

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

ANA LUIZA CAPETTI MOTA

ACIDENTES ENVOLVENDO INCOMPATIBILIDADE QUÍMICA

SÃO CARLOS – SP

2023

ANA LUIZA CAPETTI MOTA

ACIDENTES ENVOLVENDO INCOMPATIBILIDADE QUÍMICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador: Prof. Dr. Elton Sitta

São Carlos

2023



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha família e amigos que nos momentos mais difíceis me incentivaram e não me deixaram desistir.

## RESUMO

A incompatibilidade química pode ser determinada a partir do momento em que distintos produtos, quando em contato um com o outro, geram algum tipo de perigo. Os perigos podem ser: emissão de gases; calor excessivo; fogo; ou até mesmo explosões. Ao se trabalhar com produtos químicos é necessário entender os riscos e as condições relacionadas a cada composto. Dessa forma, é imprescindível possuir o conhecimento acerca das reações químicas, da cinética e da termodinâmica, principalmente da entalpia de reação. Além disso, as FISPQs (Fichas de Informação sobre Segurança de Produtos Químicos) e a tabela de incompatibilidade química são de extrema importância para diminuir ao máximo a probabilidade de acidentes, seja em escala laboratorial ou industrial e, ainda, garantir um armazenamento e transporte adequado para cada substância química. Este trabalho traz o estudo de dois acidentes ocorridos devido à incompatibilidade química para exemplificar a importância das fichas de segurança no armazenamento, manuseio e transporte de produtos químicos. Os casos escolhidos foram o acidente com transporte de produtos perigosos ocorrido na cidade de Rio Claro, SP; e o acidente envolvendo descarte indevido de produtos ocorrido na cidade de Pontal, SP.

**Palavras-chave:** Incompatibilidade química; Reações químicas; Entalpia de reação.

## ABSTRACT

Chemical incompatibility can be determined from the moment that different products, in contact with each other, generate some type of danger. Dangers can be emission of gases, excessive heat, fire or even explosions. When working with chemicals, it is necessary to understand the risks and conditions related to each compound. Thus, it is essential to have knowledge about the chemical reactions, kinetics, and thermodynamics, especially the reaction enthalpy. Furthermore, the MSDS (Material Safety Data Sheet) and the chemical incompatibility table are extremely important to avoid as much as possible accidents, whether on a laboratory or industrial scale and insure adequate storage and transport for each chemical substance. This work presents the study of two accidents that occurred due to chemical incompatibility to exemplify the importance of safety data sheets in the storage, handling, and transport of chemical products. The cases chosen were the accident involving the transport of dangerous products in Rio Claro city; and the accident involving incorrect disposal of products in Pontal city.

**Key-words:** Chemical incompatibility; Chemical reactions; Enthalpy.

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1. Transporte de carga a granel com produtos de classes de risco distintas.	14
Figura 2. Tabela de incompatibilidade química.	16
Figura 3. Exemplos de pictogramas de perigo	17
Figura 4. Resultado da explosão.	24
Figura 5. Esquematização do raio de alcance da explosão.	24
Figura 6. Esquematização do raio de alcance do som da explosão.	25
Figura 7. Corrosão em cadeados causada pela névoa tóxica.	28
Figura 8. Diagrama de Pourbaix para um sistema Cl-H <sub>2</sub> O à 25 °C.	29
Figura 9. Variação das espécies de cloro de acordo com o pH.	30
Figura 10. Concentração das espécies de cloramina em relação ao pH	30
Tabela 1. Números de acidentes em relação a cada tipo de causa.	10
Tabela 2. Definições das classes e subclasses de risco dos produtos perigosos.	11

# SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2 - OBJETIVOS</b> .....	11
<b>3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	11
<b>3.1 - PRODUTOS PERIGOSOS</b> .....	11
<b>3.1.1 TRANSPORTE DE PRODUTOS PERIGOSOS</b> .....	13
<b>3.1.2 ARMAZENAMENTO E DESCARTE DE PRODUTOS</b> .....	15
<b>3.2 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS</b> .....	18
<b>3.2.1 TERMODINÂMICA</b> .....	19
<b>3.2.2 ENTALPIA</b> .....	20
<b>3.2.3 ENERGIA LIVRE DE GIBBS</b> .....	21
<b>4 - ESTUDO DE CASOS</b> .....	22
<b>4.1 - ACIDENTE ENVOLVENDO TRANSPORTE</b> .....	23
<b>4.2 - ACIDENTE ENVOLVENDO DESCARTE</b> .....	27
<b>5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	32
<b>6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	33



## 1 - INTRODUÇÃO

A indústria química é, hoje em dia, uma das que possui maior crescimento no Brasil. Segundo a Abiquim (Associação Brasileira da Indústria Química), ela consiste no terceiro maior setor do Brasil, além de ter apresentado uma demanda elevada entre os anos de 1990 e 2021, onde o crescimento médio foi de 3,1% - acima do PIB de referência, 2,2%. A indústria química no Brasil conseguiu alcançar, em 2019, a 6ª posição no ranking mundial relacionado a produtos químicos.<sup>1,2</sup>

Com o aumento da indústria, aumenta-se também os riscos, por exemplo, segundo um levantamento feito pela ABTLP (Associação Brasileira de Transporte e Logística de Produtos Perigosos), somente nas rodovias do estado de São Paulo, registrou-se 939 ocorrências de acidentes com produtos químicos em 2020, sendo uma média mensal de 78,25 acidentes, um índice considerado alto.<sup>3</sup>

Além dos acidentes rodoviários é importante destacar também os acidentes que ocorrem nas plantas industriais, que são comumente noticiados em veículos de comunicação. De acordo com Veyret<sup>4</sup>, além dos riscos no transporte, também se associam os perigos na produção e armazenamento de produtos químicos, onde esses riscos podem ser classificados em três tipos: vazamentos; incêndios e explosões.

Em uma pesquisa feita por Kidam<sup>5</sup>, a maioria das causas dos acidentes é classificada como técnicas, humanas e organizacionais, onde não há necessariamente uma separação entre elas, pois algumas causas técnicas podem envolver erros humanos, como projetos e/ou instalações equivocadas, ou seja, pode haver mais de uma causa para um acidente.<sup>6</sup>

Em um outro estudo, realizado por Campari<sup>7</sup>, também foram analisados quais eram as principais causas de acidentes e indicou-se o número de acidentes atribuídos a cada uma dessas causas. A Tabela 1 mostra a relação encontrada entre número de acidentes e suas causas.

**Tabela 1.** Números de acidentes em relação a cada tipo de causa.

<b>Tipos de causa</b>	<b>Números de acidentes</b>	<b>Porcentagem dos eventos</b>
Técnica / mecânica	145	23,1%
Desconhecida	126	20,0%
Operacional	121	19,2%
Erro humano	59	9,4%
Organizacional	57	9,0%
Externa / meio ambiente	10	1,6%
Outras causas	18	2,8%

Fonte: adaptado de Campari, 2023.<sup>5</sup>

Analisando os dados da Tabela 1, é possível notar que a principal causa dos acidentes é a técnica/mecânica, responsável por 23,1% deles. A segunda maior causa conhecida é a operacional, responsabilizada por 19,2% dos acidentes.

Este trabalho, portanto, visa fornecer informações sobre a incompatibilidade química a fim de tentar explicar os motivos que acarretaram alguns dos acidentes que ocorreram ao se manusear os produtos químicos. Dessa forma, espera-se que as informações possam ser utilizadas para evitar ocorrências futuras, tanto em meios de transporte, quanto em atividades industriais e/ou laboratoriais.

## 2 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo o estudo de casos de incompatibilidade química em acidentes que ocorreram no interior de São Paulo, onde um está relacionado ao transporte de produtos químicos e o outro ao descarte inadequado dos produtos. Em ambos os casos é discutido sobre o que levou ao acidente e quais os fatores químicos por trás de cada um.

## 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 - PRODUTOS PERIGOSOS

De acordo com a resolução ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) Nº 5.232/2016, considera-se como produto perigoso qualquer produto que possua potencial para causar danos ou apresentar risco à segurança, saúde e ao meio ambiente.

A ONU (Organização das Nações Unidas) possui uma identificação para os produtos perigosos onde eles são classificados de acordo com classes e subclasses de riscos que cada produto apresenta. Os riscos são baseados nas propriedades físico-químicas. São, ao todo, 9 classes de riscos, que estão mostradas na Tabela 2, junto com as definições de suas respectivas subclasses.

**Tabela 2** Definições das classes e subclasses de risco dos produtos perigosos.

Classe	Subclasse	Definições
1 - Explosivos	1.1	Substâncias e artigos com risco de explosão em massa;
	1.2	Substâncias e artigos com risco de projeção, mas sem risco de explosão em massa;
	1.3	Substâncias e artigos com risco de fogo e com pequeno risco de explosão ou de projeção, ou ambos, mas sem risco de explosão em massa;
	1.4	Substâncias e artigos que não apresentam risco significativo;
	1.5	Substâncias muito insensíveis, com risco de explosão em massa;
	1.6	Artigos extremamente insensíveis, sem risco de explosão em massa

2 - Gases	2.1	Gases inflamáveis: gases que a 20 °C e a pressão normal são inflamáveis;
	2.2	Gases não-inflamáveis, não tóxicos: gases asfixiantes e oxidantes, que não se enquadram em outra subclasse;
	2.3	Gases tóxicos: gases tóxicos e corrosivos que apresentam risco a saúde das pessoas;
3 - Líquidos Inflamáveis	-	Líquidos, mistura de líquidos ou líquidos que contenham sólidos em solução ou suspensão, que produzam vapor inflamável a temperatura de até 60,5 °C;
4 - Sólidos inflamáveis, substâncias sujeitas a corrosão espontânea e, substâncias que em contato com a água, emitem gases inflamáveis	4.1	Sólidos inflamáveis, substâncias autorregentes e explosivos sólidos insensibilizados;
	4.2	Substâncias sujeitas à corrosão espontânea;
	4.3	Substâncias que, em contato com a água, emitem gases inflamáveis;
5 - Substâncias oxidantes e peróxidos orgânicos	5.1	Substâncias oxidantes: podem causar ou contribuir para a combustão de outros materiais;
	5.2	Peróxidos orgânicos: poderosos agentes oxidantes, periodicamente instáveis, podendo sofrer decomposição;
6 - Substâncias tóxicas e substâncias infectantes	6.1	Substâncias tóxicas: capazes de provocar morte, lesões graves ou danos à saúde humana;
	6.2	Substâncias infectantes: podem provocar doenças infecciosas em seres humanos ou em animais;
7 - Material radioativo	-	Qualquer substância ou material que emite radiação;
8 - Substâncias corrosivas	-	Substâncias que, por ação química, causam danos severos quando em contato com tecidos vivos;
9 - Substâncias e artigos perigosos diversos	-	Substâncias que apresentam, durante o transporte, um risco que não abrange outra classe.

**Fonte:** adaptado de DER – SP<sup>8</sup>;

Além das classes e subclasses de risco dos produtos químicos, existem também os chamados números ONU, esses números consistem em um padrão internacional

publicado em 1972 pela IMCO (*Intergovernmental Maritime Consultative Organization*) para que haja a identificação imediata dos produtos químicos perigosos que estão sendo armazenados e transportados.

O número ONU, ou código ONU, consiste em um número que contém quatro dígitos e são exclusivos para cada produto. Esses números estão listados na ANTT N° 5.947/2021 e podem ser identificados através de sites do governo como, por exemplo, o da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo)<sup>9</sup>.

### **3.1.1 TRANSPORTE DE PRODUTOS PERIGOSOS**

Na literatura, há diferentes pontos de vista no que diz respeito aos produtos químicos transportados. Segundo Lieggio<sup>10</sup>, os produtos serão considerados uma carga perigosa se forem transportados de modo irregular podendo gerar acidentes, isto é, as características físico-químicas do produto não o fazem se tornar perigoso para transporte. Por outro lado, de acordo com Oliveira<sup>11</sup> e Cunha<sup>12</sup>, um produto pode ser considerado uma carga perigosa independente da forma que é transportado pois, por si só, ele já apresenta um risco para a segurança, saúde e meio ambiente.

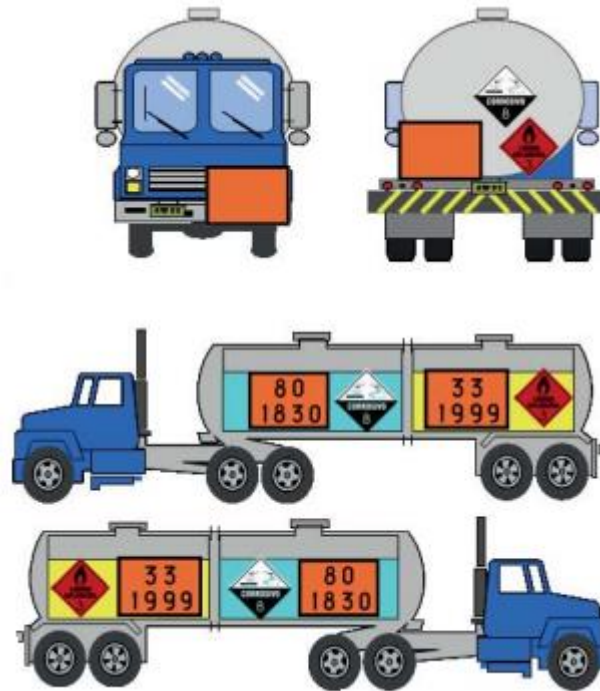
“(...) uma bombona de ácido clorídrico é sempre produto perigoso, sendo ou não transportada.”

Cunha, 2009.

A ANTT é a agência responsável por regulamentar o transporte dos produtos químicos considerados perigosos nas rodovias e ferrovias do Brasil. A regulamentação estabelecida pela agência se baseia no chamado *Orange Book* – que estabelece recomendações feitas pelo Comitê de Peritos em Transporte de Produtos Perigosos da Organização das Nações Unidas.<sup>13</sup>

Ainda, a norma ABNT NBR 7500:2017 mostra de que forma os transportes devem estar identificados de acordo com cada carga perigosa presente. Há diferentes modelos, porém, para os fins estudados neste trabalho, destaca-se o transporte de produtos a granel com produtos de diferentes classes de risco, mostrado pela Figura 1.

**Figura 1** Transporte de carga a granel com produtos de classes de risco distintas.



Fonte: ABNT, 2017.

Há também as resoluções normativas que visam padronizar as atividades realizadas pelos CRQs (Conselhos Regionais de Química), tanto no registro quanto na fiscalização do exercício profissional na área da Química.<sup>14</sup> A Resolução Normativa nº 254, de 13 de dezembro de 2013, se refere a responsabilidade técnica do manuseio de produtos químicos. No Artigo 2º estão presentes as atribuições dos profissionais da Química.

“Art. 2º – Constituem atribuições privativas dos profissionais da Química, a responsabilidade técnica de firmas individuais de profissionais e as demais firmas, coletivas ou não ou de entidades que têm como atividades a área da Química: a) prestação de serviços, produção, fabricação, comercialização, distribuição, fornecimento, transporte de produtos químicos, produtos industriais, insumos e correlatos para qualquer finalidade; b) assessoramento técnico na produção, industrialização, comercialização, distribuição ou fornecimento dos produtos e insumos

supramencionados; c) análise química e físico-química, químico-biológica, fitoquímica, bromatológica, químicotoxicológica, sanitária e legal, padronização e controle de qualidade; d) produção e tratamento prévio e complementar de produtos químicos, produtos industriais, insumos da área da Química e de resíduos resultantes destas atividades; e) tratamento, em que se empreguem reações químicas controladas e operações unitárias, de águas para fins potáveis, industriais ou para piscinas públicas e coletivas, esgoto sanitário e de rejeitos urbanos e industriais; (...)"

Diário Oficial da União, nº 216, seção 1, página 216.

Tem-se, portanto, que é de responsabilidade dos químicos todo o processo relacionado com os produtos químicos, desde a fabricação, envase, transporte e até o tratamento. Porém, todo acidente também tem como fiscalizadores órgãos governamentais, como a ANTT e a CETESB, que irão garantir também a integridade das pessoas e do meio ambiente.

### **3.1.2 ARMAZENAMENTO E DESCARTE DE PRODUTOS**

No que diz respeito ao armazenamento de produtos químicos, deve-se seguir, principalmente, as orientações presentes nas respectivas FISPQs (Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos) de cada produto, as quais devem conter necessariamente, de acordo com a norma ABNT NBR 14725-4:2009, uma seção que discuta sobre o manuseio e armazenamento apropriados. Ainda de acordo com a norma, as recomendações devem levar em consideração as propriedades físico-químicas.

Entretanto, além das FISPQs, é importante destacar a existência da tabela de incompatibilidade química. Ao identificar a incompatibilidade entre os compostos, é possível evitar acidentes como, por exemplo, incêndios, liberação de gases e até mesmo explosões. A Figura 2 mostra um exemplo de tabela de incompatibilidade química.

Figura 2 Tabela de incompatibilidade química.

			Ácidos Inorgânicos	Ácidos Orgânicos	Ácidos Oxidantes	Ácidos Orgânicos	Alcalis Inorgânicos (Bases)	Alcalis orgânicos (Bases)	Oxidantes Inorgânicos	Oxidantes Orgânicos	Tóxicos, inorgânicos	Tóxicos, orgânicos	Reativos com a água	Solventes orgânicos
		Compatibilidade por cor												
Ácidos Inorgânicos														
Ácidos Oxidantes														
Ácidos, Orgânicos														
Alcalis Inorgânicos (Bases)														
Alcalis orgânicos (Bases)														
Oxidante Inorgânico														
Oxidante Orgânicos														
Tóxicos inorgânicos														
Tóxicos orgânicos														
Reativos com a água														
Solvente orgânico														

X - Incompatible

Fonte: Gonçalves, 2012.<sup>15</sup>



Os “x” marcados na tabela indica os compostos que são incompatíveis entre si, isto é, compostos que, ao entrar em contato uns com os outros, podem gerar algum tipo de reação violenta, levando a formação de gases tóxicos ou até mesmo explosões.

Além do conhecimento de onde armazenar os produtos, deve-se destacar também o modo como cada produto é armazenado, isto é, a identificação que cada um deve conter. A existência do número ONU foi discutida na seção 2.1., porém existem outros meios de identificação com padronização internacional, onde os rótulos dos produtos devem conter: pictogramas de perigo, palavra de advertência, frases de atenção etc. A Figura 3 mostra alguns pictogramas de perigo.

**Figura 3** Exemplos de pictogramas de perigo



Fonte: adaptado de ECHA.<sup>16</sup>

Outro fator que demanda atenção em relação as compatibilidades entre os produtos químicos é o descarte correto destes produtos, de modo que, após utilizados eles ainda podem reagir entre si e gerar reações indesejadas.

Segundo o Instituto Butantã, os resíduos podem ser classificados de acordo com suas respectivas características específicas, onde deve haver manejo, transporte e descarte correto.<sup>17</sup> Pela Resolução da Diretoria Colegiada, RDC 306 da ANVISA (2004), há cinco grupos distintos.

- a) Resíduos Infectantes;
- b) Resíduos Químicos;
- c) Rejeitos Radioativos;
- d) Resíduos Comuns;
- e) Resíduos Perfurocortantes.

Em relação aos resíduos químicos, eles podem ser subdivididos em duas outras classes: perigosos e não perigosos. Os perigosos podem apresentar toxicidade, corrosão, inflamabilidade e, inclusive, reatividade, enquanto os não perigosos podem se enquadrar também como “resíduos comuns”, não apresentando riscos.<sup>17</sup>

Para este trabalho, será discutido sobre o descarte de resíduos químicos perigosos. Ainda de acordo com o Instituto Butantã, eles devem ser segregados de acordo com as informações das FISPQs e de suas compatibilidades. Dessa forma, a tabela de incompatibilidade química deve ser considerada, evitando a qualquer custo misturar compostos que reajam entre si.<sup>18</sup>

Ainda abordando o tema de tratamento e descarte de produtos químicos, é importante destacar que a UFSCar (Universidade Federal de São Carlos) se dispõe de uma secretaria que atua relacionada diretamente ao âmbito ambiental. A SGAS, Secretaria Geral de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, possui uma série de objetivos que visam o respeito ao meio ambiente<sup>19</sup>. Além disso, eles disponibilizam informações sobre os resíduos químicos, como segregá-los, em que embalagens armazenar e também o tratamento que deve ser realizado. É possível, inclusive, consultar uma tabela de incompatibilidade química de algumas substâncias que podem reagir violentamente entre si.<sup>20</sup>

### **3.2 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS**

A físico-química é uma área de estudo que analisa os princípios físicos envolvidos nos sistemas químicos, levando em consideração as propriedades e os comportamentos de cada sistema.<sup>21</sup> Além disso, a físico-química pode ser dividida em dois distintos pontos de vista: microscópico e macroscópico. A parte microscópica de estudo envolve os conceitos sobre moléculas, enquanto o macroscópico envolve as propriedades da matéria em uma larga escala, não necessariamente focando nas moléculas.

O ponto de vista macroscópico da físico-química será discutido neste trabalho, mais especificamente a termodinâmica e, conseqüentemente, a entalpia de reação.

### 3.2.1 TERMODINÂMICA QUÍMICA

A termodinâmica é uma área da físico-química que estuda as relações estabelecidas entre calor, temperatura, energia, trabalho e quais são as mudanças eles provocam em um sistema químico.<sup>22</sup>

O sistema químico é a parte macroscópica do estudo da termodinâmica e as partes que conseguem interagir com esse sistema são as chamadas vizinhanças. As interações entre sistema e vizinhança podem se dar através de três maneiras: sistema aberto, sistema fechado e sistema isolado.<sup>23</sup>

- I. Sistema aberto: há transferência de matéria e energia entre o sistema e vizinhança;
- II. Sistema fechado: não há nenhuma transferência de matéria entre o sistema e a vizinhança, porém há transferência de energia;
- III. Sistema isolado: o sistema não interage de nenhuma forma com seus arredores, não havendo transferência nem de matéria e nem de energia.

É importante destacar também as propriedades físicas na termodinâmica. A principal delas é o conceito de trabalho, que corresponde a uma força associada a um deslocamento, sendo considerado uma forma de transferência de energia. Entretanto, há situações em que a energia pode ser modificada mesmo sem a realização de um trabalho.<sup>24</sup>

Um exemplo da modificação da energia interna do sistema independente do trabalho é quando há uma alteração da temperatura entre o sistema e a vizinhança. Uma vez que essa alteração ocorre, diz-se que a energia foi transferida como calor. Se a energia transferida foi liberada, tem-se um processo exotérmico (como, por exemplo, as reações de combustão) e a temperatura do sistema aumenta, entretanto, se a energia transferida foi absorvida, tem-se um processo endotérmico e, conseqüentemente, uma diminuição na temperatura.<sup>24</sup>

Essa energia transferida na forma de calor, seja em um processo endo ou exotérmico, quando em pressão constante, recebe o nome de entalpia e será abordado a seguir.

### 3.2.2 ENTALPIA

A entalpia,  $H$ , de um sistema termodinâmico é definida por meio da energia interna ( $U$ ), pressão ( $p$ ) e volume ( $V$ ) e pode ser descrita de acordo com a equação 1.<sup>25</sup>

$$H = U + pV \quad (1)$$

onde  $H$  tem unidade de energia.

Se, à pressão ou volume constantes, a temperatura é elevada, a entalpia também aumenta, o fator que estabelece uma relação entre esses acontecimentos é chamado de capacidade calorífica a pressão constante ( $C_p$ ) – que é análogo a capacidade calorífica a volume constante ( $C_v$ ).<sup>26</sup> A relação entre a entalpia e a capacidade calorífica é mostrada na equação 2.

$$dH = C_p dT \quad (\text{a pressão constante}) \quad (2)$$

Se a capacidade calorífica permanecer constante, é possível reescrever a equação 2 na forma da equação 3.

$$\Delta H = C_p \Delta T \quad (\text{a pressão constante}) \quad (3)$$

A variação de entalpia de uma determinada reação química pode ser calculada por meio das entalpias padrão de formação,  $\Delta_f H^\circ$  das espécies envolvidas na reação. A entalpia padrão de formação corresponde a formação de um composto a partir de outros nos seus estados mais estáveis.<sup>27</sup> A equação utilizada para calcular a entalpia e formação padrão está mostrada em 4.

$$\Delta_r H^\circ = \sum_{\text{PRODUTOS}} v \Delta_f H^\circ - \sum_{\text{REAGENTES}} v \Delta_f H^\circ \quad (4)$$

onde:  $v$  = coeficiente estequiométrico;

Analisando quantitativamente a entalpia das reações e sabendo que elas se relacionam com as energias do sistema, pode-se concluir que:<sup>28</sup>

- a.  $\Delta H < 0$ , reação é exotérmica, isto é, libera energia na forma de calor;
- b.  $\Delta H > 0$ , reação é endotérmica, isto é, absorve energia na forma de calor;

### 3.2.3 ENERGIA DE GIBBS

Apenas o conhecimento da entalpia de uma reação não é suficiente para prever se um processo ocorrerá de forma espontânea, para tanto, é necessário o conhecimento de um parâmetro extremo, isto é, um parâmetro que tenha seu valor tendendo a um mínimo ou a um máximo enquanto a reação ocorrer espontaneamente. A correlação entre um parâmetro extremo e a espontaneidade de um processo depende das condições nas quais o processo ocorre, por exemplo, são exemplos de parâmetros extremos: maximização da entropia (para sistemas isolados); minimização da energia livre de Helmholtz (para processos ocorrendo à temperatura e volume constantes); e a minimização da energia livre de Gibbs (para processos ocorrendo à temperatura e pressão constantes). Todos esses parâmetros são funções de estado.<sup>29</sup> Um processo é considerado espontâneo quando não necessita de energia externa para ocorrer, ele pode ser rápido ou lento, endotérmico ou exotérmico.<sup>30</sup>

Pode-se definir a energia de Gibbs ( $G$ ) em função da entalpia ( $H$ ), temperatura ( $T$ ) e entropia ( $S$ ), como mostrado na equação 5.

$$G = H - TS \quad (5)$$

Se  $G$  diminuir conforme a reação ocorre, então há tendência da transformação de reagentes em produtos; se  $G$  aumentar, a reação inversa ocorre, isto é, a reação tende para os reagentes, não formando produtos.<sup>31</sup> Dessa forma, é possível constatar que:

- a.  $\Delta G < 0$ : processo exergônico, reação espontânea para formação de produtos;
- b.  $\Delta G > 0$ : processo endergônico, reação tende para a formação de reagentes, não seguindo o sentido direto;
- c.  $\Delta G = 0$ : o sistema se encontra em equilíbrio químico.

A variação da energia de Gibbs também está diretamente relacionada com o potencial padrão da célula eletroquímica, quando o processo de interesse envolve reações de óxido-redução. A relação entre eles é expressa pela equação 6, sendo a energia de Gibbs dada pelo produto do número de mols ( $n$ ) da constante de Faraday ( $F$ ) e do potencial padrão da célula eletroquímica ( $E_{cél}^0$ ).<sup>32</sup>

$$\Delta G = -nFE_{cél}^o \quad (6)$$

Finalmente, como já mencionado, a energia de Gibbs fornece informações sobre o sentido espontâneo dos processos, mas para conhecer a velocidade com que os processos ocorrem demanda um estudo cinético. A velocidade com a qual uma reação química ocorre depende, quase sempre, da concentração dos reagentes. Para um processo em que B e C são reagentes, pode-se descrever a velocidade desde processo por meio da equação 7, sendo  $v$  a velocidade da reação,  $k_r$  a constante de velocidade e  $\beta$  e  $\gamma$  as ordens parciais, que são os expoentes das concentrações do reagente B e C, representados por [B] e [C], respectivamente.<sup>33</sup>

$$v = k_r[B]^\beta[C]^\gamma \quad (7)$$

A dependência da velocidade da reação com a temperatura está relacionada com a dependência da constante de velocidade com a temperatura, isto é,  $k_r \rightarrow k_r(T)$ . Esta dependência pode ser quantificada por meio da equação de Arrhenius (8), onde a constante de velocidade é dada por um fator pré-exponencial multiplicado pelo exponencial da energia de ativação ( $E_a$ ) dividido por  $RT$ . Assim, à medida que a temperatura aumenta, a constante de velocidade aproxima-se do fator pré-exponencial.<sup>34</sup>

$$k_r = Ae^{-E_a/RT} \quad (8)$$

A dependência exponencial de  $k_r$  com a temperatura faz com que a velocidade da reação aumente muito quando  $E_a$  é positivo (como é para a maior parte das reações), assim, chega-se à conclusão de que quando um processo é exotérmico, a energia liberada na forma de calor aumenta a temperatura do meio reacional, fazendo com que a velocidade do processo aumente, gerando a liberação de mais calor. Este processo de retroalimentação é responsável pela chamada explosão térmica.

Dessa forma, conhecer a energia de Gibbs indica qual a direção de uma reação, à temperatura e pressão constante, e a variação de entropia serve de guia para estimar a ocorrência de uma explosão térmica durante a reação.

## **4 - ESTUDO DE CASOS**

Neste trabalho serão feitos dois estudos de caso. Ambos os estudos foram retirados de acidentes que ocorreram no estado de São Paulo e noticiados em veículos de informação.

O primeiro caso a ser analisado é o envolvendo um transporte de produtos químicos, ocasionando uma explosão.<sup>35</sup> Já o segundo caso é sobre o descarte inadequado de produtos, que gerou a formação de gases tóxicos.<sup>36</sup>

### **4.1 - ACIDENTE ENVOLVENDO TRANSPORTE**

O acidente a ser discutido neste tópico ocorreu em 30 de junho de 2021, na cidade de Rio Claro, interior de São Paulo, e envolve o transporte de dois produtos químicos, peróxido de hidrogênio e ácido fórmico.

O caminhão, que estava estacionado em um posto de combustível na rodovia Washington Luís (SP-310), teve um princípio de incêndio que acabou resultando em uma explosão e deixou mortos, feridos e, segundo testemunhas, uma fumaça de cheiro forte.<sup>37</sup>

O caso foi noticiado por diversos telejornais de diferentes redes de televisão, como Globo, TV Cultura, Record etc. e está em sites de notícias, como G1, R7, IstoÉ e Uol. A proporção midiática foi devido a força da explosão, que acabou levando a um óbito e 22 feridos. A Figura 4 mostra uma foto do local após o acidente.

**Figura 4** Resultado da explosão.



Fonte: G1 (<https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2021/07/02/caminhao-que-explodiu-em-posto-de-rio-claro-transportava-agua-oxigenada-e-acido-formico.ghtml>, acessado em 23 de junho de 2023)

A explosão teve alcance de um raio de 2,5 km e o barulho da explosão pôde ser ouvido em um raio de até 15 km do local, conforme mostrado pelas Figura 5 e Figura 6.

**Figura 5** Esquemática do raio de alcance da explosão.



Fonte: G1 (<https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2021/06/30/fortes-exploesoes-sao-registradas-em-posto-de-combustivel-em-rio-claro.ghtml>, acessado em 25 de junho de 2023)



**Figura 6** Esquematização do raio de alcance do som da explosão.

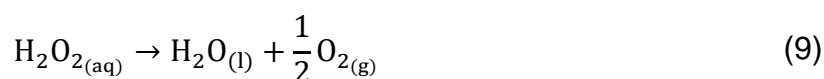


Fonte: G1 (<https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2021/06/30/fortes-explosoes-sao-registradas-em-posto-de-combustivel-em-rio-claro.ghtml>, acessado em 25 de junho de 2023)

Os fatores que levaram ao acidente não foram estabelecidos, porém testemunhas afirmam que houve um princípio de incêndio no caminhão que foi o ponto de partida para o acidente e, com isso, alguns pontos podem ser abordados para o entendimento do que pode ter ocorrido.

Ambos os compostos, à temperatura ambiente, são estáveis. Entretanto, se entrarem em contato com alguma fonte de calor – ou entre si – haverá chance de explosão.

O peróxido de hidrogênio, dependendo das condições, pode-se decompor em gás oxigênio e água, como mostrado na equação 9.



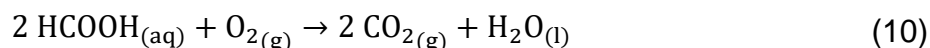
A entalpia desta reação é de  $\Delta H = -94,50 \text{ kJ/mol}^{38}$  e, portanto, trata-se de uma reação exotérmica.

Tanto o peróxido de hidrogênio quanto o gás oxigênio formado, ao entrar em contato com fonte de calor, reagem em um processo exotérmico, ou seja, liberam calor. Ao liberar calor em um meio que já está em um princípio de incêndio, a situação é agravada podendo gerar, inclusive, uma explosão.

O ácido fórmico, por sua vez, é um líquido de subclasse inflamável e, quando em contato com fonte de calor, pode formar reações explosivas com o ar e, além disso, se houver incêndios, há a formação de gases também inflamáveis e vapores

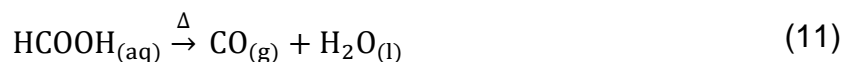
nocivos.<sup>39</sup> Além disso, possui um forte odor característico, que possivelmente corresponde ao cheiro forte sentido pelas pessoas próximas ao local.

A equação que descreve a reação de decomposição oxidativa do ácido fórmico é mostrada na equação 10.<sup>40</sup>



A reação descrita possui uma variação da energia livre de Gibbs de  $\Delta G = -298,3 \text{ kJ}$  à  $298 \text{ K}^{41}$  e uma entalpia de  $\Delta H = 31,2 \text{ kJ/mol}^{42}$ , dessa forma, é espontânea e endotérmica. Entretanto, cineticamente, a reação é lenta e só ocorre quando em contato com catalisadores.

No caso do acidente, como houve um princípio de incêndio, o calor que emanou do caminhão pode ter levado também a uma decomposição térmica do ácido fórmico, como mostrado na equação 11.

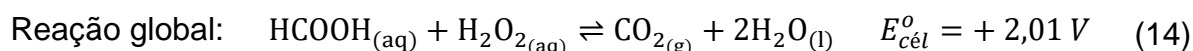
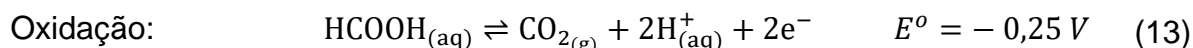
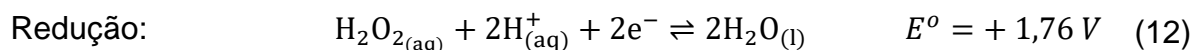


A entalpia desta reação é de  $\Delta H = -85 \text{ kJ/mol}$  e a energia livre de Gibbs é de  $\Delta G = -23 \text{ kJ/mol}$  a  $433 \text{ K}^{43}$ , indicando que a reação é exotérmica e espontânea.

Dessa forma, analisando as equações e as informações, todas as condições relatadas são contribuintes para que a explosão ocorresse. O peróxido de hidrogênio, o ácido fórmico, o monóxido e o dióxido de carbono, quando em contato com fonte de calor, levam a explosão e o mesmo ocorre com o gás oxigênio, se em contato com o combustível.

Ainda, de acordo com a FISPQ dos produtos<sup>39,44</sup>, eles são incompatíveis e levam à reações perigosas quando em contato um com o outro. Por outro lado, nada é descrito sobre eles não poderem ser transportados no mesmo caminhão quando segregados corretamente, pois acredita-se que uma vez armazenados de forma segura a chance de acidentes é mínima.

Além das reações distintas de cada composto, tem-se que a reação entre o peróxido de hidrogênio e o ácido fórmico é dada por uma reação de oxirredução, onde as equações e os potenciais de redução estão descritos nas equações 12, 13 e 14.



Com o potencial da reação global é possível calcular a variação da energia de Gibbs, utilizando a equação 6 mostrada em 3.2.3. Dessa forma, tem-se que  $\Delta G$  para a reação redox entre o peróxido de hidrogênio e o ácido fórmico é de  $-387,87 \text{ kJ/mol}$ , ou seja, a reação é termodinamicamente espontânea.

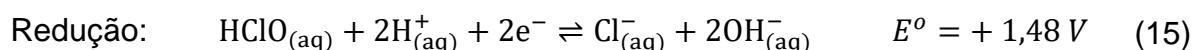
## 4.2 - ACIDENTE ENVOLVENDO DESCARTE

O segundo acidente a ser discutido ocorreu em 04 de outubro de 2022 e se refere a formação de uma névoa tóxica na cidade de Pontal, interior de São Paulo, que levou aproximadamente 1000 pessoas deixarem suas casas, onde muitas delas passaram mal e tiveram que ser socorridas; animais também passaram mal. A névoa teve sua origem em um sistema de esgoto de uma empresa localizada na cidade.

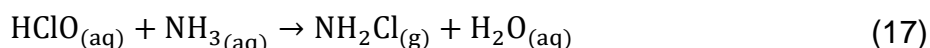
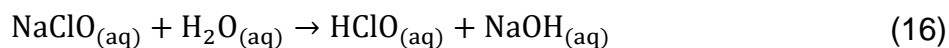
O acidente foi noticiado por vários veículos de comunicação, como G1, Folha, ACidadeOn. O caso teve grande repercussão e foi tema de estudo realizado pela USP (Universidade de São Paulo) para tentar identificar o composto responsável pela névoa tóxica.

Nas análises realizadas pela USP, evidenciou-se que houve a formação do composto cloramina, que originou-se da reação entre hipoclorito de sódio e amônia, ambos descartados de forma inadequada no sistema de esgoto. Ambos os compostos foram descartados pela mesma empresa, que trabalham com esses respectivos produtos. A obstrução da rede de esgoto pode ter sido o fator que levou a reação entre eles, ocasionando na névoa tóxica.

O hipoclorito é um forte oxidante, como mostrado pela equação 15 e, quando em contato com compostos nitrogenados - por exemplo, amônia - forma as cloraminas que são tóxicas e reativas.<sup>45</sup>



O hipoclorito, quando em contato com a água, se dissocia em ácido hipocloroso e hidróxido de sódio. O ácido hipocloroso, por sua vez, é instável e reage com a amônia, levando a formação de cloramina ( $NH_2Cl$ ). As reações que descrevem esses processos estão mostradas nas equações 16 e 17.



A cloramina, quando em contato direto com a pele ou olhos, causa queimaduras de pele severas e danos oculares. Já quando inalada causa infecções, irritação respiratória e danos aos órgãos quando em alta exposição.<sup>46</sup>

A variação da entalpia de formação da cloramina é de  $\Delta H = -120,1$  kJ/mol e, se for considerada uma ligação de hidrogênio mais forte entre a amônia e o ácido hipocloroso a variação pode chegar até  $\Delta H = -153,5$  kJ/mol.<sup>47</sup> Assim, a reação de formação das cloraminas são substancialmente exotérmicas e também são exergônicas, isto é, ocorrem de forma espontânea.<sup>48</sup>

Além da névoa tóxica, constatou-se que houve a corrosão de chaves, cadeados e até mesmo moedas, como mostrado na Figura 7.

**Figura 7** Corrosão em cadeados causada pela névoa tóxica.

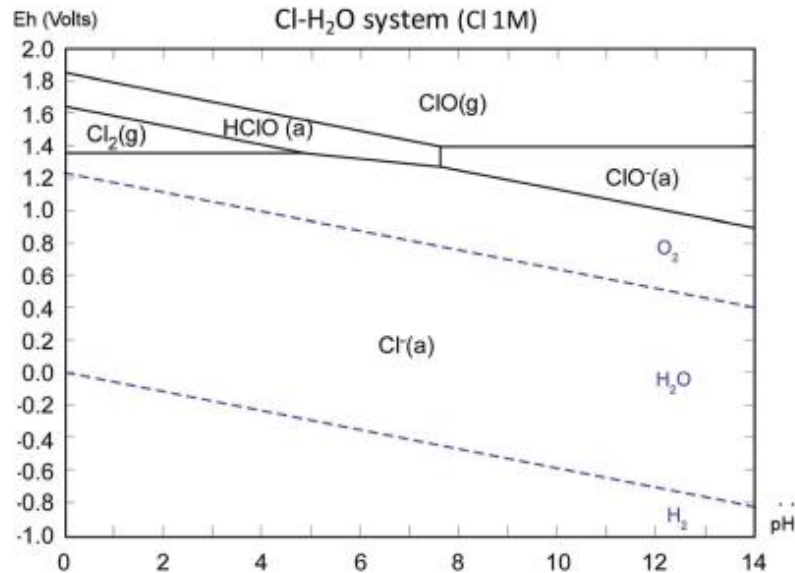


Fonte: Naiana Kennedy/CBN Ribeirão

Embora o hipoclorito de sódio seja usado no dia a dia, seja em materiais de limpeza, tratamento de água e piscinas, não é comum observar a corrosão abrasiva de metais. O fato da corrosão ter ocorrido é outro indicativo que havia a presença de cloramina na atmosfera, que além de tóxica também é considerada corrosiva.<sup>49</sup>

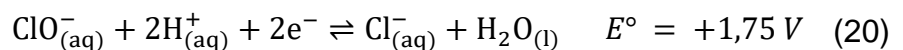
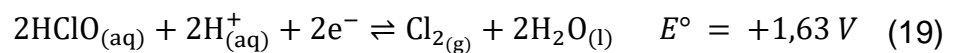
O estudo do diagrama de Pourbaix auxilia a identificar a estabilidade termodinâmica dos compostos de acordo com seu potencial e pH.<sup>50</sup> O diagrama para um sistema Cl-H<sub>2</sub>O está mostrado na Figura 8.

**Figura 8** Diagrama de Pourbaix para um sistema Cl-H<sub>2</sub>O à 25 °C.



Fonte: Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2015.<sup>51</sup>

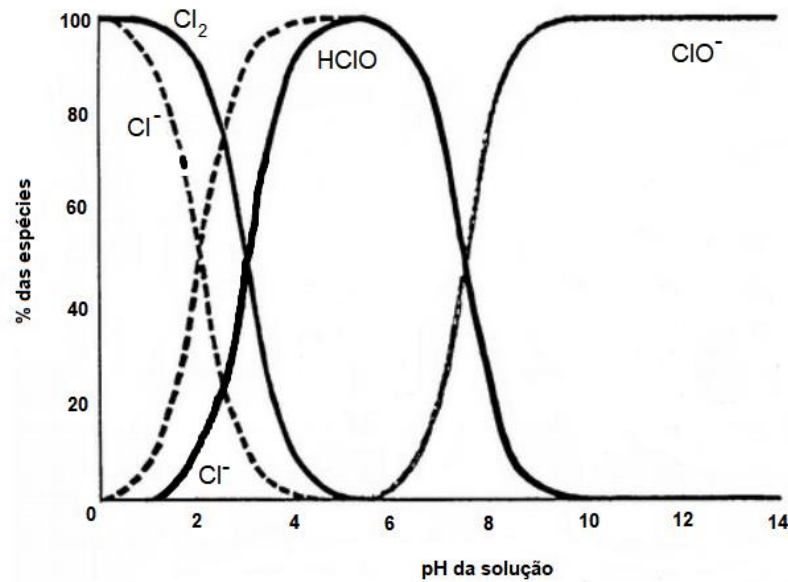
Analisando o diagrama, nota-se que, dependendo do pH, poderá haver a presença de HOCl ou ClO<sup>-</sup> majoritariamente, bem como Cl<sub>2</sub> ou, ainda, Cl<sup>-</sup>. As equações 18, 19 e 20 descrevem alguns dos possíveis equilíbrios que podem ocorrer entre as espécies de cloro.



De acordo com a resolução nº 430/2011 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) o pH da rede de esgoto deve permanecer entre 5 e 9 e, considerando a presença de amônia na rede, é possível considerar que o pH do meio em que o hipoclorito e a amônia foram descartados é alcalino, tendendo para a existência de

HOCl e, majoritariamente, de  $\text{ClO}^-$ . Essa variação das espécies de cloro também é mostrada pela Figura 9.

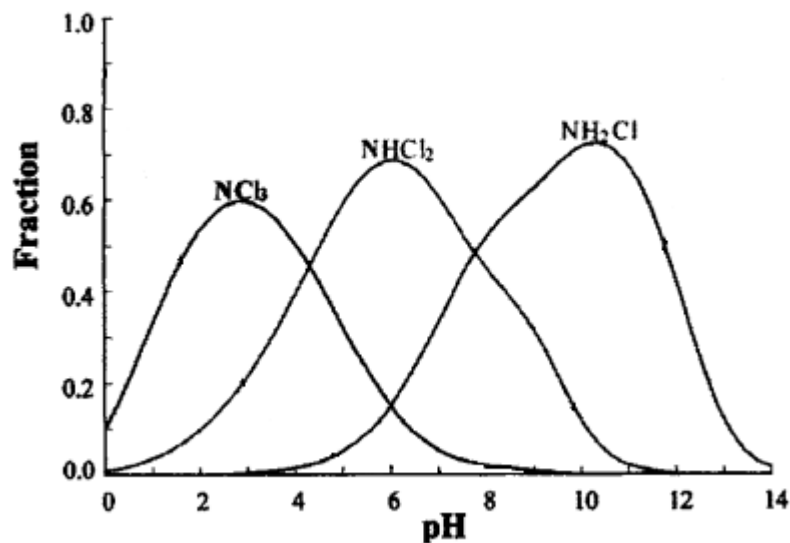
**Figura 9** Variação das espécies de cloro de acordo com o pH.



Fonte: adaptado de IC Controls ([https://iccontrols.com/wp-content/uploads/art-8-2\\_chlorine\\_theory\\_and\\_measurement.pdf](https://iccontrols.com/wp-content/uploads/art-8-2_chlorine_theory_and_measurement.pdf), acessado em 03 de julho de 2023)

Como já visto pela equação 17, o HClO reage com a amônia e forma a cloramina. Assim como o cloro, as espécies de cloramina também variam de acordo com o pH. A Figura 10 mostra a concentração das espécies em relação ao pH.

**Figura 10** Concentração das espécies de cloramina em relação ao pH



Fonte: adaptado de *Production and Analysis of Chloramines*.<sup>52</sup>

Pela Figura 10 é notável que em faixas de pH mais alcalinas prevalece a presença da monocloramina, ou cloramina, confirmando que este foi o composto responsável pela névoa e pela corrosão observadas.

## 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou pontos gerais e químicos sobre acidentes envolvendo incompatibilidade química. Foram discutidas tipos de transporte, armazenagem, cuidados com identificação e manuseio. Ainda, foram abordados temas químicos, como a termodinâmica química, entalpia de reação, além de algumas equações e reações químicas.

Os estudos de caso apresentados mostraram dois tipos comuns de acidentes com produtos químicos: envolvendo o transporte de produtos incompatíveis e o descarte inadequado de produtos. Em ambos os casos foi discutido a incompatibilidade entre os compostos e evidenciadas, inclusive, pelas respectivas FISPQs.

Ademais, embora o tema de acidentes químicos seja recorrente, nota-se certos obstáculos ao encontrar algumas informações. Por exemplo, muito se fala sobre a possível ocorrência de reações explosivas entre compostos porém, nas literaturas, é muito difícil encontrar sobre a descrição de tais reações e, dessa forma, precisaria de um estudo mais prático das reações, como a realização de testes controlados em escala laboratorial.

Por fim, as pesquisas realizadas neste trabalho demonstraram que os acidentes, apesar de sempre ocorrerem, podem e devem ter uma maior atenção para que haja uma diminuição em seu número. Além dos treinamentos e cursos de manuseio dos produtos, a contínua pesquisa sobre as incompatibilidades e também uma implementação de simulações possivelmente fariam com que o perigo de estar sempre manuseando um produto químico ficasse mais evidente, o que provavelmente levaria a uma maior atenção e menor risco de tragédias – servindo para uma maior segurança das pessoas e meio ambiente.



## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Missões para a Indústria Química, 2022-2023. Abiquim. Disponível em: <<https://www.enaiq.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Folder-Missoes-Quimica.pdf>>. Acesso em 14 jun, 2023;
2. O desempenho da Industria Quimica Brasileira, 2022. Abiquim. Disponível em: <[https://www.enaiq.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Relatorio\\_2022.pdf](https://www.enaiq.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Relatorio_2022.pdf)>. Acesso em 14 jun, 2023;
3. Ocorrências no Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos no Estado de São Paulo, 2020. Comissão de Estudos e Prevenção de Acidentes no Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.abtlp.org.br/wp-content/uploads/2022/05/Gr%C3%A1ficos-ABTLP-finalizado-2020-1.pdf>>. Acesso em 15 jun, 2023;
4. VEYRET, Yvette. Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente. São Paulo, SP: Editora Contexto, 2013. P 70;
5. KIDAM, K; et al; *Analysis of equipment failures as contributors to chemical process accidents*. Process Safety and Environmental Protection. v 91, 2013. p. 61-78,
6. NIVOLIANITOU, Z.; KONSTANDINIDOU, M.; MICHALIS, C.; Statistical analysis of major accidents in petrochemical industry notified to the major accident reporting system (MARS). Journal of Hazardous Material A137, 2006. p. 1–7.
7. CAMPARI, A; et al; Lessons learned from HIAD 2.0: Inspection and maintenance to avoid hydrogen-induced material failures. Computers & Chemical Engineering. Vol. 173, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135423000686#sec0007>>. Acessado em 28 ago, 2023; DOI: 10.1016/j.compchemeng.2023.108199;
8. Manual de Produtos Perigosos. Departamento de Estrada de Rodagens, Secretaria dos Transportes. Disponível em: <<http://200.144.30.103/siipp/arquivos/manuais/Manual%20de%20Produtos%20Perigosos.pdf>> Acesso em 16 jun, 2023; p.23-25

9. Consulta pelo número ONU. Disponível em:  [<https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/produto\\_consulta\\_onu.asp>](https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/produto_consulta_onu.asp). Acesso em 16 jun, 2023;
10. LIEGGIO JÚNIOR, M.; Transporte rodoviário de produtos perigosos: proposta de metodologia para escolha de empresas de transporte com enfoque em gerenciamento de riscos. 2008. 192 f. Dissertação (Mestrado em Transportes)- Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
11. DE OLIVEIRA, K. A.; Análise de riscos no transporte de produtos perigosos. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2016.
12. CUNHA, W. de C.; Análise do Transporte de Produtos Perigosos no Brasil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.
13. Produtos Perigosos. Disponível em:  [<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/cargas/produtos-perigosos>](https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/cargas/produtos-perigosos). Acesso em 18 jun, 2023;
14. Resoluções Normativas. Disponível em:  [<https://crqsp.org.br/resolucoes-normativas/>](https://crqsp.org.br/resolucoes-normativas/). Acesso em 17 jun, 2023;
15. GONÇALVES, S. A.; Conselho Regional de Química. Minicurso: Gestão de produtos químicos Disponível em:  [<https://www.crq4.org.br/sms/files/file/gest%C3%A3o\\_produtos\\_quimicos\\_2012\\_cor\(1\).pdf>](https://www.crq4.org.br/sms/files/file/gest%C3%A3o_produtos_quimicos_2012_cor(1).pdf). Acesso em 18 jun, 2023;
16. Pictogramas CRE. Disponível em:  [<https://echa.europa.eu/pt/regulations/clp/clp-pictograms>](https://echa.europa.eu/pt/regulations/clp/clp-pictograms). Acesso em 19 jun, 2023;
17. Guia Prático de Descarte de Resíduos. Instituto Butantã, 2014. Disponível em:  [<https://gestaoderesiduos.ufsc.br/files/2016/02/Butantan\\_guia\\_pratico.pdf>](https://gestaoderesiduos.ufsc.br/files/2016/02/Butantan_guia_pratico.pdf). Acesso em 19 jun, 2023. p. 9-10;
18. Guia Prático de Descarte de Resíduos. Instituto Butantã, 2014. Disponível em:  [<https://gestaoderesiduos.ufsc.br/files/2016/02/Butantan\\_guia\\_pratico.pdf>](https://gestaoderesiduos.ufsc.br/files/2016/02/Butantan_guia_pratico.pdf). Acesso em 19 jun, 2023. p. 21;
19. A SGAS. Disponível em:  [<https://www.sgas.ufscar.br/sobre>](https://www.sgas.ufscar.br/sobre). Acesso em 20 jun, 2023;

20. Tabela de Incompatibilidade Química. Disponível em: <<https://www.sgas.ufscar.br/degr/residuos/residuos-quimicos/tabela-de-incompatibilidade-quimica>>. Acesso em 20 jun, 2023;
21. DA SILVA, R. C. B.; Físico-Química. Disponível em: <<https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/433483/2/Livro%20Fisico%20-Quimica%20I.pdf>>. Acesso em 20 jun, 2023; p. 37;
22. LEVINE, I.; Physical Chemistry. Editora: The McGraw-Hill, Nova Iorque. 6ª ed, 2009. p. 1.
23. LEVINE, I.; Physical Chemistry. Editora: The McGraw-Hill, Nova Iorque. 6ª ed, 2009. p. 3-4.
24. ATKINS, P.; DE PAULA, J.; Físico-Química. Editora LTC: Rio de Janeiro. vol. 1, 9ª ed, 2003. p. 36-37;
25. LEVINE, I.; Physical Chemistry. Editora: The McGraw-Hill, Nova Iorque. 6ª ed, 2009. p. 52.
26. ATKINS, P.; DE PAULA, J.; Físico-Química. Editora LTC: Rio de Janeiro. vol. 1, 9ª ed, 2003. p. 49;
27. ATKINS, P.; DE PAULA, J.; Físico-Química. Editora LTC: Rio de Janeiro. vol. 1, 9ª ed, 2003. p. 59-60;
28. Bond enthalpies. Disponível em: <<https://www.khanacademy.org/science/chemistry/thermodynamics-chemistry/enthalpy-chemistry-sal/a/bond-enthalpy-and-enthalpy-of-reaction>>. Acesso em 22 jun, 2023;
29. ATKINS, P.; DE PAULA, J.; Físico-Química. Editora LTC: Rio de Janeiro. vol. 1, 9ª ed, 2003. p. 78.
30. Espontaneidade e energia livre de Gibbs. Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/chemistry/thermodynamics-chemistry/gibbs-free-energy/v/gibbs-free-energy-and-spontaneity>>. Acesso em 22 jun, 2023;
31. ATKINS, P.; DE PAULA, J.; Físico-Química. Editora LTC: Rio de Janeiro. vol. 1, 9ª ed, 2003. p. 97;.
32. BERGAMASKI, K.; Equilíbrio Químico. Disponível em: <[https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/16294008042013Fisico-Quimica\\_II\\_Aula\\_7.pdf](https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/16294008042013Fisico-Quimica_II_Aula_7.pdf)>. Acesso em 23 jun, 2023;

33. ATKINS, P.; DE PAULA, J.; Physical Chemistry. Editora: *W. H. Freeman and Company*: Nova Iorque. 9ª ed, 2010. p. 788-789;.
34. ATKINS, P.; DE PAULA, J.; Physical Chemistry. Editora: *W. H. Freeman and Company*: Nova Iorque. 9ª ed, 2010. p. 799-802;.
35. Caminhão que explodiu em posto de Rio Claro transportava ácido fórmico e água oxigenada. G1. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2021/07/02/caminhao-que-explodiu-em-posto-de-rio-claro-transportava-agua-oxigenada-e-acido-formico.ghtml>>. Acesso em 23 jun, 2023;
36. Cetesb multa indústria de produtos químicos em Pontal, SP, após névoa tóxica. G1. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/noticia/2023/03/15/cetesb-multa-industria-de-produtos-quimicos-em-pontal-sp-apos-nevoa-toxica.ghtml>>. Acesso em 23 jun, 2023;
37. VÍDEOS: Caminhão explode em posto de combustíveis em Rio Claro e deixa 22 feridos. G1. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2021/06/30/fortes-explosoes-sao-registradas-em-posto-de-combustivel-em-rio-claro.ghtml>>. Acesso em 25 jun, 2023;
38. BRAATHEN, P. C.; et al; Entalpia de Decomposição do Peróxido de Hidrogênio. Química Nova Na Escola. vol 29, agosto 2008. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc29/10-EEQ-6106.pdf>>. Acesso em 25 jun, 2023;
39. Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/sds/mm/1.00264>>. Acesso em 25 jun, 2023;
40. BJERRE, A. B.; Thermal Decomposition of Dilute Aqueous Formic Acid Solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1992, 31, 1574-1577. DOI: 10.1021/ie00006a022.
41. BIDEAU, M.; et al.; Photocatalysis of formic acid oxidation by oxygen in an aqueous medium. *Journal of Photochemistry*. vol. 14, issue 4, 1980. p. 291-302; DOI: [https://doi.org/10.1016/0047-2670\(80\)85101-X](https://doi.org/10.1016/0047-2670(80)85101-X).
42. SARAIVA, A. P. K; Produção de hidrogênio via decomposição de ácido fórmico empregando carbeto de molibdênio suportado em carvão ativado. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2014.

43. KWON, S.; LIN, T. C.; IGLESIA, E.; Elementary steps and site requirements in formic acid dehydration reactions on anatase and rutile TiO<sub>2</sub> surfaces. *Journal of Catalysis*, v. 383, 2020. p. 60-76. ISSN 0021-9517, <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2019.12.043>;
44. Ficha de Informação de Produto Químico. Peróxido de Hidrogênio. Disponível em:  
<[https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha\\_completa1.asp?consulta=PER%20DE%20HIDROG%20ANIO](https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=PER%20DE%20HIDROG%20ANIO)>. Acesso em 25 jun, 2023;
45. Ficha de Informação de Segurança. Hipoclorito de Sódio. Disponível em:  
<<https://cloud.cnpgc.embrapa.br/wp-content/igu/fispq/laboratorios/Hipoclorito%20de%20S%20B3dio.pdf>>. Acesso em 30 jun, 2023;
46. Chloramine (Compound). Disponível em:  
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Chloramine#section=Safety-and-Hazards>>. Acesso em 30 jun, 2023;
47. RAYSON, M. S; et al; Theoretical Study of the Ammonia-Hypochlorous Acid Reaction Mechanism. 2010.
48. SIERRA, R; Thermodynamic properties of chloramine formation and related reactions during water treatment: AG4MP2, G4, and W1BD theoretical study. 2014;
49. Hazardous Substance Fact Sheet. Chloramine. New Jersey Department of Health and Senior Services. Disponível em:  
<<https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0359.pdf>>. Acesso em 03 jul, 2023;
50. DIAGRAMAS DE POURBAIX ou DIAGRAMAS E vs pH. Disponível em:  
<[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6343664/mod\\_resource/content/1/Aula\\_4\\_Pourbaix\\_2021.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6343664/mod_resource/content/1/Aula_4_Pourbaix_2021.pdf)>. Acesso em 03 jul, 2023;
51. RADEPONT, M.; et al.; Thermodynamic and experimental study of the degradation of the red pigment mercury sulfide. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2015, 30, 599. DOI: 10.1039/c4ja00372a.
52. IBANEZ, J.G.; HERNANDEZ-ESPARZA, M.; DORIA-SERRANO, C.; FREGOSO-INFANTE, A.; SINGH, M. M.; Production and Analysis of

Chloramines. In: Environmental Chemistry. Springer, New York, NY, 2008.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-49493-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-0-387-49493-7_18)