais livres pelo efeito triboquímico pode ocorrer por uma variedade de mecanismos, incluindo:

- **Quebra térmica:** O calor gerado pelo atrito pode causar a quebra de moléculas.
- **Reação de oxidação-redução:** O atrito pode causar a transferência de elétrons entre duas superfícies, formando radicais livres.
- **Deslocalização de elétrons:** O atrito pode causar a deslocalização de elétrons dentro de uma molécula, formando radicais livres.

A velocidade da formação de radicais livres pelo efeito triboquímico depende de uma série de fatores, incluindo:

- **A natureza dos materiais:** A natureza dos materiais afetará a facilidade com que as moléculas são quebradas ou os elétrons são transferidos.
- **A velocidade e a intensidade do atrito:** A velocidade e a intensidade do atrito afetarão a quantidade de calor ou a transferência de elétrons que ocorre.

A reação dos radicais livres formados pelo efeito triboquímico pode levar à ignição de uma atmosfera explosiva. A reação dos radicais livres pode ocorrer de forma rápida e não controlada, levando a uma explosão.

#### 6.4.2. Reação em Cadeia

A reação em cadeia é uma reação química na qual os produtos da reação inicial catalisam a reação subsequente. Isso significa que os produtos da reação inicial ajudam a iniciar a próxima reação, tornando o processo mais rápido e eficiente.

No contexto da ignição por atrito, a reação em cadeia é a etapa que leva à combustão de uma atmosfera explosiva. A reação em cadeia pode ser iniciada pela reação entre um radical livre e uma molécula de combustível.

Um radical livre é uma molécula ou átomo que tem um ou mais elétrons desemparelhados. Os radicais livres são altamente reativos e podem iniciar reações químicas.

Uma molécula de combustível é uma molécula que pode ser oxidada, ou seja, pode perder elétrons.

Quando um radical livre reage com uma molécula de combustível, ocorre uma reação de oxidação-redução. A reação de oxidação-redução produz um novo radical livre e um produto da combustão.

O novo radical livre pode então reagir com outra molécula de combustível, iniciando outra reação. Esse processo continua em cadeia até que a reação seja interrompida por algum mecanismo, como a falta de combustível ou a remoção de radicais livres.

A reação em cadeia é um processo auto propagado, o que significa que não requer uma fonte externa de energia para continuar. A energia necessária para iniciar a reação em cadeia é fornecida pela energia de ativação da reação inicial.

A velocidade da reação em cadeia depende de uma série de fatores, incluindo:

**1. A concentração da Atmosfera Explosiva:** A concentração da atmosfera explosiva é a quantidade de combustível presente no ar. Atmosferas com concentrações mais altas de combustível são mais propensas a serem ignidas por atrito.

Isso ocorre porque a probabilidade de uma centelha ou faísca entrar em contato com uma atmosfera explosiva aumenta à medida que a concentração do combustível aumenta. Além disso, a quantidade de calor necessária para causar a ignição de uma atmosfera explosiva diminui à medida que a concentração do combustível aumenta.

**2. A Velocidade e a Intensidade do atrito:** A velocidade e a intensidade do atrito determinam a quantidade de calor que é gerada. O calor gerado pelo atrito é a fonte de energia que é usada para formar radicais livres.

Quanto maior a velocidade e a intensidade do atrito, maior será a quantidade de calor gerada. Isso significa que é mais provável que o atrito cause a formação de radicais livres em velocidades e intensidades mais altas.

**3. A Natureza das Superfícies em atrito:** A natureza das superfícies em atrito afetará a probabilidade de formação de radicais livres. Superfícies diferentes têm diferentes propriedades químicas, que podem afetar a facilidade com que as moléculas são quebradas ou os elétrons são transferidos.

Superfícies que são mais propensas a quebrar moléculas ou transferir elétrons são mais propensas a causar a formação de radicais livres.

**4. A Concentração de Radicais livres:** A concentração de radicais livres determina a probabilidade de uma reação entre um radical livre e uma molécula de combustível. Quanto maior a concentração de radicais livres, maior será a probabilidade de uma reação ocorrer.

A concentração de radicais livres pode ser afetada por uma variedade de fatores, incluindo a velocidade e a intensidade do atrito, a natureza das superfícies em atrito e a presença de outros gases ou vapores.

## 7. CHECKLIST PARA ELABORAÇÃO DE PROJETO E VERIFICAÇÃO DE INSTALAÇÕES

### 7.A. Fase de Projeto

#### 1. Classificação da área

- Identifique a concentração esperada de vapores e gases inflamáveis em cada área da instalação.
- Classifique cada área de acordo com a norma aplicável (e.g., NFPA 70, IEC 60079-10) como Zona 0, Zona 1 ou Zona 2.
- Documente a classificação das áreas em planos e relatórios de projeto.

#### 2. Identificação de fontes de ignição por atrito

- Analise os processos, equipamentos e atividades que ocorrem em cada área classificada.
- Identifique potenciais fontes de ignição por atrito, como:
  - Impacto entre peças metálicas.
  - Atrito entre superfícies deslizantes.
  - Rotação de peças metálicas.
  - Descarga eletrostática.
  - Equipamentos elétricos e mecânicos defeituosos.

#### 3. Avaliação do risco de ignição por atrito

- Considere os seguintes fatores para avaliar o risco de ignição por atrito:
  - Tipo de hidrocarboneto presente.
  - Concentração de hidrocarboneto na atmosfera.
  - Energia de ativação do hidrocarboneto.
  - Velocidade e intensidade do atrito.
  - Natureza das superfícies em atrito.
  - Presença de radicais livres.
  - Temperatura ambiente.
  - Presença de outras fontes de ignição.

#### 4. Seleção de medidas de controle

- Com base na avaliação de risco, determine as medidas de controle necessárias para prevenir a ignição por atrito. As medidas de controle podem incluir:
  - **Engenharia:**
    - Eliminação ou substituição de equipamentos que geram atrito.
    - Encerramento ou selagem de equipamentos para evitar vazamentos de hidrocarbonetos.

- Instalação de sistemas de ventilação para reduzir a concentração de hidrocarbonetos na atmosfera.
- Utilização de materiais e revestimentos antiestáticos.
- **Administrativas:**
  - Implementação de procedimentos de trabalho seguros.
  - Programas de treinamento para funcionários sobre o risco de ignição por atrito.
  - Manutenção preventiva de equipamentos.
  - Controle de acesso a áreas classificadas.
- **Proteção:**
  - Instalação de equipamentos elétricos e mecânicos certificados para uso em áreas classificadas.
  - Utilização de sistemas de proteção contraexplosão.

## **5. Documentação e verificação**

- Documente as medidas de controle selecionadas e os procedimentos de trabalho seguros.
- Verifique a implementação das medidas de controle de acordo com as normas e regulamentos aplicáveis.
- Realize ensaios de verificação da eficácia das medidas de controle, se necessário.

## **7.B. Fase de Operação e Manutenção**

### **1. Inspeções e manutenção**

- Realize inspeções regulares de equipamentos e instalações para identificar possíveis fontes de ignição por atrito.
- Realize manutenção preventiva de equipamentos de acordo com as recomendações do fabricante.
- Documente as inspeções e manutenções realizadas.

### **2. Procedimentos de trabalho seguros**

- Implemente e siga procedimentos de trabalho seguros para o manuseio de hidrocarbonetos.
- Forneça treinamento aos funcionários sobre os procedimentos de trabalho seguros.
- Supervise o trabalho dos funcionários para garantir o cumprimento dos procedimentos.

### **3. Controle de emergências**

- Desenvolva um plano de emergência para responder a explosões em áreas classificadas.
- Treine os funcionários sobre o plano de emergência.
- Mantenha equipamentos de combate a incêndio prontos para uso.

### **4. Auditorias e revisões**

- Realize auditorias periódicas para avaliar a eficácia do sistema de gestão de segurança.
- Revise o projeto da instalação e os procedimentos de trabalho seguros, se necessário.

### **C. Recomendações**

- Mantenha-se atualizado sobre as normas e regulamentos aplicáveis.
- Consulte especialistas em segurança de processo para obter orientação.
- Participe de programas de treinamento e workshops sobre segurança de processo.
- Compartilhe as melhores práticas com outras empresas do setor.

### **D. Referências normativas**

**Ver item 5. NORMAS E PROCEDIMENTOS**

## **8. PREVENÇÃO DE EXPLOSÕES COM IGNIÇÃO POR ATRITO**

### **Estudo detalhado sobre a prevenção de explosões por ignição por atrito em áreas petroquímicas**

#### **Introdução**

As explosões em áreas petroquímicas são um sério risco à segurança, podendo causar danos materiais, perdas humanas e graves prejuízos econômicos. Uma das principais causas de explosões em áreas petroquímicas é a ignição por atrito.

A ignição por atrito ocorre quando o calor gerado pelo atrito entre duas superfícies é suficiente para iniciar uma reação de combustão. Esse tipo de ignição pode ocorrer em uma variedade de situações, como:

- Impacto entre peças metálicas;
- Atrito entre superfícies deslizantes;
- Rotação de peças metálicas;
- Descarga eletrostática.

### **Medidas de prevenção**

A prevenção da ignição por atrito em áreas petroquímicas pode ser realizada por meio de uma variedade de medidas, incluindo:

- **Eliminação da fonte de ignição:** A fonte de ignição pode ser eliminada por meio do uso de equipamentos e materiais que não causem atrito. Por exemplo, o uso de materiais antiaderentes ou o revestimento de superfícies com materiais que reduzam o atrito podem ajudar a eliminar a fonte de ignição.
- **Isolamento da fonte de ignição:** A fonte de ignição pode ser isolada da atmosfera explosiva por meio de barreiras físicas ou dispositivos de proteção. Por exemplo, o uso de barreiras físicas, como cercas ou paredes, pode ajudar a isolar áreas onde existe o risco de ignição por atrito.
- **Redução da concentração da atmosfera explosiva:** A concentração da atmosfera explosiva pode ser reduzida por meio de ventilação ou de redução da quantidade de combustível presente. Por exemplo, a instalação de sistemas de ventilação pode ajudar a reduzir a concentração de hidrocarbonetos inflamáveis no ar.

### **Medidas de Controle**

Além das medidas de prevenção, também é importante tomar medidas de controle para reduzir o risco de ignição por atrito. Essas medidas incluem:

- **Uso de hidrocarbonetos inflamáveis com energias de ativação mais altas:** Quanto menor a energia de ativação de um hidrocarboneto inflamável, mais fácil é para o calor gerado pelo atrito quebrar as ligações químicas das moléculas e formar radicais livres. Os radicais livres são altamente reativos e podem iniciar uma reação de combustão. Portanto, o uso de hidrocarbonetos inflamáveis com energias de ativação mais altas pode ajudar a reduzir o risco de ignição por atrito.
- **Redução do atrito entre as superfícies:** O atrito pode ser reduzido por meio do uso de lubrificantes, revestimentos antiaderentes ou superfícies lisas. Os lubrificantes ajudam a reduzir o atrito entre duas superfícies, enquanto os revestimentos antiaderentes e as superfícies lisas também podem ajudar a reduzir o atrito.
- **Controle das condições ambientais:** As condições ambientais, como a temperatura e a umidade, podem afetar a energia de ativação dos hidrocarbonetos inflamáveis. Portanto, o controle das condições ambientais também pode ajudar a reduzir o risco de ignição por atrito.

## **Adição de produto químico para alterar as propriedades químicas de ignição**

Além das medidas de prevenção e controle descritas acima, também é possível utilizar uma técnica adicional para reduzir o risco de ignição por atrito: a adição de um produto químico que altere as propriedades químicas de ignição dos hidrocarbonetos inflamáveis.

Esses produtos químicos, conhecidos como inibidores de ignição, atuam de diferentes maneiras para reduzir o risco de ignição por atrito. Alguns inibidores atuam alterando a estrutura molecular dos hidrocarbonetos inflamáveis, tornando-os mais difíceis de serem ionizados pelo calor gerado pelo atrito. Outros inibidores atuam formando uma camada protetora sobre as superfícies que podem entrar em contato com hidrocarbonetos inflamáveis, o que reduz o atrito e a geração de calor.

A adição de inibidores de ignição é uma medida eficaz para reduzir o risco de ignição por atrito em áreas petroquímicas. Essa medida pode ser utilizada em conjunto com as outras medidas de prevenção e controle descritas anteriormente, para obter um efeito ainda mais eficaz.

## **Recomendações**

Além das medidas descritas neste estudo, também é importante adotar as seguintes recomendações para aumentar a segurança em áreas petroquímicas:

- **Realize inspeções regulares das instalações para identificar e corrigir possíveis fontes de ignição por atrito.**
- **Treine os funcionários sobre os riscos de ignição por atrito e as medidas de prevenção e controle.**
- **Desenvolva um plano de emergência para responder a explosões.**

Além das medidas descritas neste estudo, também é importante adotar as seguintes recomendações para aumentar a segurança em áreas petroquímicas:

- **Realize inspeções regulares das instalações para identificar e corrigir possíveis fontes de ignição por atrito.**

As inspeções regulares das instalações devem ser realizadas por pessoal qualificado e treinado. As inspeções devem incluir a verificação das condições das superfícies que podem entrar em contato com hidrocarbonetos inflamáveis, a identificação de possíveis fontes de atrito e a verificação do uso de medidas de prevenção e controle.

- **Treine os funcionários sobre os riscos de ignição por atrito e as medidas de prevenção e controle.**

O treinamento dos funcionários é essencial para garantir que eles estejam cientes dos riscos de ignição por atrito e saibam como prevenir e controlar esse tipo de ignição. O treinamento deve incluir informações sobre as causas da ignição por atrito, as medidas de prevenção e controle e os procedimentos a serem seguidos em caso de acidente.

- **Desenvolva um plano de emergência para responder a explosões.**

Um plano de emergência é essencial para garantir uma resposta rápida e eficaz a uma explosão. O plano deve incluir procedimentos para evacuação, combate a incêndios e primeiros socorros.

Adotando essas medidas, as empresas do setor petroquímico podem contribuir para a redução do risco de acidentes e para a proteção da vida e do meio ambiente.

### **Adição de inibidores de ignição**

A adição de inibidores de ignição é uma medida eficaz para reduzir o risco de ignição por atrito em áreas petroquímicas. Esses produtos químicos atuam de diferentes maneiras para reduzir o risco de ignição por atrito. Alguns inibidores atuam alterando a estrutura molecular dos hidrocarbonetos inflamáveis, tornando-os mais difíceis de serem ionizados pelo calor gerado pelo atrito. Outros inibidores atuam formando uma camada protetora sobre as superfícies que podem entrar em contato com hidrocarbonetos inflamáveis, o que reduz o atrito e a geração de calor.

Os inibidores de ignição podem ser adicionados aos hidrocarbonetos inflamáveis de diferentes maneiras, como:

- **Adição direta ao hidrocarboneto inflamável.**
- **Aplicação de um revestimento protetor sobre as superfícies que podem entrar em contato com o hidrocarboneto inflamável.**
- **Incorporação do inibidor de ignição ao material das superfícies que podem entrar em contato com o hidrocarboneto inflamável.**

A escolha da melhor maneira de adicionar o inibidor de ignição depende de fatores como o tipo de hidrocarboneto inflamável, as condições ambientais e as aplicações específicas.

### **Eficácia dos inibidores de ignição**

A eficácia dos inibidores de ignição varia de acordo com o tipo de inibidor, a concentração do inibidor e as condições ambientais. Em geral, os inibidores de ignição são eficazes para reduzir o risco de ignição por atrito em uma ampla gama de condições.

## **Aplicações**

Os inibidores de ignição podem ser utilizados em uma variedade de aplicações em áreas petroquímicas, como:

- **Linhas de transporte de hidrocarbonetos inflamáveis.**
- **Equipamentos e máquinas que podem entrar em contato com hidrocarbonetos inflamáveis.**
- **Áreas onde existe o risco de derramamento de hidrocarbonetos inflamáveis.**

**author: Elcio J. Blanco**

CEO at **Grennmark Consulting**

Consultor Sênior de ESG / EHS/Explosive Atmosphere